

第一章 緒論

1-1 前言

目前世界各國皆專注於各項能源議題，節能減碳已是目前政府大力推廣的節能口號。而發電系統為溫室氣體(Greenhouse gas)的主要來源，其中照明消耗約 15%的發電輸出；若使用發光二極體(LED)為主的固態照明技術(Solid-state lighting, SSL)來取代目前主要的螢光燈管(Fluorescent Tubes)(能源轉換效率約為 20%)，在接下來 5-10 年內將可將照明消耗電力輸出降低至 10%以下甚或更低，因此全面式 LED 固態照明將是目前照明發展的主流趨勢(High-end general SSL)。

非有機式固態照明元件(Inorganic SSL)，LED，已被視為繼白熾燈泡(Filament based incandescent bulbs)、螢光燈管(Glow-discharge-based fluorescent tubes)、氣體放電(HID)等照明元件之後，下一世代的照明技術，圖 1-1 為不同白光發光方式其發光效率隨著時間演進變化，其可得知 LED 固態照明無論是發光強度(Cd/m^2)或者是發光功效(lm/W)可望大幅超越其他照明方式成為主流固態照明元件。

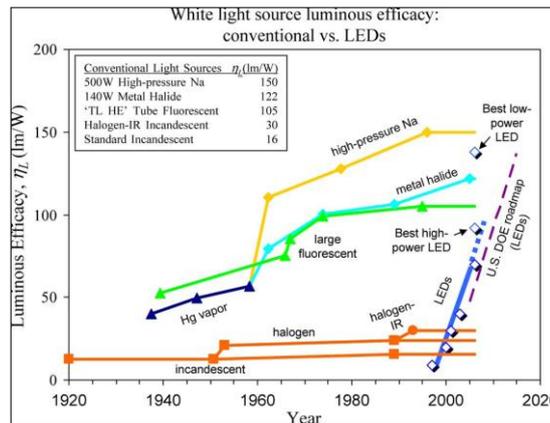


圖 1-1 不同白光發光方式其發光效率隨著時間演進變化
資料來源：Reference 1

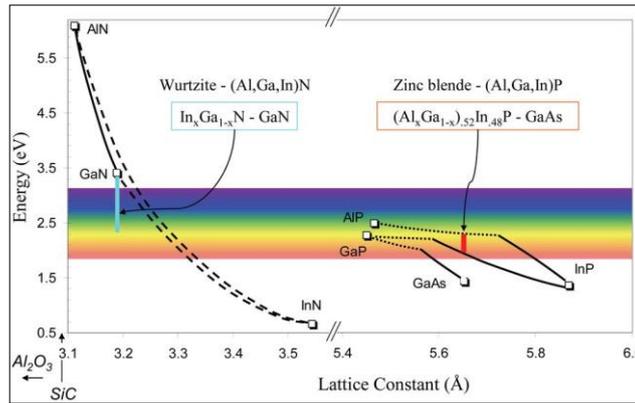


圖 1-2 Wurtzite InGaN 和 Zinc blende AlGaInP 合晶能隙與晶格常數關係
資料來源：Reference 1

如圖 1-2 所示，烏采結構(Wurtzite) InGaN/GaN 和閃辛礦結構(Zinc blende) AlGaInP/GaAs 由於其組成合金能帶間隙包含可見光波長，已個別為藍綠光(InGaN)、紅黃光(AlGaInP)的主流材料。

目前量產 LED 元件以 III 族氮化物製成的 InGaN/GaN 二維多層量子井(MQWs)為主要藍、綠光來源，磷化鋁銦鎵((Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P)組成的四元材料為主要紅、橙、黃光來源；不過由圖 8-2 所示，不論是由 In_xGa_{1-x}N 或 (Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P 等材料，在黃綠光發光波段(495~590nm)範圍其外部量子效率(EQE, η_e)皆低於 25%，形成所謂綠色間隙(Green gap)。

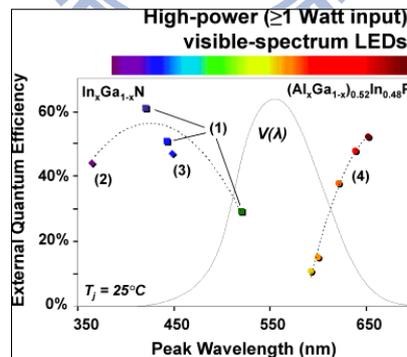


圖 8-2 InGaN 與((Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P)材料不同發光波長與其外部量子效率關係
資料來源：Reference 2

該綠色間隙恰巧與人眼視網膜接收峰值(550nm)重疊，這大大影響了白光 LED 發光功效(Efficacy, lm/W)。此外，目前 InGaN/GaN MQWs 藍光 LED 其內部量子效率(IQE, η_{int})皆可達到 70% 以上，儘管內部仍存在大量缺陷密度($N_D \sim 10^8 \sim 10^{10} cm^{-2}$)[3]；在參考文獻[4-5]中提及，實際光電轉換效率

(Wallplug efficiency, η_{wp})為多樣轉換效率乘積，包含電壓轉換效率、IQE、EQE、磷化物激發+封裝轉換效率(ϵ_p)、光線取出效率(η_{ext})、Stokes-deficit 效率等。

基於光電轉換效率(η_{wp})、演色性(CRI, R_a)、發光功效等提升，如能不利用激發磷化物方式(無論是藍光激發黃色磷化物($Y_B B$)或者是藍光激發綠色、紅色磷化物($R_B G_B B$)所形成的白光)來製作白光，即是利用真實紅綠藍(RGB)來合成的白光，可望同時達到媲美太陽光的高演色性($R_a \sim 100$)、高光電轉換效率($\eta_{wp} > 70\%$)、高發光功效($\sim 408 \text{ lm/W}$)的高功率白光 LED。不過這中間存在許多抵觸因素，例如演色性與發光功效呈現負相關關係，由於要獲得演色性佳的白光，其合成的 RGB 三原色必須分布夠廣(即個別峰值半高寬增大)，不過增加紅光或藍光譜線半高寬，則可能造成譜線進入人眼不可接收範圍(Deep blue/deep red)進而降低發光功效；此外綠光峰值必須集中於 550nm(視網膜接收峰值區域)且半寬可略大於藍、紅光，不過目前所遇到的綠光部分材料轉換效率不佳的瓶頸(Green gap)大大限制其發光功效提升。

參考文獻[5]，其利用 Philips Lumileds thin-film flip-chip (TFFC) Luxeon Rebel lamp 模型來計算以 InGaN 藍光材料激發紅、綠光磷化物以獲得白光的方式($R_B G_B B$)，儘管內部量子效率高達 70%，不過經由電壓轉換效率、封裝效率、光線取出效率、磷化物轉換效率、人眼可見光感光效率、Stoke's loss 等乘積計算，該白光 LED 光電效能轉換效率僅 14%。且該文獻也指出，如圖 1-3 所示，如能全然使用真實 RGB 三原色不利用激發磷化物方式來產生白光，人眼可見光感光效率可提昇至 97%，CRI>90%，光電轉換效率可望接近理想的 70%。其中綠光發光峰值波長必須在 548nm，與人眼感光峰值重疊。

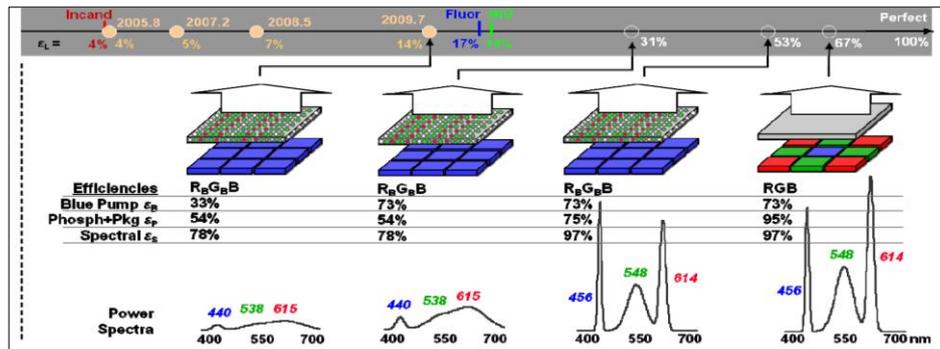


圖 1-3 不同白光產生方式(磷化物/RGB)其光電轉換效率演進關係

如圖 1-2 所示，InGaN 材料由於 GaN 低溫能隙值位於 3.5eV、InN 低溫能隙值位於 0.69eV；且都為直接能隙材料。因此其 InGaN 合金發光範圍包含從近紫外到紅外光範圍(NUV~IR)，可完全涵蓋可見光波長範圍；也因此 InGaN 氮化物材料已成為目前 LED 元件中的主流材料。

InGaN 材料基於成本與結構穩定性(熱穩定性、機械強度等)考量，一般成長藍寶石(Al₂O₃)基板上，不過由於 InGaN 材料熱膨脹係數與晶格常數高度不匹配的原因[6]，造成 InGaN 薄膜自身結構缺陷問題嚴重，限制其內部量子效率。

此外，In 與 Ga 原子本身晶格不匹配(~11.3%)、較弱的 In-N 鍵能使得 N 原子較易於脫附於 InN 表面，以及 GaN/InN 彼此適合成長溫度差異的原因[6](典型 InN 適合成長溫度約介在 400~650°C，GaN 則是大於 950°C)，這些物理性質造成高錒組成 InGaN 薄膜在商業量產化 MOCVD 技術上極不易合成。且在 In 固相合金組成>30%的 InGaN 黃綠光波段其相分離(Phase separation)、In 原子脫附、InGaN 結構因極化而形成的量子史塔克效應(QCSE)等現象皆在紅/黃/綠光波段轉趨明顯，這些本質問題增加了 InGaN 黃綠光等長波長波段的磊晶製備困難。

典型 InGaN 多層量子井(MQWs)為主動發光層的 LED 結構中，位能障層(Barrier)為使用較高成長溫度的 GaN 所製成，p-型載子層則利用 GaN 摻雜 Mg 受子雜質活化而得(Mg-doped p-GaN)。一般 GaN 結構成長溫度皆高於主動層成長溫度才可獲得較佳的 GaN 磊晶品質，而較高溫的成長環境會造

成 InGaN 主動層的 In 脫附明顯而使波長藍移、能隙界面緩和化等問題。

此外，LED 結構中的 p-GaN 後續還需在 N_2 環境下退火以活化 Mg 受子 (Thermal Mg acceptor activation) 和電極製作等程序，這些升溫程序也會間接或直接造成發光波長偏移 (Shift)，因此如能開發出 GaN 低溫環境成長技術應能有效控制 InGaN MQWs LED 元件發光波長，且低溫 GaN 成長技術可運用於 InGaN 綠光或更長波長的 MQWs 的 LED 結構中。

不過由於 MOCVD 系統是利用 NH_3 作為 V 族反應物，在低操作溫度首要面對的即是低溫環境下 NH_3 裂解不足問題，典型單一加熱式 MOCVD 系統在低溫環境下成長高銦組成的 InGaN 薄膜時，常因 NH_3 裂解量不足而間接使薄膜品質不佳。而一般 MOCVD 成長高銦組成 InGaN 薄膜時，通常藉由提高 V/III 比來相對提高活性 NH_3 濃度；不過這並不能直接且有效的提高活性 $(N-H)_x$ 濃度，因此我們藉由改良傳統 MOCVD 系統的個別獨立加熱機制在不干擾基板溫度的情況下，相對提高氣相環境溫度 (Gas phase ambient temperature)，期能提高成長效率 (Growth efficiency)。

1-2 WK2008 TP-MOCVD 系統設計概念

MOCVD 系統要有效降低 GaN 或 InGaN 等氮化物成長溫度首要面對的問題即是在低溫環境下 NH_3 裂解不足 (Insufficient pyrolysis)，一般來說，提高 V/III 比可消極的增加活性氮原子來源 (典型 MOCVD InGaN 成長所使用的 V/III 比皆高於 13000)，典型單一加熱式 MOCVD 系統 (Single susceptor) 腔體受限於石墨載台 (Graphite susceptor) 熱輻射範圍有限，致使環境溫度梯度差較大。若降低成長溫度 (Reduced RF power)，受限的熱輻射範圍可能導致汽相環境中有效 NH_3 裂解量不足；間接導致低溫環境所成長的 III 族氮化物其光電特性不佳。

先前韓國 Kim 研究團隊所提出的 NH_3 預熱機制雖可降低 NH_3 使用量，但對於整體 GaN 光性提升仍為有限，理由為活性氮原子來源仍有供應不足

的疑慮。有鑑於此，WK2008 自組式 MOCVD 磊晶系統即採用 NH_3 預熱概念，不過考慮到活性氮原子供應問題，我們捨棄 V 族前置預熱設計，而是直接在長晶介面附近於滯留層上方提供額外的獨立加熱機制(T_c)；且另一加熱系統提供反應所需溫度(T_g)，兩項加熱系統(Independent susceptors with independent RF heating systems)皆可獨立控制其升降溫程序。以分開獨立加熱的方式，如此應可有效地在長晶界面上(滯留層上方)提供活性氮原子來源，在相對低溫環境下提升 GaN 的光電特性。

在 WK2008 TP-MOCVD 雙加熱系統的設計上，RF 加熱系統無氧銅線圈其形狀、間距、匝數、等效距離、磁場方向和分布、相位干擾、諧振頻率、諧振阻抗匹配(Impedance matching)、雙石墨系統磁力線重疊干擾、加熱線圈相對位置、石墨載台相對位置、石英晶舟導角(Leading angle)、熱對流及熱輻射效應、等效滯留層厚度估算、流場分析、氣浮式載台氣流傳輸、水冷系統等等設計問題；皆是腔體設計的重要考量，這也是 WK2008 TP-MOCVD 系統的專利部分。

1-3 WK2008 MOCVD 磊晶系統控制軟體設計概念

在 LabVIEW 控制軟體設計上主要有 3 大設計考量，為精確時間控制、各項硬體控制整合、系統異常狀態偵測等。

LabVIEW 控制程式主要功能為整合各項硬體的數值讀寫，由於與硬體之間有大量資料傳輸且磊晶程序需求精確時間控制及快速硬體反應，故程式在設計上需仔細評估時間精確度問題，而在 MOCVD 系統中步驟執行時間是以秒作為其最小單位，且步驟時間設定最小為 1 秒，在要求硬體快速反應的條件下，程式限定所有硬體讀寫以毫秒(ms)作為其時間單位。

各式硬體整合方面，LabVIEW 控制程式利用『獨立程式區塊』和『子程式』設計技巧依各式硬體來作控制項畫分，使達到各項硬體資料讀寫平行整合，避免時間延遲和獲得硬體讀寫時脈同步化(Clock synchronization)；

最重要的則是完成雙加溫系統全時(Full time)升降溫程序自動PID控制、RF輸出功率狀態偵測等。

在系統異常狀態偵測方面，LabVIEW控制程式其異常狀態依其嚴重性分成早期警示、異常預警及緊急狀態等3大項系統狀況監控。若為緊急狀態程式將自主動作，強迫載入安全模式以做第一時間處理，避免傷害人員及損及系統；另有強迫中斷按鍵設計，以供使用者特殊緊急狀態應變等，而其餘狀態則於前置面板依其對應狀態顯示之。

除了上述基本硬體整合控制外，WK2008磊晶控制程式尚包含了有機金屬分子(Metal-organic molecules, MO Source)消耗量計算(Per-run)、系統所有硬體讀值紀錄檔輸出(如流量、溫度、壓力變化等)、系統緊急/斷電應變等設計；這些附加功能皆大大提升了該磊晶程式的商業化運用潛力。

1-4 論文架構及其編排方式

本論文將主要分成 2 大架構，分為低溫 GaN 磊晶成長研究分析和 WK2008 MOCVD 磊晶系統程式設計。

其中 WK2008 MOCVD 磊晶系統程式設計部分可再細分為下列 3 大項：

1. WK2008 MOCVD 系統氣體傳輸管路設計理念、控制硬體介面配置、氣動閥控制邏輯、RF 加熱系統、反應腔體冷卻水路、鈹膜 H₂ 純化系統氣動閥邏輯電路等介紹。
2. WK2008 LabVIEW 磊晶控制程式設計，包含程式整體架構、運作流程、相關狀態應變考量、細部程式設計細節、LabVIEW 控制面板操作功能、Recipe 編輯/編譯等設計概念。
3. 各式硬體細部操作、硬體介面/功能、通訊格式等內容介紹，包含溫度控制器、數位式氣體流量計、MO 有機金屬分子源壓力控制器、腔體壓力控制器等。

由於本論文內容繁複且龐大，為便於閱讀，將本文分成 2-6 章、附錄 A-G

共 7 個獨立章節內容來做編排。

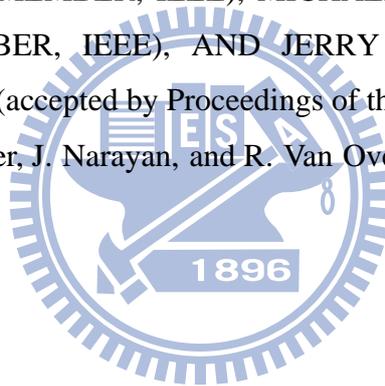
第 2 章為 WK2008 磊晶系統硬體規劃與控制程式設計簡介，期使用者能對 WK2008 磊晶系統軟硬體設計上有初步了解，詳細 WK2008 磊晶系統硬體配置和控制程式設計細節則附於附錄 A-B 介紹，主要內容即為上述 1-2 項，使用者可逕行查閱之。

第 3-6 章為低溫氮化鎵成長及其光電特性研究，分為第 3 章 低溫氮化鎵成長緣由、第 4 章 量測系統原理、第 5 章 實驗方法、第 6 章 結果與討論。

附錄 A-G 內容則為上述第 1-3 大項，個別是附錄 A WK2008 磊晶控制系統硬體設計及規劃、附錄 B WK2008 磊晶系統 LabVIEW 控制程式設計、附錄 C EURO THERM 腔體溫度控制器、附錄 D MKS 腔體壓力控制器、附錄 E SIC 數位式氣體流量控制器、附錄 F Bronkhorst 數位式氣體壓力控制器暨流量控制器、附錄 G 附件；由於程式設計參考了各項硬體的操作功能、通訊指令格式、字元轉換等，使用者可依其需求選擇選擇查閱之。

【參考文獻】

- [1]. Michael R. Krames, *Member, IEEE*, Oleg B. Shchekin, Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller, Ling Zhou, Gerard Harbers, and M. George Craford, *Fellow, IEEE*, *JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY*, VOL. **3**, NO. **2** (2007).
- [2]. Julia M. Phillips, Michael E. Coltrin, Mary H. Crawford, Arthur J. Fischer, Michael R. Krames, Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller, Yoshi Ohno, Lauren E. S. Rohwer, Jerry A. Simmons, and Jeffrey Y. Tsao, *Laser & Photon. Rev.* **1**, No. 4, **307–333** (2007).
- [3]. F. A. Ponce, B. S. Krusor, J. S. Major, W. E. Plano, and D. F. Welch, *Appl. Phys. Lett.* **67**, **410** (1995).
- [4]. Yuji Uchida, and Tsunemasa Taguchi, *Optical Engineering* **44**(12), **124003** (2005).
- [5]. JEFFREY Y. TSAO (MEMBER, IEEE), MICHAEL E. COLTRIN, MARY H. CRAWFORD (MEMBER, IEEE), AND JERRY A. SIMMONS, *SSL: An Integrated Perspective* (accepted by Proceedings of the IEEE, August 2009).
- [6]. S. C. Jain, M. Willander, J. Narayan, and R. Van Overstraeten, *J. Appl. Phys.* **87**, **965** (2000).



第二章 WK2008 磊晶系統硬體規劃與控制程式設計

2-1 WK2008 磊晶系統硬體規劃簡介

WK2008 MOCVD 磊晶系統控制主要分為硬體設計及軟體撰寫，本節將簡單說明 WK2008 MOCVD 磊晶控制系統的硬體設計及其傳輸介面配置，而系統控制程式則透過傳輸介面來達到硬體之監控。

在 WK2008 MOCVD 磊晶系統硬體設計上，包含氣體傳輸管路設計、控制系統硬體傳輸介面配置、控制指令設定意義及其硬體對應關係、系統不同狀態下的氣動閥開關控制邏輯、真空系統中氣動閥開關控制邏輯、真空泵浦開關控制等邏輯設計；此外，尚包含控制系統的多項附屬裝置，如磊晶系統狀態偵測 LED 顯示電路設計、手套傳輸箱中電磁控制迴路設計、腔體和射頻(Radio frequency, RF)高週波加熱系統之冷卻循環水路設計、以及氫氣純化器之鈀金屬膜(Palladium membrane)氫氣純化原理及其加熱系統管路和控制電路設計等。由於內容繁雜且礙於文章篇幅，詳細硬體設計細節附於附錄 A 中，使用者可逕行查閱之，本節只簡單介紹磊晶系統的氣體傳輸管路設計。

圖 2-1 為 WK2008 磊晶系統氣體管路設計，管路設計包含了氣體傳輸管路(Gas handling system)，真空系統(Pumping system)管路等設計；而氣體傳輸管路設計可分為下列 4 大項，如圖 2-1 中所示：

- 載流氣體(Carrier gas)管路。
- V 族管路。
- III 族管路。
- 腔體輔助氣體管路。

除了上述 4 大分項外，氣體傳輸管路尚包含排氣端(Vent)管路、N 型摻雜源(SiH_4)管路、有機金屬分子源管路、氣體走向切換區(Epifold)等；氣體傳輸管路的諸多設計理念分項介紹於附錄 A 中。真空系統為獨立於氣體傳輸管路的獨立管路區，有其特定控制邏輯，詳細內容亦附於附錄 A。

WK2008 MOCVD Epitaxy System

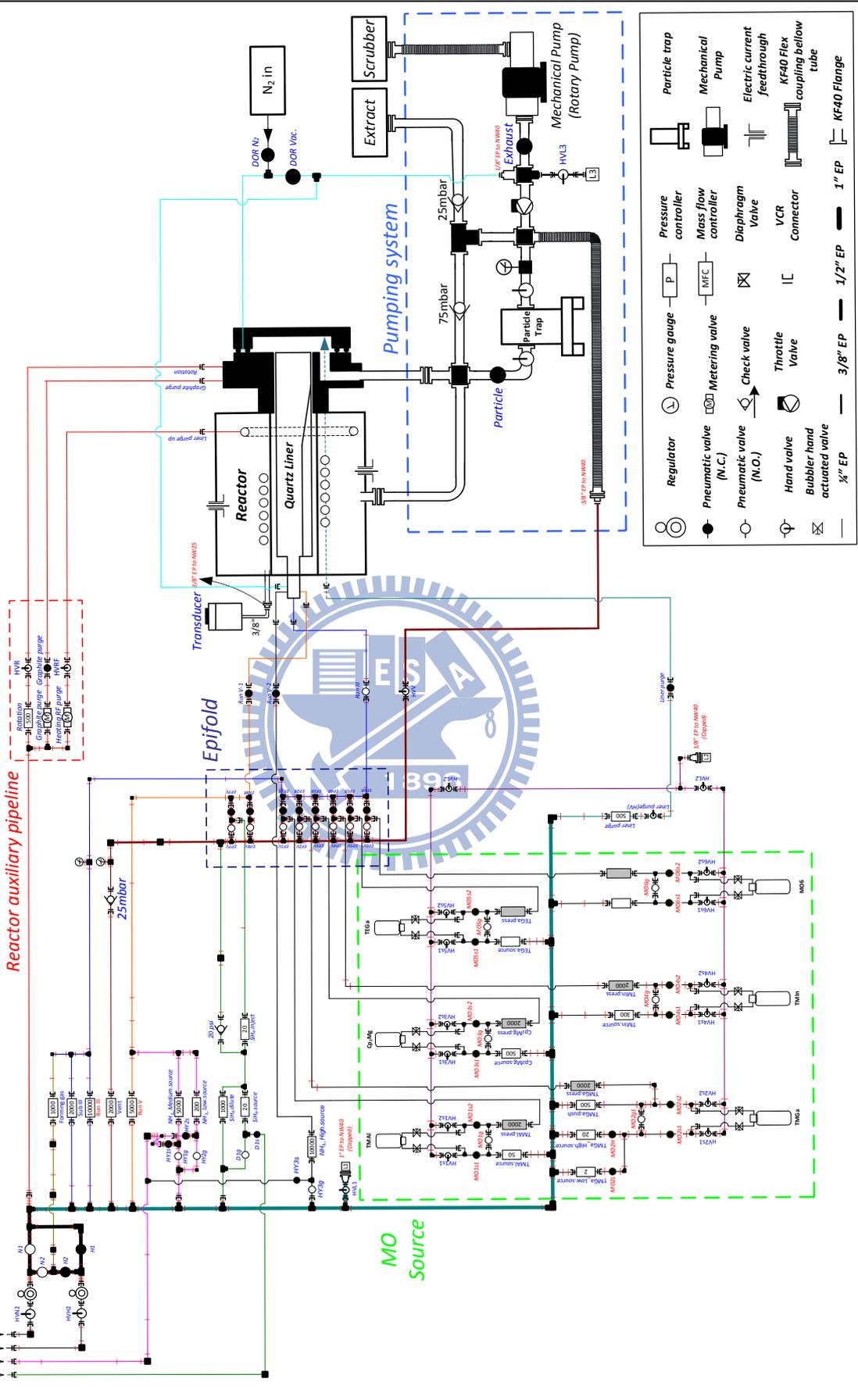


圖 2-1 WK2008 MOCVD 磊晶系統管路設計圖

2-2 WK2008 磊晶系統控制程式設計簡介

本節為簡述WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式的設計特點及考量。磊晶控制程式主要設計分為主程式、安全模式程式、系統異常狀態偵測程式等3大項，其中主程式又可分為菜單控制(Recipe characters control)及系統潔淨(System purge)設定，而主程式中菜單控制及潔淨程式則利用使用者編輯的菜單指令字元控制其程式狀態切換；其中程式架構內亦設計了區域變數(Local variable)型態的中斷旗標布林(Interruption flag boolean)真偽判定，以作為主程式與安全模式的程式主控權轉移，文章中亦詳細說明主程式與安全模式中的硬體設定及對應之程式設計；此外考量到系統可能發生的緊急狀況，依據個別硬體特性及個別狀況下的最佳系統處理，設計出符合系統需求之安全模式程式，以確保人員安全及降低系統傷害；系統異常狀態偵測程式設計上為持續偵測各項系統異常狀態，以當作安全模式程式的觸發控制訊號，即為主程式與安全模式兩者主控權轉移的中斷旗標；此外控制程式有多項附屬設計，其中包含提供時間資訊、MO分子源消耗計算、系統供電狀態偵測、硬體輸出狀態監測記錄、.txt文字檔輸出等；提供使用者完整的磊晶程序資訊，詳細磊晶成式設計細節請參閱附錄B內容。

附錄B亦著重介紹菜單編譯(Editing&compiling)功能和用法、程式面板資訊解讀、MOCVD磊晶程式設計理念、時序控制整合、安全模式分類考量等項；該內容皆不涉及LabVIEW程式設計語法，方便使用者概要性地了解程式設計重點。

此外附錄B中尚提供完整的軟硬體介面控制程式設計細節和各式觸發狀態設計、建議排除方法、系統預設值等列表，進階使用者若有編修程式或修改偵測電路等需求可逕行查閱。

為了讓使用者方便監控系統狀態，前置面板設計成簡易管路圖型式，而各式硬體讀值視窗依其屬性分類置放，使用者在電腦螢幕上即可同步監控

系統各項狀態，包含時間資訊、硬體回傳值、載流氣體種類、管路內氣體流向分布、分子源開關狀態、腔體狀態等資訊；而前置面板上亦搭配磊晶程序的各項要求設計多項控制按鍵，方便使用者作系統狀態切換、氣動閥開關、節流閥開關等操作；詳細按鍵操作時機、設計邏輯等詳細內容附於附錄B中陳述。

圖2-2為控制程式前置面板，其介面分為顯示及控制介面等2大項，即：

【顯示介面】

LabVIEW磊晶程式的前置面板顯示介面分為下列5大資訊顯示項：

1. 氣體傳輸管路中相關資訊。
2. 反應腔資訊。
3. 系統狀態。
4. 菜單資訊。
5. 其他顯示項。



【控制按鍵】

前置面板控制按鍵分為下列6項動態控制按鍵；而如圖2-2所示，控制按鍵為矩形藍框所包覆的圖像，其中1~3項整合至圖2-2左上方的Program control button方框內。

1. 強制中斷主程式(Abort Process)。
2. 跳電計時器重置("Power Glitch" Timer Reset)。
3. 程式停止(Program stop)。
4. 腔體潔淨(Purge)或保壓切換鍵。
5. 節流閥動作切換鍵(Throttle valve control button)。
6. 真空泵浦開關(Main Pump switch)。

相同地，詳細前置面板功能鍵和顯示項動態說明等內容於附錄B有完整說明，使用者可逕行查閱之。

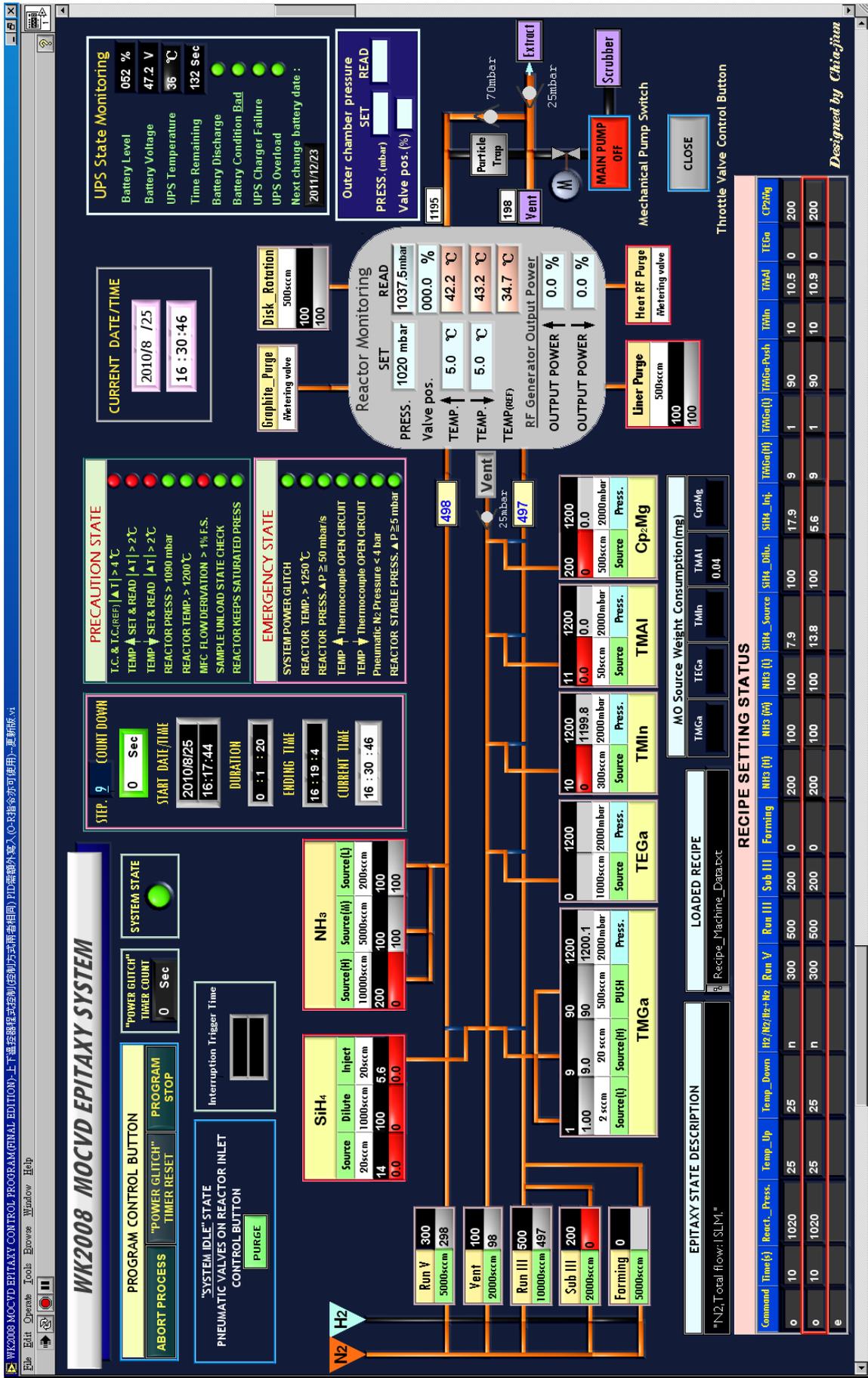


圖 2-2 WK2008 MOCVD 磊晶系統 LabVIEW 控制程式前置面板設計

第三章 低溫氮化鎵成長緣由

3-1 低溫氮化鎵成長利基

典型MOCVD系統的GaN成長中，由於V族NH₃在低溫環境下裂解效率(Cracking efficiency)不佳，為達到有效提供活性氮原子(Active Nitrogen atom)來源，成長溫度皆高於1000°C。不過在成長溫度高於800°C時，GaN即產生明顯分解現象[1](GaN磊晶層脫附速率大於1原子層厚度, Desorption rate > 1 ML/s)，如圖3-1所示(參考文獻1擷圖)。

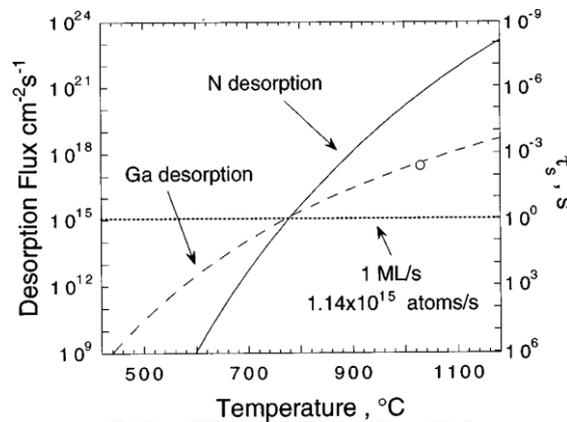


圖3-1 GaN原子脫附流量(Desorption flux)與溫度關係圖
資料來源：Reference 1

在圖3-1中可知，在溫度大於900°C時氮原子脫附現象(Nitrogen desorption)轉為主導，一般認為氮脫附所造成的本質點缺陷氮空缺(Nitrogen vacancies, V_N)是造成未摻雜GaN背景n型本質載子濃度(>10¹⁷ cm⁻³)偏高的原因[2,3]；而過高的n型背景載子濃度所造成受子補償(Acceptor compensation)效應也是p-GaN難以製作的原因之一。此外，在高溫環境下易誘發寄生反應(Parasitic reaction)發生，造成如C、Si、Zn、H、O、Be等雜質混入GaN晶格中造成雜質缺陷，進而影響GaN發光特性和載子複合效率等[4]。

不過上述NH₃裂解不足、氮原子脫附、副反應等問題，皆可透過其他磊晶參數來改善，如增加V/III比、提高反應物純度(純化機制)等方式；而普遍MOCVD機台無論是垂直式或水平式腔體設計，一般皆是在高溫環境(1000°C)較易取得較佳GaN磊晶品質。但是以提高NH₃流量來相對提高氮原

子供應濃度，是較不經濟的做法，如能有效的在相對低溫的環境下成長GaN，可望改善NH₃使用成本和降低GaN背景本質載子濃度以利p-GaN製作、提高載子遷移率等優勢。

3-1-1 【InGaN/GaN 多層量子井結構成長問題】

如第一章固態照明簡述中所示(如圖1-1)，紅光材料磷化鋁銦鎵($(Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$ 四元化合物系統中，雖然在波長大於650nm(Emission $<1.9eV$)的發光範圍其內部量子效率可大於90%，但在操作波長短於630nm時其外部量子效率卻隨著波長變短而嚴重遞減，在RGB三原色固態照明中所使用的紅光(614nm)範圍，外部量子效率更低於15%；此外，($Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$ 系統在綠光(550nm)範圍($x_{Al}=0.55, y_{In}=0.48$)，能階更由直接能隙轉為非直接能隙(Indirect band-gap)[5]，造成磷化鋁銦鎵材料在綠光或更短波長範圍其發光效率極差(EQE $<10\%$)。

就目前廣泛使用的藍綠光 $In_xGa_{1-x}N/GaN$ 多層量子井(Multiple quantum wells, MQWs)結構中，雖然以InGaN/GaN多層量子井為主動發光層所製成的藍綠光LED、LD等元件皆以量產化，不過如同圖1-1所示，目前以InGaN/GaN多層量子井所製成的發光元件中在波長大於520nm的黃綠光範圍，其最佳(State-of-the-art)外部量子效率也僅止於20%以下(IQE $\sim 25\%$)；其造成InGaN/GaN結構發光效率不佳的原因一般研究皆推論與主動層中In含量增加有關。

由於InN與GaN彼此晶格常數不匹配度高達11.3%($a_{InN}=3.540\text{\AA}$ ， $a_{GaN}=3.186\text{\AA}$)，遠大於InAs/GaAs僅7%的晶格不匹配度，因此導致固相In、Ga彼此互溶(Miscibility)能力相當有限，且易因spinodal decomposition而形成相分離(Phase separation)[6,7]，致使In組成介於40~60%單相(Single phase)的高銦含量 $In_xGa_{1-x}N$ 結構(In-rich)在典型MOCVD系統中極不易取得。

烏采結構(Wurtzite) InGaN/GaN多層量子井結構一般皆成長在n型摻雜

(LED)或未摻雜之高溫環境成長的Ga_N緩衝層之上(Si-doped or non-doped High Temperature-Grown Ga_N)，由於InGa_N晶格長度大於Ga_N，InGa_N/Ga_N MQWs結構為受壓縮應變(Compressive strain)的狀態，而該應力會造成壓電極化效應(Piezoelectric field induced polarization, P_{pz})，進而在異質界面上形成壓電極化電荷堆積。InGa_N晶體沿著wurtzite結構的[0001]方向成長時，單位晶胞內正負電荷中心不重合形成偶極矩(Dipole moment)，而在無外加電場作用下產生自然存在的自發極化現象(Spontaneous polarization, P_{sp})，其僅與磊晶層極性有關。

對於氮化物光電元件而言，上述自發和壓電極化效應會影響元件的能帶結構，此現象在量子井更為明顯，即所謂的量子侷限史塔克效應(quantum confined Stark effect, QCSE)[8-11]。在QCSE作用下，價電帶與導電帶在強大極化電場作用下嚴重傾斜，因此電子與電洞彼此分開侷限在量子井兩側，導致電子與電洞波函數在空間上重疊率降低(Wave-function overlap)，而增加輻射發光生命期(Radiative lifetime)、降低電子與電洞的輻射再結合速率(Radiative recombination rate)及內部量子效率，並且使發光波長較無極化效應的情況下產生紅位移(Red shift)，或稱Stoke's位移(*Stoke's shift*)，該QCSE現象會隨著In組成增加因晶格不匹配度增大而加劇[12]。

典型QCSE效應在InGa_N/Ga_N結構中所造成的影響為在變溫PL實驗(Temperature-dependent PL, TP-PL)中，發光峰值呈現(Red-blue-red)的"*s shape*"譜線變化[13]；或在LED元件中造成電激螢光(EL)發光譜線隨著注入電流密度提高因屏蔽作用(Screening effect)而藍移，且在綠光LED其EL藍移量相較於藍光LED更為明顯[14-15]。

此外由於InGa_N/Ga_N MQWs結構成長在n型摻雜的Ga_N之上(Si-doped)，為避免因介面壓縮應力釋放而在MQWs中形成線缺陷(TDs)或島狀物(Islands)等與非輻射復合或載子散射中心相關的缺陷結構，一般MQWs單週

期厚度設計為低於臨界厚度值(Critical thickness, h_c)，其厚度約與應力量成反比，典型值皆低於15nm(Well:2~3nm, barrier:9~10nm)；且經由理論計算，臨界厚度值會隨著Well中In組成增加而降低[16]($x_m > 0.2$, $h_c < 3\text{nm}$)。

一般以InGaN/GaN量子井結構為主動層所製成的LED元件中，在綠光發光範圍(λ :520~540nm)其In組成為20~25%，Well層成長溫度皆在730~800°C，well層厚度皆小於30Å，GaN能障層(Barrier)厚度約為9~15nm，成長溫度為740~900°C。普遍研究皆認為成長溫度對GaN晶體光學特性具有關鍵性影響，典型MOCVD系統在高於1000°C的環境下較易於獲得良好GaN磊晶層品質。不過這與InGaN主動層(MQWs)在愈長波長的成長溫度需較低的條件相抵觸，但若降低GaN成長溫度，較差的GaN磊晶品質可能間接造成缺陷、載子非輻射復合等問題，進而降低量子井的內部量子效率(IQE)[17]。

該溫度問題對於In組成(x_m)在6~10%左右的藍光而言影響較小，不過對於In組成在20~25%的InGaN/GaN綠光LED、甚至In組成高於30%的紅、黃光等；隨著In組成增加因高溫環境更易使In、N等原子蒸發(Re-evaporation)而影響增鉅。在整個LED製程當中，許多升溫過程皆會影響InGaN/GaN主動層的發光特性，如QW中GaN能障層成長(或成長中斷)、Mg摻雜的p-GaN(Mg doped p-GaN)成長(T_g : 850~1000°C)、p-GaN中Mg受子退火活化(Thermal annealing for Mg-acceptor activation, $T_a > 700^\circ\text{C}$)[18]、電極(electrode)製作等。其中由於p-GaN成長厚度較厚(>1 μm)故其成長時間較長，且後續的退火時間(>10min)也不短，故該階段程序對於InGaN/GaN MQWs的光性影響最鉅。簡言之，在InGaN/GaN MQWs的成長中，若能維持整體製程溫度在相對低溫環境下進行，將有助於In組成提升及避免其揮發。

許多研究針對p-GaN成長溫度[19-21,31]、InGaN/GaN MQWs[23-24]或p-GaN退火溫度[22]、GaN Barrier成長溫度[25-26]、Barrier成長時間[27]、QW成長中斷(Interruption between Well and barrier)[28-29]、Well至barrier成

長的升溫速率(Ramping rate)[30]等不同成長參數，對於InGaN/GaN MQWs 發光波長、發光強度、半高寬、IQE、表面形貌、Well層中富含銦之叢集物(In-rich clusters)分布(或高度變化)、InGaN/GaN MQWs中In組成均勻性(橫向/縱向)、載子濃度[19,31]等影響；大致上可歸納出下列4點：

1. 較高/較長的GaN成長/退火溫度或時間皆會導致發光波長藍移(由於高溫會致使In揮發程度提升)。
2. 較高的GaN成長/退火溫度皆會導致In原子在Well與Barrier之間交互擴散(Inter-diffusion)[23]甚或致產生金屬銦叢集(Metallic Indium clustering)現象[32]。
3. 較長的Ramping/或中斷時間雖因In原子再揮發導致發光譜線藍移和半高寬增加，不過卻能因為形成類似量子點(Quantum dots like)結構而因其載子侷限能力(Carrier confinement)提升而稱加發光效率。
4. 降低p-GaN成長溫度能有效提升p-GaN受子雜質(Mg)濃度和降低其電阻率[31]，該文獻中提出p-GaN成長溫度在800°C時，電洞濃度約為 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

根據上文所列文獻可得知，擁有較佳InGaN光學特性所使用的p-GaN成長溫度皆高於900°C，Barrier成長溫度皆高於800°C，而低於800°C(For GaN)所成長的InGaN/GaN MQWs則無較佳的光學特性發表(僅蒐集可見藍綠光範圍做比較範本)。

在眾多抑制InGaN/GaN MQWs QCSE效應的研究當中，其中最廣泛被研究用來抵消極化電場的方法即為使用Si-doped的量子井結構[33-35]。Franssen[35]等學者於2005年所發表論文提到，當InGaN/GaN MQWs LED或LD結構中，可藉由在Barrier層摻雜Si方法來有效屏蔽量子井內部極化電場，當Si摻雜濃度高達 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 時，可完全屏蔽極化電場(Fully-screened)。此外，J.-H. Ryou[36]團隊在2008年所發表的研究中提出，利用相對較低成

長溫度($\sim 840^\circ\text{C}$)的 $\text{p-In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 來取代典型 p-GaN ，也能有效地降低壓電場和提升綠光範圍($\lambda: 535\sim 545\text{nm}$)的峰值發光強度。

相同地， InN 或 InGaN 等量子點(QDs)結構中所使用的 GaN 披覆層(Capping layer)，如能在相對低溫環境下有效成長 GaN ，對於 InGaN 或 InN 奈米粒(Nano-dots)的 In 原子脫附現象應能有效抑制，避免間接影響其組成而改變發光波長。

綜合以上所述，降低 p-GaN 或 GaN Barrier 成長溫度有下列5項優勢：

1. 減緩在 InGaN/GaN MQWs 中， In 原子在Well與Barrier層之間的交互擴散現象(Inter-diffusion)[37]，抑制金屬銻叢集物(Metallic In clusters or precipitates)形成和維持Well與Barrier界面能帶陡峭性(Abruptness)，提供較佳的載子2維空間量子侷限能力(2D Carrier quantum confinement)。
2. 在 InGaN/GaN MQWs 成長中，降低 GaN Barrier 和 p-GaN 成長溫度能減緩 InGaN 主動層中 In 原子脫附(In desorption)效應和其類量子點微結構之隨機分布現象，有效控制發光波長及抑制半高寬增加。
3. 在 p 型載子供應層製作上，若使用較低溫度成長的 $\text{p-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x_{\text{In}}=1\%$)來取代傳統 p-GaN ，因 $\text{p-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 可減緩QW之間界面所受的壓縮應力緣故，有助於緩和QSCE效應。若能有效地在相對低溫環境獲得較佳的 $\text{p-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 磊晶層品質(提升 In 溶入效率)；低溫技術可間接地提升 InGaN/GaN MQWs 綠光發光效率。
4. 降低 p-GaN 成長溫度能有效提升受子雜質(Mg)溶入率，藉由降低界面電阻來提升電壓轉換效率。
5. 降低成長溫度能降低 N 原子脫附率，藉以降低背景本質載子濃度，以利 p-GaN 製作、增加載子遷移率等。

3-1-2 【相關MOCVD低溫氮化鎵磊晶技術】

早期成長低溫GaN磊晶層技術主要以傳統MOCVD機台，其中包括商業型機台(如Aixtron 200機型)[38-39]、交替III、V族供應的原子層磊晶法(Atomic layer epitaxy) [40-41]等；不過雖可降低磊晶溫度至550~900°C，但其PL光譜仍占有在GaN磊晶中常見的2.2~2.9eV和缺陷有關的黃光發光(Board band yellow luminescence)，且在近能帶邊緣(Near band edge)發光峰值的半高寬均大於100meV；在光性發表上較佳的僅H. Y. Wang[41]團隊在900°C環境下成長的GaN，其9K光激螢光光譜峰值為3.475eV(Donor bound exciton, D⁰X)，半高寬為9meV的低溫GaN，如圖3-2所示。

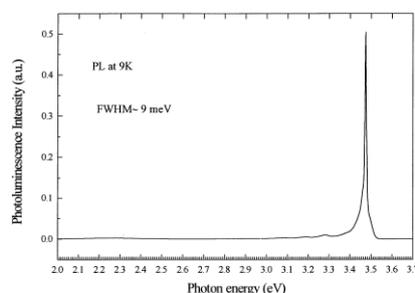


圖3-2 H. Y. Wang團隊900°C成長Ga_N 9K PL譜線
資料來源：Reference 42

此外在MOCVD系統中，有鑑於V族反應分子(NH₃)在低溫環境下裂解程度有限造成活性氮複合物(N-H Radicals)供應不足，有學者提出於V族管路前端增加預熱裝置(Preheating)的改良式MOCVD機台[42-43]，一般認為在V族前端增設預熱裝置的MOCVD系統，雖然能藉由調變預熱裝置的溫度來提高NH₃分解率，降低NH₃使用量，但由於所分解之活性氮反應分子距離長晶介面仍尚有一段距離，易因環境溫度降低進而降低其氮反應分子活性，所以增設預熱裝置的MOCVD系統雖具有一定成效，但其結果只稍優於傳統MOCVD系統。此外還有多項降低Ga_N成長溫度的方法，包含利用電漿(Plasma)致使N₂分解的複合MOCVD系統[44]、光照輻射加熱(Light radiation heating)的MOCVD系統[45]、更換V族材料{Dimethylhydrazine(DMHy)、Tertiarybutylhydrazine(TBHy)}的MOCVD系統[46]等。

綜合上述方法，MOCVD系統若利用 NH_3 作為V族材料則GaN薄膜成長溫度都必須高於 900°C 以上才有較好的光學品質，而若GaN磊晶溫度低於 900°C 時，其光激螢光光譜半高寬皆無法低於 200meV 。

【WK2008 磊晶系統優勢】

要有效降低 GaN 成長溫度首要面對的問題即是在低溫環境下 NH_3 裂解不足(Insufficient pyrolysis)，一般來說，提高 V/III 比可消極的增加活性氮原子來源。而先前研究團隊所提出的 NH_3 預熱機制雖可降低 NH_3 使用量，但對於整體 GaN 光性提升仍為有限，理由為活性氮原子來源仍有供應不足的疑慮，由於 III 族有機金屬分子 TMGa 在溫度高於 435°C 即已完全分解，因此不另行考慮 III 族分解效率問題。有鑑於此，WK2008 自組式磊晶系統即採用 NH_3 預熱概念，不過考慮到活性氮原子供應問題，我們捨棄 V 族前置預熱設計，而是直接在長晶介面附近於滯留層上方提供額外的獨立加熱機制(T_c)；且另一加熱系統提供反應所需溫度(T_g)，兩項加熱系統(Independent susceptors with independent RF heating systems)皆可獨立控制其升降溫程序。以分開獨立加熱的方式，利用與長晶介面上反應溫度梯度差(Gradient)，如此應可有效提供活性氮原子來源，在相對低溫環境下提升 GaN 的光電特性。

第四章 量測系統原理

4-1 光激螢光光譜基本原理

光激螢光光譜(Photoluminescence, PL)是一種不具破壞性的半導體光學性質檢測技術，當一道能量大於或等於半導體能隙的雷射光入射於材料表面時，價電帶(Valance band)的電子因入射光子提供足夠能量，跨越能隙激發至導電帶(Conduction band)，接著透過聲子(Phonon)與載子間的相互作用電子回至基態，使導電帶上的電子與價電帶上的電洞在能帶邊緣(Band tail)附近重新分布，最後因電子與電洞對復合而產生螢光，其倒空間復合過程如圖 4-1 所示。

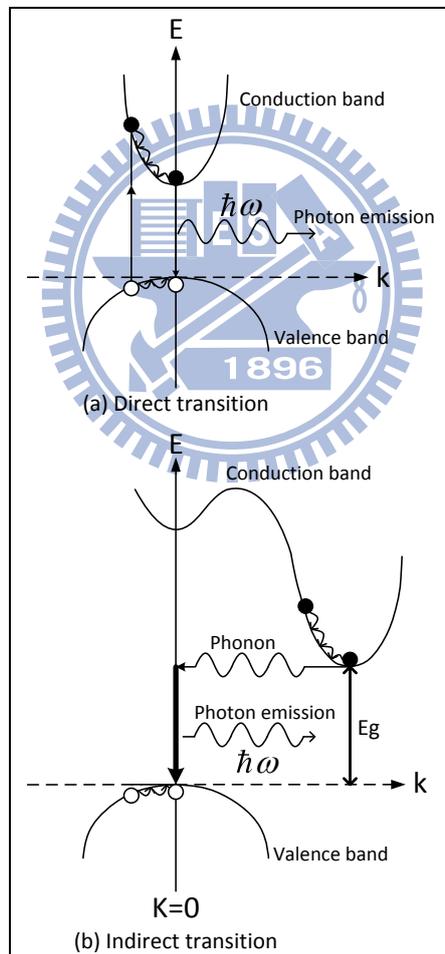


圖 4-1 光激螢光光譜(PL)倒空間帶間躍遷過程示意(a)直接能隙(b)非直接能隙

由於入射雷射光束照射在材料上，其可能反應為材料表面溫度升高，或是輻射出比入射雷射光波長還要長的光子，而此輻射出的光子是藉由雷射光子所激發的緣故，故在此稱為光激螢光光譜。而上述入射光子除了可激

發價帶上電子至導電帶外，尚可激發受縛於中性受子(Neutral accpetor)能階的電子到更高的能態，激發價電帶電子躍遷至離子化施子能階(Ionized donor level)或是從離子化的受子能階(Ionized acceptor level)躍遷至導電帶等，藉由不同載子躍遷方式所放出不同能量的光子，吾人可簡單推論該半導體中的相關雜質能態。

光激螢光實驗即是量測電子電洞對復合所產生的螢光，得到螢光強度對能量分布的譜圖，由譜線峰值可推估材料能隙、相關雜質能階位置等；譜線半高寬則可反應出樣品光學品質優劣，PL 量測是一種簡單、非破壞性的半導體光學量測技術。

當入射光能量被材料所吸收之後，將價電帶上電子激發至導電帶上所產生的電子電洞對其再結合路徑可依循(一)輻射復合(Radiative recombination, NR)或是(二)非輻射復合(Non-radiative recombination)放射光子等。以下將分項詳述之。

(一) 輻射躍遷(Radiative transition)

當電子由較高能態掉落至低能態，無論是本徵態或是雜質態皆有可能會發生輻射躍遷進而放出光子，此時系統處於非平衡態，且不同躍遷型是會放出不同能量的光子，以下為 4 種躍遷型式簡介。

(1) 自由—束縛態躍遷(Free-to-bound transition)

載子從材料本身能帶和雜質相關能階之間躍遷即是自由—束縛態躍遷，一般典型為導電帶到受子(A^0X)或是施子到價電帶(D^0X)，如圖 4-2 中(c)(d)躍遷型式所示，且無論是在直接或非直接能隙材料皆要維持動量守恆。在溫度大於 0K，雜質能態只會被部分占據(Partial occupied)，以至於部分雜質中心是電中性(Neutral)而其他將會被離子化(Ionized)。若雜質型態是施子(Donor)會有 2 種可能躍遷型態：(a)電子到施子能階(e^-D^+)；(b)電洞到中性施子能階($h-D$)。

若激發光譜是紅外光範圍躍遷型式便是(a)，因為低能量的影響，聲子放射競爭明顯，故其輻射效率極低。而(b)型式躍遷非常接近基本能隙值，且

該躍遷在大多數半導體都可觀察到，該躍遷所輻射的光子能量為 $E_g - E_b$ ， E_g 為能隙值， E_b 為淺層雜質束縛能。

(2) 帶間躍遷(Band-to-band transition)

帶間躍遷為自由電子和自由電洞之間復合如圖 4-2 中(a)所示，該躍遷常發生於直接能隙半導體材料上，如 III-V 族化合物半導體，其電子電洞對會以高效率做輻射復合，其復合速率 R 如式 4-1 所示：

$$R = \int R(n, p) d\nu \approx \quad (4-1)$$

其中 n 和 p 個別代表電子和電洞濃度， h 是普朗克常數(Plank's constant)， ν 是輻射光子頻率，其輻射復合速率約正比於自由電洞和電子濃度乘積，較多的電子和電洞對濃度有較快的復合速率。

(3) 施子—受子對復合(Donor-acceptor-pairs recombination)

施子和受子能階之間的躍遷如圖 4-2 中(e)所示，經光子激發後的電子和電洞會被束縛至 D^+ 和 A^- 位置進而產生中性的 D^0 和 A^0 中心，侷限在中性施子能階的電子(Electrons localized at neutral donor sites)和受縛在中性受子能階的電洞(Holes trapped at neutral acceptor sites)彼此會做輻射復合，如以下關係式所示：



如此躍遷所產生的放射能量為：

$$E_{DAP} = h\nu = E_g - (E_D + E_A) + \frac{Q^2}{\epsilon R_{DAP}} \quad (4-3)$$

其中 E_D 和 E_A 分別為施子和受子的束縛能， Q 是價電荷量， ϵ 是物質介電常數，而 R_{DAP} 為施子和受子空間上距離；愈大的 R_{DAP} 會造成彼此躍遷機率降低。

(4) 自由激子躍遷(Free exction, FE transition)

電子與電洞彼此可藉由庫倫力(Columb interaction)吸引而形成如氫原子(Hydrogen-like)型式的自由激子能態，如圖 4-2 中(b)。自由激子可以在晶格間移動，但由於其本身是受縛的電子電洞對(Bound electron-hole pair)，

電子電洞彼此同時移動，因此沒有淨電流產生。自由激子躍遷復合在極純材料品質中轉趨明顯，且峰值半寬極窄，自由激子能態如式 4-4 所示：

$$E_n = \frac{2\pi^2 m^* e^4}{h^2 \epsilon^2 n^2} \quad (4-4)$$

其中 m^* 為減縮質量(Reduced mass)， n 是量子數， ϵ 是物質介電常數。在直接能隙半導體中，放射光子能量為：

$$h\nu = E_g - E_n \quad (4-5)$$

然而在高階的峰值強度則會遞減得相當迅速，在非直接能隙半導體中，動量守恆需要聲子放射才能完成躍遷放射光子能量為：

$$h\nu = E_g - E_h - m_i \quad (4-6)$$

其中 E_p 為聲子能量。

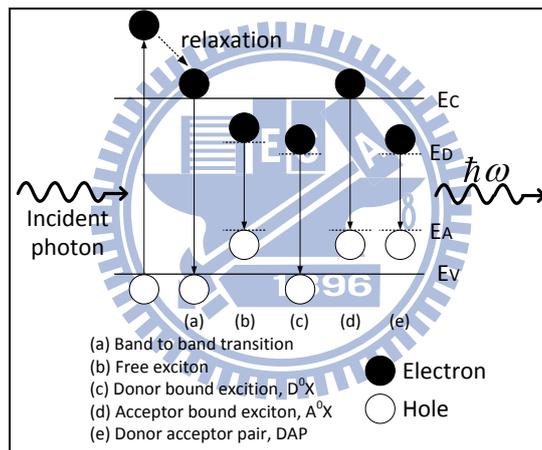


圖 4-2 半導體材料中相關 PL 輻射復合躍遷示意圖

(二) 非輻射躍遷(Non-radiative recombination)

一些可能會導致非輻射躍遷復合機制將和輻射復合躍遷競爭載子，且該非輻射復合對材料發光效率有極負面的影響，非輻射復合機制簡述如下：

- (1) 自由電子和電洞(e-h)受到熱振動所產生的聲子所散射或損失其動能。
- (2) 載子和缺陷(Defect)、差排(Dislocation)或者是結塊邊界(Grain boundary)

等表面能態經過 Step-wise 躍遷復合，會損失過剩能量，該過程也稱作 "Cascade process"。

- (3) 經由雜質復合作非輻射躍遷式的釋能。
- (4) 經由載子或晶格碰撞過程來釋能。

4-2 霍爾量測基本原理

在導體上外加一垂直於電流方向的磁場會產生一方向垂直於電流和磁場的電場，若考慮一 P 型半導體如圖 4-3 所示，電流 I 沿著 +X 軸方向，亦即電子由右往左邊方向流動，而電洞則是由左往右邊方向流動，外加磁場 B 沿著 +Z 軸方向，因此，電流大小如式 4-7 所示。

$$I = qApv_x = qwdpv_x \quad (4-7)$$

其中 p 為電洞濃度，而延著 X 軸方向的電壓大小 V_p 如式 4-8 所示。

$$V_p = \frac{\rho s I}{wd} \quad (4-8)$$

由式 4-7 與式 4-8 可將電阻 ρ 如式 4-9 表示；

$$\rho = \frac{wd V_p}{s I} \quad (4-9)$$

現在考慮電洞在一均勻磁場 B 中運動，作用在電洞上的電力與磁力如式 4-10 所示：

$$F = q(\varepsilon + V \times B) \quad (4-10)$$

該電力與磁力會使一些電洞在樣品底部被偵測到，如圖 4-3。若討論 N 型半導體，電子則會在樣品底部會被偵測到，不過電流方向仍和圖 4-3 的電流方向一致，由於電子是帶負電及電子流的方向和電流相反。

回到 P 型半導體的討論，由於電洞累積在底部表面，所以對電洞而言，Y 軸方向所受合力為零，使得在 Y 方向上沒有電流產生，因此 $F = 0$ ，可將 Y 軸方向電場如式 4-11 所示：

$$\varepsilon_y = Bv_x = \frac{BI}{qwdp} \quad (4-11)$$

因此 Y 軸方向電場所產生的霍爾電壓可表示如下式(4-12)

$$\int_0^{V_H} dV = V_H = -\int_w^0 \varepsilon_y dy = -\int_w^0 \frac{BI}{qwdp} dy = \frac{BI}{qdp} \quad (4-12)$$

霍爾係數(R_H)定義如式(4-13)所示：

$$R_H = \frac{dV_H}{BI} \quad (4-13)$$

根據式(4-11)、(4-12)和(4-13)可推得電洞濃度 p 如式(4-14)表示：

$$p = \frac{1}{qR_H} \quad (4-14)$$

而電流 I 若用電流密度 J 表示，可以表示如下式(4-15)：

$$J = qp\mu_p \varepsilon \quad (4-15)$$

其中 μ_p 是電洞遷移率(hole mobility)，而式(4-15)可以替換成下式(4-16)：

$$\frac{I}{wd} = \frac{qp\mu_p \varepsilon}{s} \quad (4-16)$$

最後可再得到 μ_p 如下式(4-17)：

$$\mu_p = \frac{Is}{qpV_p wd} \quad (4-17)$$

同樣地，若是討論 N 型半導體，可以得到電子濃度 n 以及電子遷移率 μ_n 表示如下式(4-18)和式(4-19)：

$$n = -\frac{1}{qR_H} \quad (4-18)$$

$$\mu_n = \frac{Is}{qnV_p wd} \quad (4-19)$$

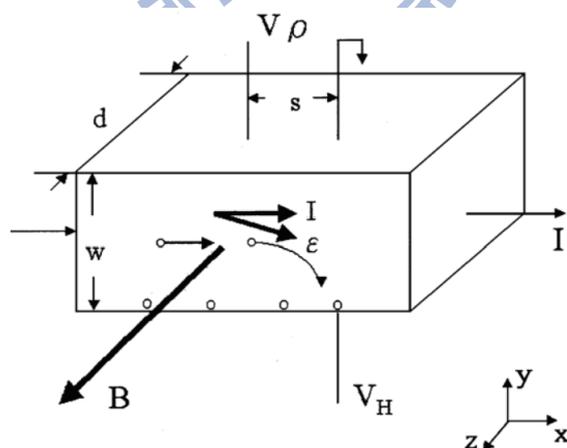


圖 4-3 霍爾效應示意圖

第五章 實驗方法

5-1 樣品製備程序

為比較WK2008改良式NH₃預熱機制(Thermal pre-cracking Metal organic chemical vapor deposition, TP-MOCVD) 與傳統式MOCVD(Conventional MOCVD)對於低溫Ga₂N磊晶機制的差異，我們在不同磊晶溫度下(固定其他參數,如流量、壓力等)，皆在相同的反應腔體裡，利用TP-MOCVD和Conventional MOCVD系統成長Ga₂N以供對照。本實驗中分別利用NH₃，III族有機金屬分子三甲基鎵(Trimethylgallium, TMGa)作為N，Ga來源，其中III族有機金屬分子恆溫槽儲存溫度為5°C，飽和蒸汽壓為88.6mbar；並以烏采結構氧化鋁(α -Al₂O₃)C軸(0001)面做為基板沉積面，載流氣體為5N級高純度氮氣，總載流氣體量為10SLM，成長壓力皆訂為200mbar。相同地，無論是TP-MOCVD或者為Conventional MOCVD成長，我們皆利用兩階段成長法(Two-step method)先在氧化鋁基板上沉積低溫(530°C)Ga₂N成核層(Nucleation layer)，厚度約為22nm(Nominal)，後續在氮氣環境下於1180°C退火4分鐘後，降溫至650~950°C(本次實驗低溫Ga₂N成長溫度)，以50°C作為間隔，和1130°C(典型高溫Ga₂N成長溫度)作為傳統MOCVD成長的對照組；而TP-MOCVD則在相對應的成長溫度(650~950°C、1130°C)下，開啟上加熱系統(高於相對應之成長溫度)，做為實驗組。

圖 5-1 為 Ga₂N 成長樣品結構圖，圖 5-2 為實驗過程 III、V 族流量和溫度變化曲線圖，在 TP-MOCVD 和 Conventional MOCVD 系統中，NH₃ 使用流量皆固定為 4.8SLM。表 5-1 為 TP-MOCVD 系統在不同成長溫度條件下的上加溫系統操作溫度(Cracking temperature, T_c)。樣品分析首先使用光激螢光光譜檢測低溫下(14K)不同成長溫度的載子複合發光行為，之後由室溫霍爾量測討論不同成長溫度對載子濃度、電子遷移率等電性行為影響。

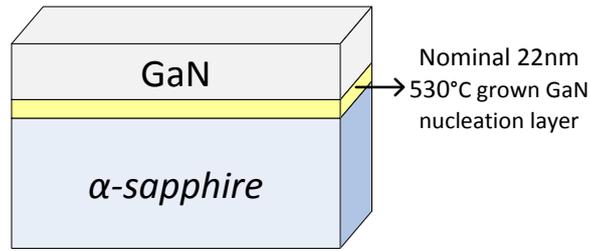


圖5-1 GaN樣品結構圖

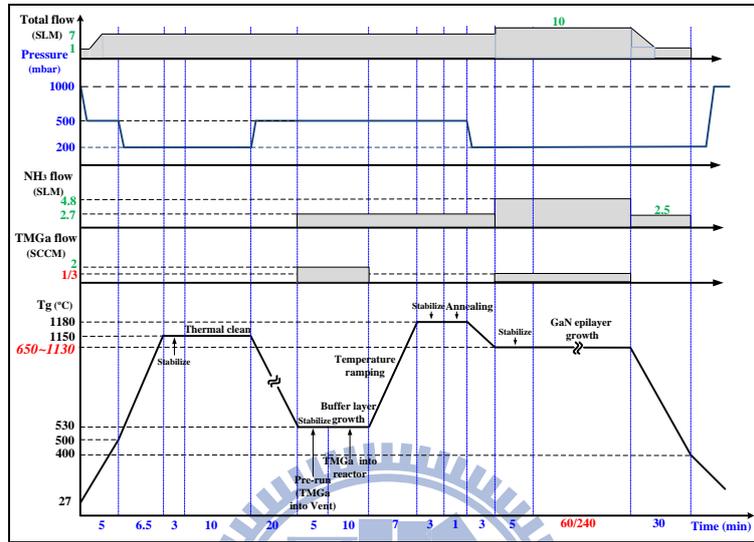


圖5-2 TP-MOCVD系統GaN成長過程III、V族流量和溫度變化曲線圖

(註:GaN成長時TMGa使用流量:TP-MOCVD:1sccm,V/III=36400; Conv. MOCVD: 3sccm, V/III=12000)

TP-MOCVD系統上下加溫系統溫度設定表							
Growth temperature, T_g (°C)							
650	700	750	800	850	900	950	1130
Cracking temperature, T_c (°C)							
900	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010

表5-1 TP-MOCVD系統上下加溫系統溫度設定表

5-2 光激螢光量測系統配置

本實驗所使用的光激螢光系統(Macro Photoluminescence, PL)是使用拉曼實驗室裡可見光部分的光激螢光系統，硬體配置如圖 5-3 所示，激發雷射光源為波長為 325nm 的氦鎘雷射(He-Cd Laser, Kimmon IK552R-F)，雷射功率密度約 $35 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ，雷射光射出後會經過反射鏡，再經過可調式衰減片，該衰減片可調整雷射功率密度，本實驗使用的雷射強度為 $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ，雷射光通過衰減片後，光路即穿過焦距為 15cm 的聚焦透鏡將雷射光聚焦

到樣品表面，此聚焦光點的直徑約為 0.5mm。樣品受雷射光所產生的光激螢光光子，通過焦距為 30cm 的聚焦透鏡，再通過長波長通過的濾光片 (Long-pass filter)，此目的為避免接收到雷射光源的散色光(波長 325nm 的光會被濾除)。接下來光會通過光柵後進入單色光儀(Monochromator)來進行分光，光柵寬度為 100 μ m-100 μ m，譜線解析度為 0.1nm；經過分光通過單色光儀的光會進入光電倍增管(photomultiplier tube, PMT, Hamamatsu R955)來放大訊號，PMT 使用偏壓為-1900V，並將光訊號傳到光子計數器中(photon-counter)，最後經由電腦處理成為螢光光譜圖。

本實驗之低溫光激螢光，所採用的降溫方式為液態氦氣封閉循環式低溫系統(Closed-cycle helium flow cryostat)，須先使用抽真空機將樣品環境壓力降至 4mtorr 以下，開啟外循環水系統，之後開啟壓縮機(Compressor)將樣品降低溫，此套系統適用溫度為 11K 到 300K。

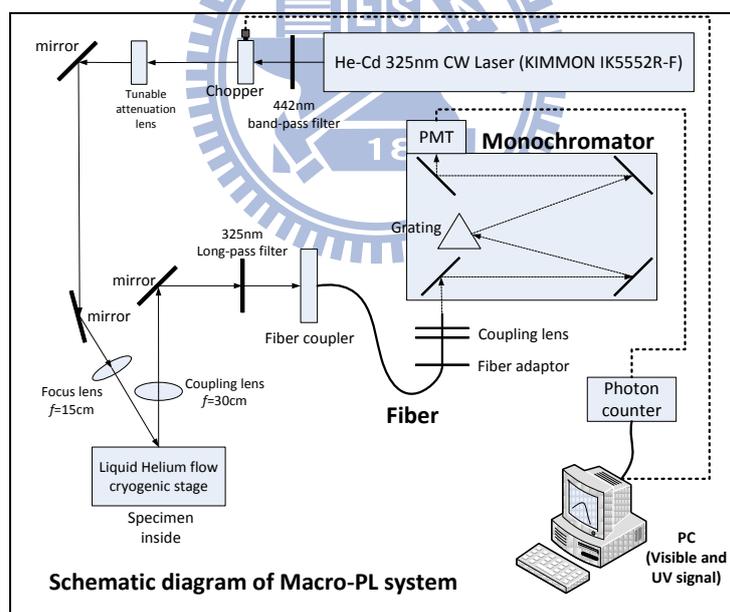


圖 5-3 光激螢光系統(PL)配置簡圖

第六章 結果與討論

6-1 實驗結果--低溫 PL

圖 6-1 為 WK2008 TP-MOCVD 系統與 Conventional MOCVD 系統在不同成長溫度(650~1130°C)的低溫(13K)光激螢光(PL)譜線圖，強度皆已正規化(Normalization)以供波形分布比較，其中近能帶邊緣發光峰值為 3.47eV(I_2 emission)，在 TP-MOCVD 樣品成長溫度介於 700~950°C 和 Conventional MOCVD 樣品成長溫度介於 850~950°C，峰值(3.47eV)半高寬皆小於 **30**meV。相較於先前研究成長溫度需高於 900°C 以上才可獲得如此光性的 GaN 低溫成長(如圖 3-2)，藉由 TP-MOCVD 系統 GaN 磊晶成長溫度相較於 Conventional MOCVD 系統而言可在降低 150~200°C，這對於一般藍綠光 InGaN/GaN MQWs 成長溫度 680~800°C 而言，可望減緩 In 原子脫附、界面交互擴散等問題。

此外，由圖 6-1 中可明顯地比較出在成長溫度低於 850°C 的情況下，TP-MOCVD 相較於 Conventional MOCVD 系統仍存在近能帶邊緣發光(I_2)，且仍保有相當的 PL 強度而未因降低成長溫度而衰減；反觀 Conventional MOCVD 系統，在成長溫度低於 850°C 時，譜線已由與雜質或本質缺陷相關的 2.25eV 黃光(Yellow band, YB)[47-48]所主導，在低能量範圍譜線形成寬廣的高斯分布；而 Conventional MOCVD 系統在成長溫度低於 700°C 以下甚至無螢光訊號。Conventional MOCVD 系統 GaN(Undoped)低成長溫度 PL 黃光訊號主導現象普遍在典型低操作溫度的 MOCVD 系統中發現 [38-41]，下文針對一般黃光可能來源提出解釋。

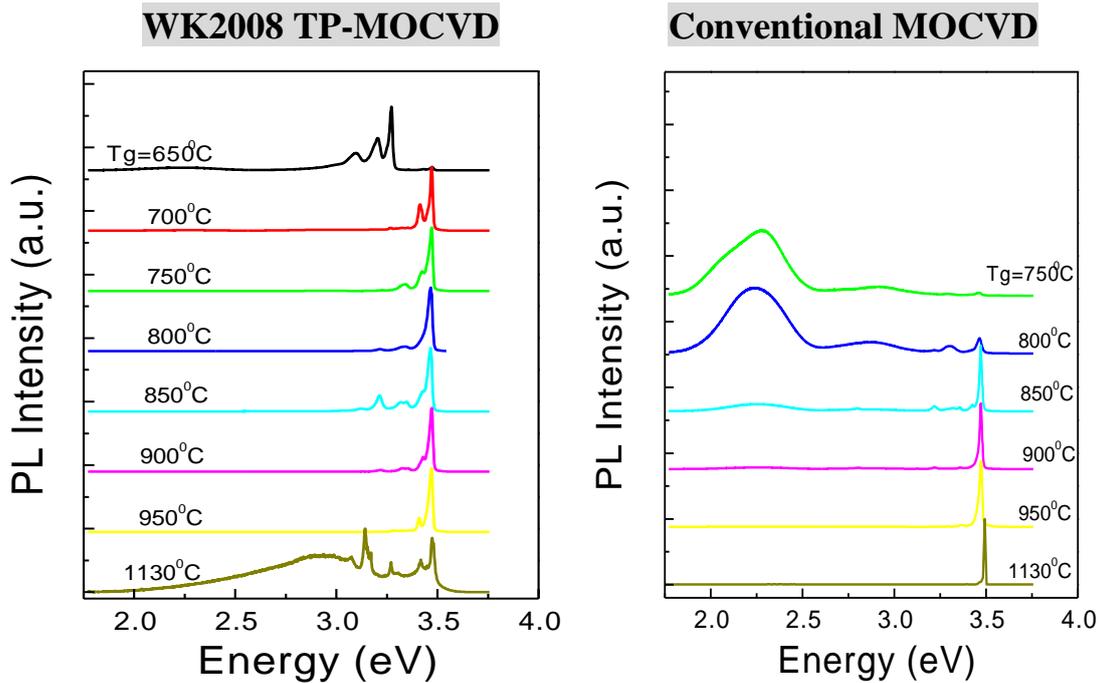


圖 6-1 TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統成長溫度(650~1130°C)的 GaN13K PL 正規化譜線

【GaN 黃光(550nm)形成機制(Yellow band)】

一般文獻中所描述的黃光訊號(YB)無論使用何種長晶法，如MBE、MOCVD、HVPE等皆存在[49-50]，其連續能量分布範圍介於2.2~2.6eV，峰值多半位於2.2~2.3eV，且主要在n型或未摻雜的GaN中發現[4,51]，一般認為YB為GaN自然缺陷特徵(Nature characterization)。

許多研究將YB歸因於延伸缺陷和本質點缺陷(Point defects, Ga vacancy)所形成的復合物(Complexes of extended defects)或者是雜質(Carbon)所造成。此外，離子化雜質或其他本質缺陷亦有可能在GaN中形成各式淺層或深層能階[52, and reference therein]。

由於未摻雜的GaN載子濃度一般約為 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，偏向n型材料；Chris G. Van de Walle[51]團隊經由理論計算獲得本質點缺陷鎵空缺(Gallium vacancy, V_{Ga})形成能量(Formation energy)隨著費米能階提高(n型載子增多)而降低，且在所有GaN本質缺陷中，形成能量最低[Fig.2 of Ref.4]。因此推論 V_{Ga} 所形成的深層受子能階(Deep acceptor level)最有可能為YB來源，且在Ref.52中提出， V_{Ga} 能階位於價電帶頂端約860/870meV附近

($E_{v(top)}+0.86/0.87\text{eV}$)，YB即可能為淺層雜質施子能階(Shallow donor level)如 C_{Ga} (Carbon on Ga site)或 Si_{Ga} (Si on Ga site)、 O_N (Oxygen on N site)等雜質缺陷{能階分布範圍在導電帶底部下方約 $0.2\sim 0.24\text{eV}$ 附近， $E_{c(bottom)}-(0.2\sim 0.24\text{eV})$ }與 V_{Ga} 因庫倫力作用復合發光所得($V_{Ga}-Si_{Ga} : 0.9\text{eV}$ ； $V_{Ga}-O_N : 1.1\text{eV}$)[51,53]，如圖6-2所示；而在[54-55]中也提及YB可能為 V_{Ga} (Deep acceptor)與 C_{Ga} (Shallow donor)所形成的施子與受子對(Donor-acceptor pair, DAP)復合所得。

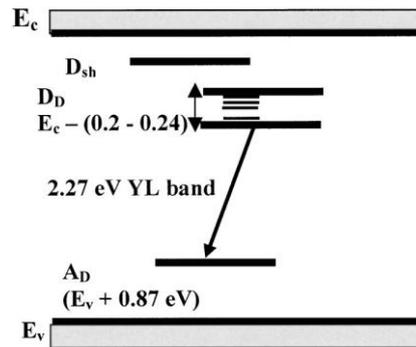


圖6-2 GaN可能的黃光(Yellow Luminescence, YL)能階位置
資料來源：Fig. 7 of Reference 52

此外亦有文獻利用陰極射線激發光實驗(Cathodoluminescence, CL)指出，YB與低邊界角度的結構缺陷(Dislocation at low angle grain boundaries)分布有關[49]；E. F. Schubert[56]團隊亦直接指出YB發光強度與n型摻雜濃度呈現線性正相關，間接證實隨著費米能階(E_F)提高 V_{Ga} 形成能量下降趨勢。

根據上述論點，可推論在Conventional MOCVD系統成長溫度低於 850°C 的樣品中，低溫PL譜線轉由 2.2eV 黃光訊號所主導的可能原因為在相對低溫的成長環境下，GaN磊晶層因延伸缺陷(Extended Defects)增加或由圖3-1中在低溫環境($T_g < 800^\circ\text{C}$)Ga原子脫附現象轉趨明顯間接導致鎵空缺(V_{Ga})濃度增加等因素，導致發光譜線由近能帶邊緣發光(NBE)轉由與缺陷、雜質相關的YB所主導。

6-2 低溫 PL 譜線變化趨勢分析/譜線定義

圖 6-3(a)~(d)為 TP-MOCVD 和 Conventional MOCVD TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統 13K PL 低溫量測，譜線近能帶邊緣發光(Near band edge emission, NBE, $\lambda \sim 357.2\text{nm}$)強度(a)、NBE 半高寬(FWHM)(b)、YB 積分強度(2.0~2.6eV)與整體譜線(Full spectrum)積分強度比值(c)、整體譜線積分強度(d)對不同基板溫度關係圖。NBE 峰值半高寬值為利用多譜峰 Lorentz 譜線擬和(Lorentz multi-peak fitting)所獲得。

由圖 6-3 分析可明顯發現，TP-MOCVD 系統在成長溫度低於 800°C 以下，無論是 NBE 的發光強度、峰值半高寬，與整體譜線發光積分強度皆明顯優於 Conventional MOCVD 系統。且相較於 Conventional MOCVD 系統在 800°C 以下黃光(YB)主導發光譜線現象，TP-MOCVD 系統黃光訊號積分強度與 NBE 比值皆低於 14%；可證實該低溫 GaN 樣品光學特性已足以媲美典型高溫成長 GaN 的薄膜品質{如圖 6-3(c)YB 之於整體發光譜線積分強度比值, Conventional MOCVD at 1130°C: 0.4%, TP-MOCVD at 900°C: 0.5%}。

由圖 6-3(d)呈現，TP-MOCVD 系統在成長溫度在 700~750°C 範圍整體譜線發光積分強度明顯提升，更再次證實 WK2008 磊晶系統複合式加溫系統設計能有效地在低操作溫度下增加活性氮原子濃度。

由圖 6-3(a)與(d)可得知，TP-MOCVD 系統 NBE 發光強度(a)和整體譜線積分強度(d)對基板操作溫度變化趨勢類似，在操作溫度介於 800~850°C 無論是發光強度與整體積分強度均明顯驟降，此行為詳細機制仍未清楚。觀察圖 6-1 TP-MOCVD 系統低溫 PL 譜線在 800~850°C 範圍，可明顯發現在 NBE 低能量附近(3.2~3.35eV)出現許多波包，發光強度隨著溫度降低而驟降可能與部分載子轉移至這些淺層能階發光有關。此外積分強度驟降可能與 GaN 缺陷濃度增加，載子受到缺陷捕捉產生非輻射復合機率增加相關。

然而 TP-MOCVD 系統設計精神主要著重於提升成長介面的 NH_3 裂解量，在相對低溫環境下增加反應物濃度。由於 MOCVD 系統中 GaN 結晶過程主要是由三甲基鎵(TMGa, $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$)與 NH_3 所裂解的 $(\text{N-H})_x$ 自由基

(Radicals)產生的連鎖反應(Chain reaction)[Fig.2 of Ref.57]，並非直接與 NH_3 產生反應，GaN 形成與 $[\text{Ga}(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2]_3$ 加合物(Adducts)有關；其過高或過低的環境溫度皆不利於有效產生 $(\text{N-H})_x$ radicals。此外，TP-MOCVD 系統複合加熱機制設計，使得 TP-MOCVD 系統整體環境等效溫度高於 Conventional MOCVD，如此高溫降低了反應腔體內介面溫度梯度，亦增加位於長晶界面在滯留層上方主氣流中的有效反應物濃度(即氣相分壓)，間接提升氣相環境中 $(\text{N-H})_x$ 與 TMGa 的副反應率，降低 GaN 成長效率及增加雜質濃度；也因此相對增加 TP-MOCVD 系統中腔體內分子反應過程複雜度。故 TP-MOCVD 系統究竟在何種環境溫度下最適合 GaN 成長，亦即提升滯留層內的有效反應效率仍需要許多參數測試和腔體流場與熱力分析才可獲知。

因此可推估 TP-MOCVD 系統在 NBE 發光強度和積分強度變化趨勢的不規則變化應該與其介面有效氣相反應機制有關。

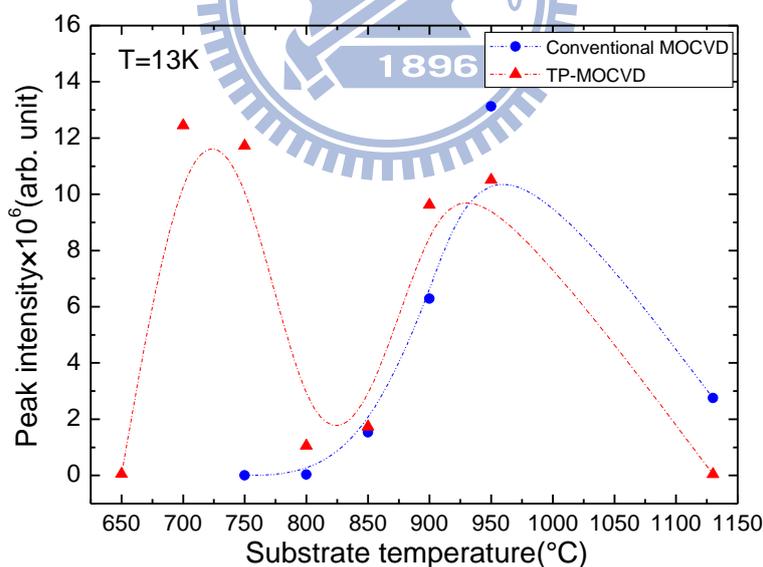


圖 6-3(a) TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統 13K PL 量測近能帶邊緣(NBE)譜線發光強度與基板溫度關係

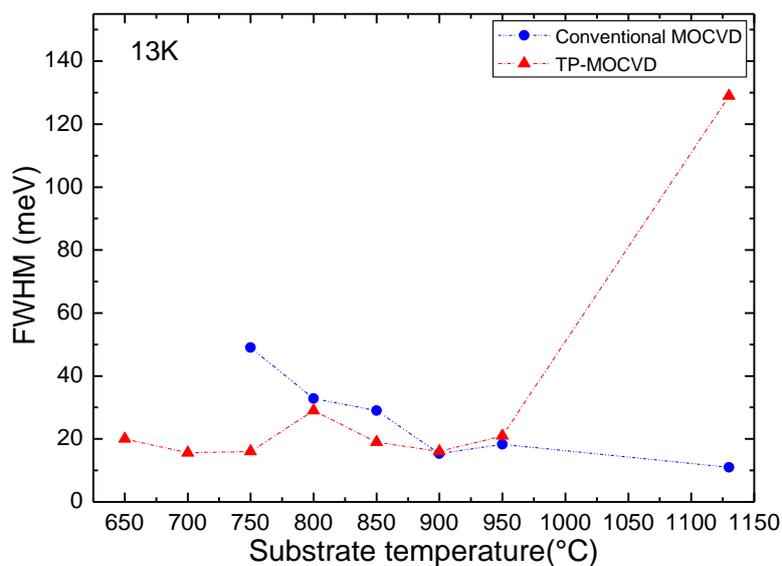


圖 6-3(b) TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統 13K PL 量測
近能帶邊緣譜線半高寬(FWHM)變化與基板溫度關係

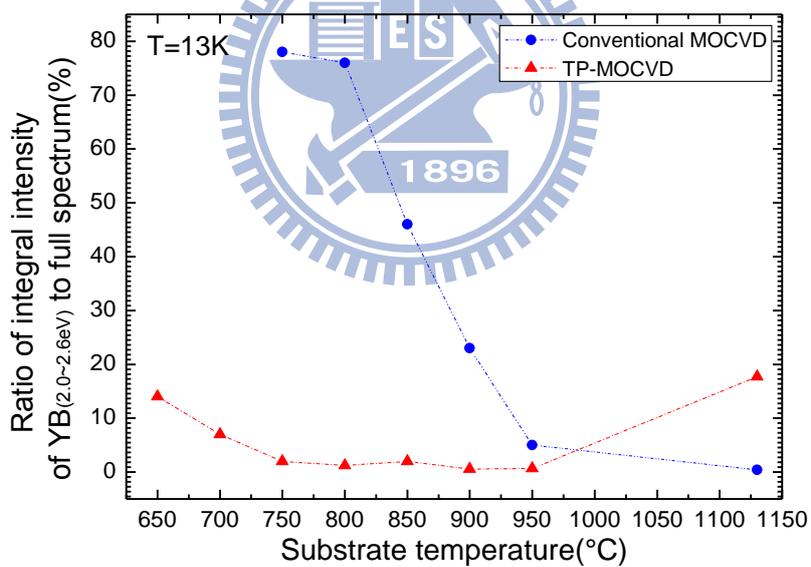


圖 6-3(c) TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統 13K PL 量測
YB(2.0~2.6eV)積分強度與整體譜線積分強度比值與基板溫度關係

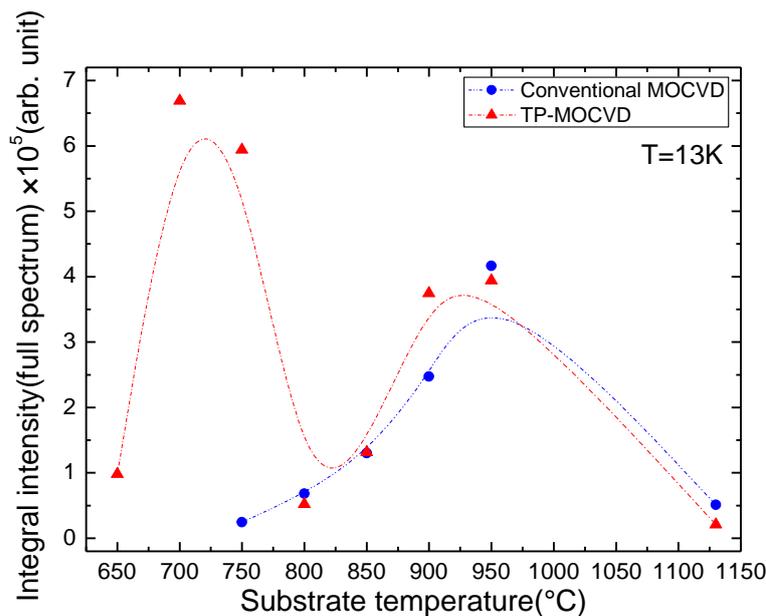


圖 6-3(d) TP-MOCVD 與 Conventional MOCVD 系統 13K PL 量測
整體譜線積分強度與基板溫度關係

【PL 發光譜線位置定義】

由圖 6-1 中可發現 TP-MOCVD 系統中其 PL 譜線除了較強的 NBE(3.47eV) 發光外，在低能量範圍仍存在著為數不少的峰值分布。在 1995~2005 年間，已有大量的文獻針對這些低能量峰值利用不同實驗來推測其產生的相關能階分布、復合機制[4 and reference therein]等；Reshchikov[4] 團隊更將 GaN 缺陷發光整理成 Review 論文發表。茲將 TP-MOCVD 系統中 GaN 低溫 PL 譜線峰值分布簡單說明於下文中。

在低溫光激螢光訊號(13K PL)中，近能帶邊緣(NBE)譜線峰值(3.47~3.48eV)，參考文獻[58]得知，該譜線為受束縛激子與中性施子之間躍遷發光(Bound exciton to neutral donor, D^0X)。在 TP-MOCVD 系統成長溫度介於 700~950°C 的譜線中，略低於 D^0X 譜線位置的低能量部分，即譜線能量範圍介於 3.2~3.469eV，其來源可能複雜，一般認為可能是受束縛激子與中性受子之間躍遷發光(Bound exciton to neutral acceptor, A^0X , 3.454~3.473eV)、中性或離子化施子與受子對發光(Neutral/Ionized Donor-acceptor pair(DAP), 3.154~3.3eV, Zero phonon line (shallow

DAP):3.25~3.27eV)[59]{其中 0 階聲子 DAP 發光峰值在 3.25~3.27eV,一般歸因於淺層施子(Si_{Ga} (Binding Energy:30meV) or O_{N} (Binding Energy:33meV))與淺層受子複合(Si_{N} or C_{N})發光, Shallow DAP, Carbon related acceptor binding energy~230meV}、 D^0X 、 A^0X 的 longitudinal optical phonon 複合(LO-Phonon replica, $\text{A}_0\text{X}^{\text{LO}}$, $\text{D}_0\text{X}^{\text{LO}}$, 3.36~3.39eV)[Ref.482 of Ref 4]、本質點缺陷(Native point defect)(束縛能約在 70~100meV)或雜質錯位所形成的深層或淺層施子能階(能階束縛能約在 18~35meV 不等)與自由電洞復合發光, 如氮空缺(N Vacancies, binding energy~70~100meV)、 O_{N} (Oxygen on N site)(Binding energy~33meV)、 C_{Ga} (Carbon on Ga site)、 Si_{Ga} (Si on Ga site)(Binding energy~30meV)等。

不過詳細譜線來源仍需解析度更高的單色光儀 PL 量測, 變溫 PL、拉曼散射(Raman scattering)等實驗來輔助定義之。

茲將參考 GaN 烏采結構(Wurtzite)[4,60-67]在低溫 PL 螢光光譜中能量位置在 3.0~3.5eV 之間的各项波峰來源統計整理於表 6-1。

Simple statistics of Wurtzite GaN multi intrinsic LT-PL emission peaks assignments(eV)								
FE(A)	FE(B)	FE(C)	D^0X	A^0X	FE-LO、 D^0X -LO、 A^0X -LO	FE-2LO、 D^0X -2LO 、 A^0X -2LO	DAP	DAP-phonon replica
3.477~	3.481~	3.493~	3.471~	3.454~	3.36~3.39	3.272~3.33	3.273~	*
3.484	3.505	3.528	3.493	3.467			3.154	

表 6-1 Wurtzite 結構 GaN 典型低溫 PL 譜線發光位置(3.0~3.5eV)及其來源整理

【Note】:

FE(A)、**FE(B)**、**FE(C)**: Free exciton A、B、C。

D^0X : Donor bound exciton.

A^0X : Acceptor bound exciton.

FE-LO、 **D^0X -LO**、 **A^0X -LO**: Free exciton、Donor bound exciton、Acceptor bound exciton-1st order optical LO-phonon replica.

FE-2LO、 **D^0X -2LO**、 **A^0X -2LO**: Free exciton、Donor bound exciton、Acceptor bound exciton-2nd order optical LO-phonon replica.

DAP: Donor-acceptor pair.

E_g (Band gap) of wurtzite GaN~3.504eV。

* Approx. 92.1~92.3meV lower than zero phonon line, from reference [60,68-70]。

表 6-2 為 GaN 立方結構(Cubic structure)各項典型低溫 PL 譜線發光位置(3.0~3.3eV)及其來源統計整理[4,71-74]。

Simple statistics of Cubic GaN multi intrinsic LT-PL emission peaks assignments(eV)					
E_g (Low temperature)/300K	FE	D ⁰ X	A ⁰ X	DAP	DAP-LO
3.304/3.21	3.272、 3.274	3.263、3.234	3.208	3.15、3.18、3.182、 3.159、3.178	3.064、3.09

表 6-2 Cubic 結構 GaN 典型低溫 PL 譜線發光位置(3.0~3.3eV)及其來源整理

【無法詳加定義的譜線】

在 850、900°C 成長樣品中，在低能量位置(3.1~3.35eV)仍有許多譜線分布，不過參考 H. Morkoç[4]團隊的 Review 論文及其所引用的論文針對幾項未詳加定義的譜線(Y₁~Y₇)，一般都歸因於受縛於內部結構缺陷(Dislocation)、本質缺陷(Native point defect)、表面結構缺陷等的所形成的侷限態(Confinement states)之激子復合(Exciton bound to dislocation/point defect/stacking fault/inversion domains...)，不過詳細發光機制與能帶、缺陷連結關係仍未明確。

6-3 650°C 成長樣品

【650°C 成長樣品 PL 譜線紅移】

如圖 6-1 中譜線變化所示，在 TP-MOCVD 中最低 GaN 成長溫度(650°C)所得的 PL 譜線可發現峰值位置在 3.48eV 附近的近能帶邊緣發光比例極小，而轉由發光能量較低的峰值範圍位於 3.09~3.27eV 的譜線所主導。以下將參考其他文獻論述來提出 650°C 成長樣品 PL 譜線紅移的可能原因。

圖 6-4 為 TP-MOCVD 系統 650°C 成長樣品的 13K PL 譜線，其主導發光的 3 個峰值位置分別為 3.27、3.20、3.09eV。且在 GaN Wurtzite 結構的近能帶邊緣(NBE, 3.471eV)附近存在微弱發光訊號。參考表 6-1 和 6-2 的譜線整理中，可大致推估這 3 個主導峰值應與形成 GaN Cubic 結構有關。其中

PL 發光強度最強的 3.27eV 峰值，有可能為 Cubic 結構中受縛施子與自由電洞復合發光(D^0, h 3.26-3.27eV)[71]，峰值位置於 3.20eV 的譜線應與自由電子與受縛受子復合(A^0, e , 3.208eV)或淺層 DAP(DAP: 3.16~3.18eV)發光相關 [71]；而能量位置於 3.09eV 的譜線應與 DAP 的 LO 聲子作用復合發光有關。

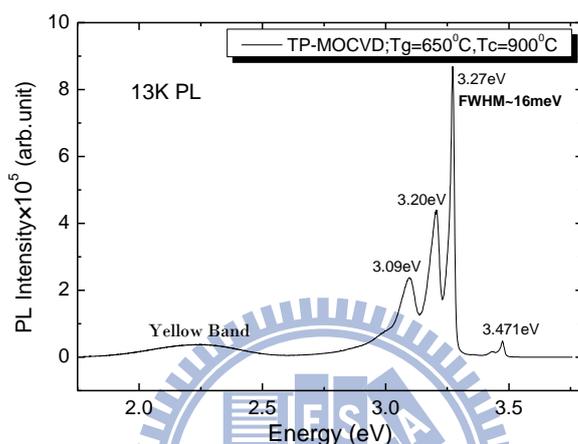


圖 6-4 TP-MOCVD 系統 GaN 650°C 成長樣品 13K PL 譜線

有文獻指出在 GaN 成長溫度變化中，高溫環境易於合成烏采晶格結構 (Hexagonal polytype)，而在相對低溫環境下則傾向形成亞穩態 (Metastable phase) 的閃辛礦結構 (Cubic, zinc-blende)；J.Ou[75] 在其博士論文中提及相轉變 (Phase transition) 溫度約為 750°C。X. H. Wu[76] 團隊於 GaN 低溫緩衝層 (LT-Buffer layer) 的研究中也指出，低溫環境下所形成的 GaN 成核點 (Nuclei) 傾向於 Cubic 結構，這些研究皆指出 MOCVD 系統低溫環境所成長的 GaN 易傾向於合成 Cubic 結構 (Cubic phase inclusion in hexagonal phase)。

參考 T. Kurobe 團隊[77] 利用 MOMBE 成長的 GaN 低溫 (16K) PL 光譜譜線圖 (如圖 6-5)，650°C 成長樣品的低溫 PL 紅移現象極有可能為 GaN 晶格由 h -GaN 轉由 c -GaN 結構的相轉變所引發。

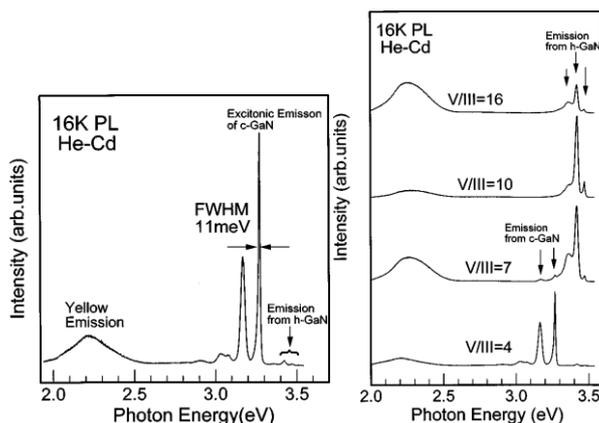
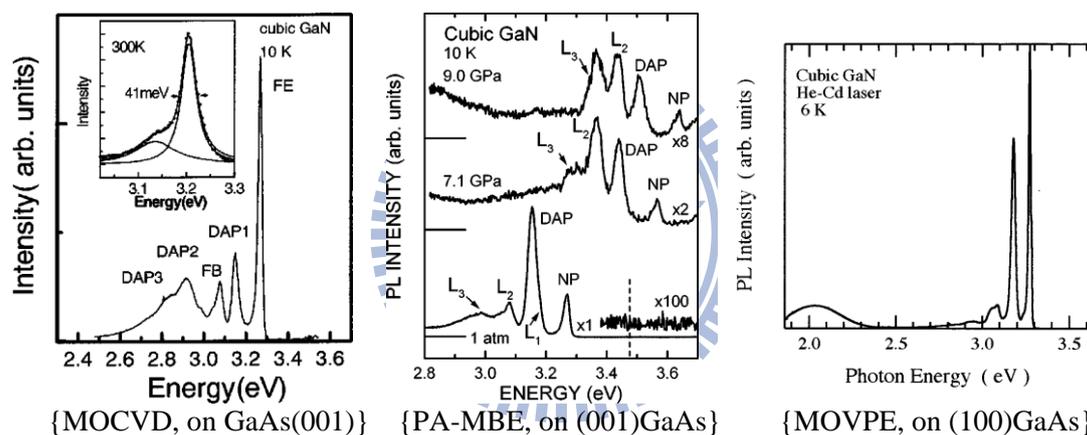


圖 6-5 GaN 低溫(16K)PL 光譜譜線圖(MOMBE, on α -sapphire)

資料來源：Reference 77

此外，參考 REF[86, 72-73] 等 Cubic 結構 GaN 低溫 PL 譜線形狀(Line shape) 與 650°C 成長樣品 PL 譜線類似(圖 6-4)；應可間接證實 650°C 成長樣品趨於 Cubic 結構(Cubic phase inclusion)的推論合理性。



{MOCVD, on GaAs(001)} {PA-MBE, on (001)GaAs} {MOVPE, on (100)GaAs}

圖 6-6 各團隊 c-GaN 低溫(16K)PL 光譜譜線圖比較

參考來源：Reference 86, 72-73

不過由於沒有明顯發現 Cubic 結構中 3.15~3.18eV 附近的 DAP 發光[71]，650°C 成長樣品是否為全然為 Cubic 與 Hexagonal 結構混和相仍需藉由拉曼散射、X-Ray 晶格繞射(XRD)等實驗來輔助佐證之。

TP-MOCVD 系統所成長的樣品中，成長溫度為 700°C 樣品譜線裡明顯出現 3.413eV 峰值發光訊號，如圖 6-9。K.W. Mah 團隊[69]提出該譜線峰值可能為受縛在 Cubic/hexagonal 混和晶相所產生的延伸缺陷復合發光。

上述 3.413~3.42eV 有研究指出可能是與氧有關的雜質(Oxygen impurity)所形成的淺層施子能階(Shallow donor level, binding energy~78meV)與自由電洞復合[72]、h-GaN 微結構中載子束縛在堆疊錯位(Stacking fault)[53]、

α -Al₂O₃ 與 GaN 介面結構缺陷[79]、激子受縛於結構缺陷如電中性的螺旋缺陷(Screw dislocation)[49]因其庫倫力和壓電場作用復合等原因所致。

再者，位於低能量範圍(2.99~3.10eV)的譜線來源仍不明確，可能為 Cubic 結構中 DAP 的 LO-Phonon 散射發光(LO_{DA}, 3.06~3.09eV)[73]，或者為與雜質、結構缺陷相關的發光。GaN 650°C 成長樣品相較於其他 GaN 高溫成長樣品，已有較明顯的與結構缺陷(Stacking mismatch boundaries)相關之黃光訊號(YB)分布(2.2~2.5eV)，可間接推測在該成長溫度下，上方加溫系統溫度(T_c)上限僅能設定為 900°C，在上下溫度差異不大的情況下，活性 N 原子的供應可能略顯不足，造成非故意摻雜(Unintentional doped)的額外雜質混入效應明顯，如石英晶舟(Silicon liner)所析出的微量 Si 原子、甲基(CH₃ radicals)或石墨載台(Graphite susceptor)分解所產生的 C 原子、微量水氣產生的 O 原子、H 原子；微量金屬 Be、Mg、Zn、Ca、Ge 等。

此外，鎵空缺(V_{Ga})在活性氮原子供應不足的情形下較易於形成，這些因素皆有可能造成自由電子由這些雜質或本質缺陷所形成的淺層或深層能階所捕捉進而轉由低能量峰值所主導。此外，在 S. Oktyabrsky[80]研究中亦指出，GaN Cubic 結構易在 N 供應不足(Nitrogen-Deficient, low V/III ratio)的情形下形成，因此低溫環境下 NH₃ 裂解不足應間接影響了 650°C 成長樣品譜線紅移現象。

【650°C 成長樣品 XRD 結果】

圖 6-7(a)-(b) 個別為 TP-MOCVD 系統 650°C(a)GaN 成長樣品和 Conventional MOCVD 系統 1130°C(b)GaN 成長樣品的 $\theta/2\theta$ XRD 繞射譜線對照。成長溫度為 1130°C 的 GaN XRD 繞射譜圖中呈現明顯的烏采結構(0002)面(Hexagonal GaN)繞射波峰，峰值角度分為 34.52°和 34.6°，為 XRD 銅靶激發光源 K _{α 1}、K _{α 2} 特徵光譜繞射峰，與典型烏采結構繞射角度相吻合，且峰值半寬值皆低於 245 arcsec。其 XRD 結果與低溫 PL 譜線全由

NBE(3.47eV, FWHM~10meV)主導一致，顯示高品質的 GaN 單相烏采結構 (Single hexagonal phase)適合在高溫環境(>1000°C)下形成。而 650°C 成長的 GaN 在 XRD 繞射譜線中並未發現明顯的(Cubic/hexagonal)混和晶相所呈現的多包(Multi-peak)繞射峰值，如[77]文獻中 XRD 繞射圖形所示。因此可初步推論 650°C GaN 成長樣品並非上文所述的 Cubic 而應為 Hexagonal 結構；雖然低溫 PL 譜線類似 cubic 結構發光。

分析圖 6-4 中 650°C 成長 GaN 低溫 PL 譜線峰值可發現該 3 個峰值幾乎是等間隔分布(Sequential peak separation: 70~90meV)。不少文獻[63,68-69]皆指出 GaN Hexagonal 結構 DAP(3.26~3.27eV)的 Phonon replicas 能量間格為(90~92meV)，若將譜線中 3 個峰值指為 *h*-GaN DAP(3.27eV)和 DAP phonon replica(3.178、3.086eV)發光，顯然在 650°C 成長的 GaN 勢必存在大量淺層載子能階主宰發光機制，不過這仍需要更詳細的實驗如 DLTS、SEM-EDX 等來佐證能階位置，材料元素組成等。

由圖 6-7(a)中 650°C GaN 成長樣品的峰值半高寬約 670arcsec，約大於標準 Hexagonal GaN 角度半寬值的 3 倍。所以 650°C GaN 成長樣品應混雜更多的晶面結構，由於在此低溫環境下 Ga 原子因動能較低而造成在晶面上遷移擴散能力(Ga migration)不足，易造成晶格排列上出現多晶(Poly)或非晶質(Amorphous)結構，早期有不少低溫 GaN 成核層(Nucleation layer)的研究中也指出[76,81-82]，低溫環境(500~600°C)下所成長的 GaN 易形成多晶或非晶質結構，亦或形成 Cubic/Hexagonal 混和晶相結構等。此外，有研究指出利用低掠角入射 X-ray 繞射(grazing incidence x-ray diffraction(GIXD))實驗來判斷 GaN 薄膜中 *c*-GaN{(111)面}和 *h*-GaN{(0002)面}的成分比例 [75,83]，因此除了初步的 $\theta/2\theta$ XRD 繞射結果外，仍需要更進一步的實驗如變溫 PL、拉曼散射、GIXD 等實驗來詳細分析 650°C GaN 成長樣品的結晶特性和其 PL 光譜紅移轉由 3.27eV 譜線主導的確切原因。

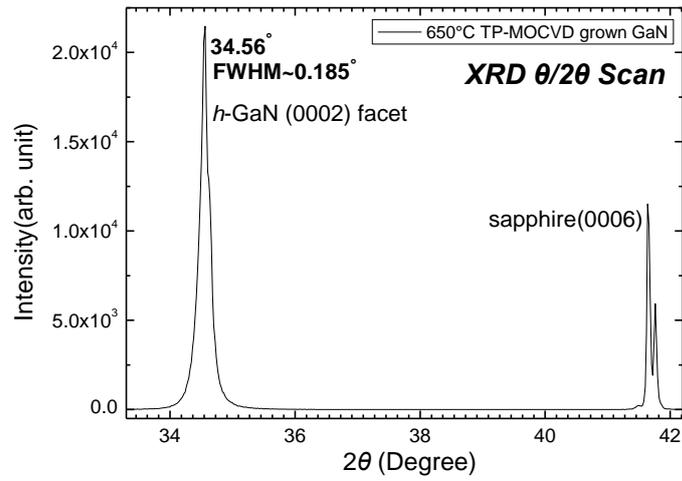


圖 6-7(a) TP-MOCVD 系統 GaN 650°C 成長溫度 $\theta/2\theta$ XRD 繞射譜線

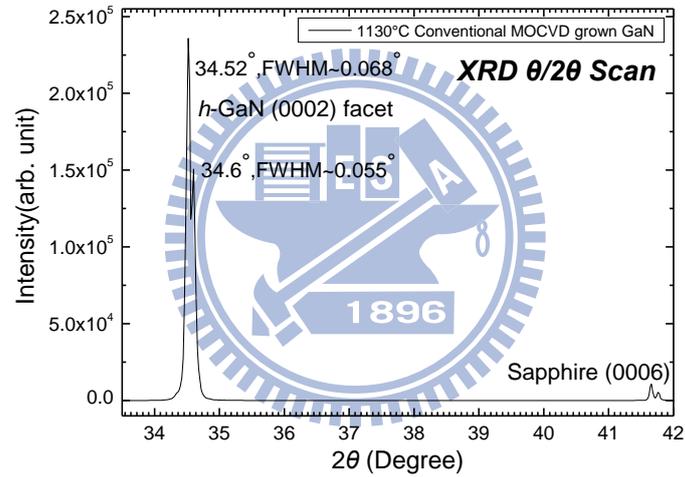


圖 6-7(b) Conventional MOCVD 系統 GaN 1130°C 成長溫度 $\theta/2\theta$ XRD 繞射譜線

【TP-MOCVD 1130°C GaN 成長樣品 PL 光學品質變差推測原因】

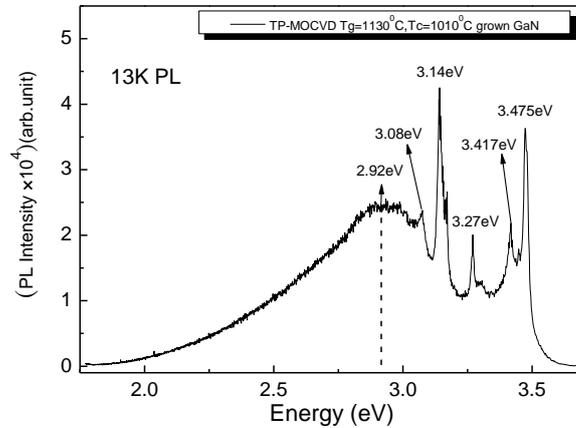


圖 6-8 TP-MOCVD GaN 1130°C 成長 13K PL 譜線

圖 6-8 為 TP-MOCVD 系統 GaN 成長溫度為 1130°C 的 13K PL 譜線，當成長溫度提升至 1130°C 時，其 PL 譜線光學品質大幅下降，譜線在 2.0~3.5eV 呈現連續分布(Broad band)。PL 譜線背景為峰值能量在 2.92eV 的寬廣高斯分布，其中包含數個波峰能量位置如圖 6-8 所示。

由於 GaN 晶格結構於 830°C 即開始發生分解現象[1]，愈高溫其脫附現象愈趨明顯。其中譜線品質變差原因應可推論為在如此高的環境溫度下，Ga 和 N 熱脫附現象(Thermal desorption)轉趨劇烈，晶格中出現大量鎵缺陷(V_{Ga})或氮缺陷(V_N)等本質空缺，本質缺陷密度提升造成光學品質下降。此外，高溫環境下氣體分子反應複雜且氣相副反應機率提升(Complex radicals reaction, Adducts formation, Pyrolysis of precursors and adducts)，高溫環境導致滯留層因氣體黏滯係數(Viscosity)提升而增加，明顯提升各式反應物於汽相環境中碰撞反應機率，且高溫環境副產物甲基分子分解產生的(C-H)_x 複合物濃度提升也可能造成 C、H 等雜質混入晶格明顯產生結構缺陷或雜質能階(C_N 、 C_{Ga} 、 C_I ...);相對的結構缺陷如堆疊錯位(Stacking faults, antisites)、裂縫(Intersitials)、Inversion domain boundaries...等也可能相對提升，這些效應應直接或間接造成其光學品質變差。

相同地，高溫環境可提升載子擴散能力(Carrier Diffusion)，相較於低溫環境易於造成晶格錯位(Antisite, Ga_N , N_{Ga} , Ga_I , N_I ...)等本質缺陷；且受缺陷能階束縛的激子(Bound exciton)也更易於躍遷。此外，石英晶舟內含微量雜質如 Be、Si、O、Ca...或石墨載體(C)等微量元素或腔體附著物(Coating)在高溫環境逸出明顯等；這些原因皆可能直接或間接導致光性變差。

【700°C 成長樣品 PL 光性】

圖 6-9 為 TP-MOCVD 所成長的仍保有近能帶邊緣發光的最低成長溫度(700°C)GaN 之 PL 譜圖，譜線中 3.47eV 為 D^0X (Donor bound exciton)發光，其峰值半高寬約為 17meV。在低能量範圍(3.41eV)如同上文推測可能為與氧雜質(Oxygen)有關的結構缺陷所致，而在低能量範圍約 3.27eV 的微弱波包可能為淺層 DAP 發光訊號。在如此低的成長溫度下 PL 發光強度和積分強度上已不遜於高溫成長(>1000°C)的 GaN 薄膜，且未在 2.2eV 附近發現 YB 訊號。就我們所知，這是 MOCVD 系統在 GaN 成長中仍保有近能帶邊緣發光(NBE)的最低成長溫度。

且如下文中表 6-3 所示，GaN 700°C 成長樣品其載子濃度(N_d)相較於其他溫度成長樣品相對偏低，其值為 $1.51 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ，已接近 10^{16}cm^{-3} 範圍，相較於文獻中提及未摻雜 GaN(Undoped GaN)其 n 型載子濃度範圍($10^{16} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$)來說，載子濃度相對偏低；因此 TP-MOCVD 系統除了能有效的在低溫環境下保有不錯光學品質外，還能有效降低載子濃度。因此該 TP-MOCVD 系統複合式加溫系統設計應可有效運用在 P-GaN 製作和 InGaN/GaN 多層量子井(MQWs)的 Barrier 成長中。

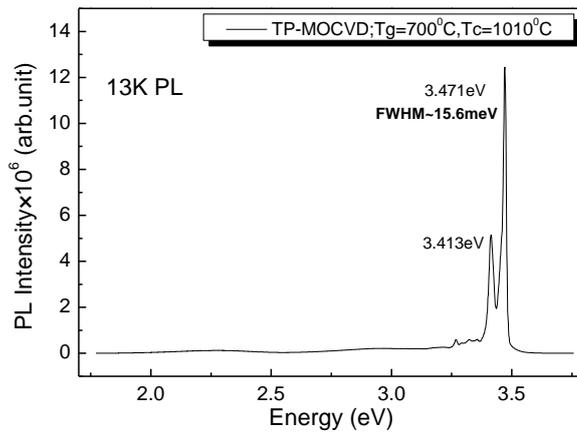


圖 6-9 GaN 利用 TP-MOCVD 系統於成長溫度 700°C 的 13K PL 譜圖

6-4 TP-MOCVD 系統成長 GaN 室溫霍爾量測結果

表 6-3 為 TP-MOCVD 系統成長樣品的室溫(300K)霍爾量測(Hall measurement)與低溫(13K)光激螢光光譜整理，圖 6-10(a)~(b)之載子遷移率(Mobility)、載子濃度(Carrier concentration)對成長溫度作圖。除了 650°C 成長樣品載子種類(Type)無法確定外，其餘皆為 n 型半導體；這與一般文獻上討論的未摻雜 GaN 為 n-type 半導體一致。此外由圖 6-10(b)可發現在 950~850°C 範圍，隨著成長溫度降低，載子濃度有增加趨勢，且遷移率也隨著濃度增加而降低。成長溫度低於 950°C 遷移率竟降了 1 個數量級，這可能與 PL 譜線半寬增加且在低能量位置出現無法詳加定義的波包相關，可推論在相對低成長溫度時雜質或缺陷明顯增加所造成。

溫度低於 850°C 的成長樣品載子濃度急遽下降於 750°C 有最小值 ($1.06 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)，其原因仍不清楚。參照圖 6-3(b)，發現低溫 PL 半高寬也在 800°C 附近轉折，推測可能與 PL 光性變佳有關；詳細原因仍需要另用 SEM、XRD 等量測實驗來進一步探討結構缺陷與 Hall 量測間的演變趨勢。

一般文獻中室溫霍爾量測電子遷移率約在數百 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [84]，目前室溫可得最高載子遷移率約為 $900 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，其電子濃度約為 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ [85]。

TP-MOCVD 系統所成長的低溫 GaN 其電子遷移率普遍不佳，最高僅 114

$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ；而整體載子濃度也略顯偏高，因此在電性上仍有極大改善空間。

Sample	Hall Effect			PL		
	Tg(°C)	Mobility (cm^2/Vs)	Concentration (cm^{-3})	Hall coefficient (cm^3/C)	Intensity (a.u.)	Energy (eV)	FWHM (meV)
650	※	※	※	8.69×10^5	3.27	11
700	10.47	1.51×10^{17}	56.70	1.24×10^7	3.47	13
750	7.35	1.06×10^{17}	15.90	1.17×10^7	3.47	27
800	0.58	4.47×10^{17}	52.54	1.05×10^6	3.47	28
850	1.47	4.68×10^{17}	9.71	1.80×10^6	3.47	27
900	16.54	3.80×10^{17}	15.83	9.62×10^6	3.47	22
950	114.20	2.79×10^{17}	34.64	1.05×10^7	3.47	22

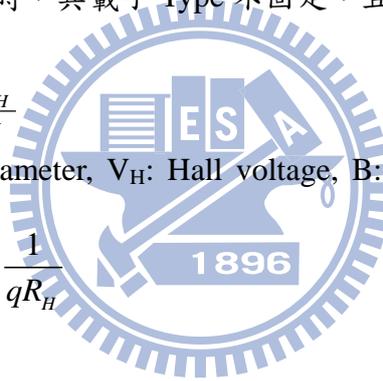
表 6-3 為 TP-MOCVD 系統成長 GaN 300K 霍爾量測與低光激螢光光譜整理

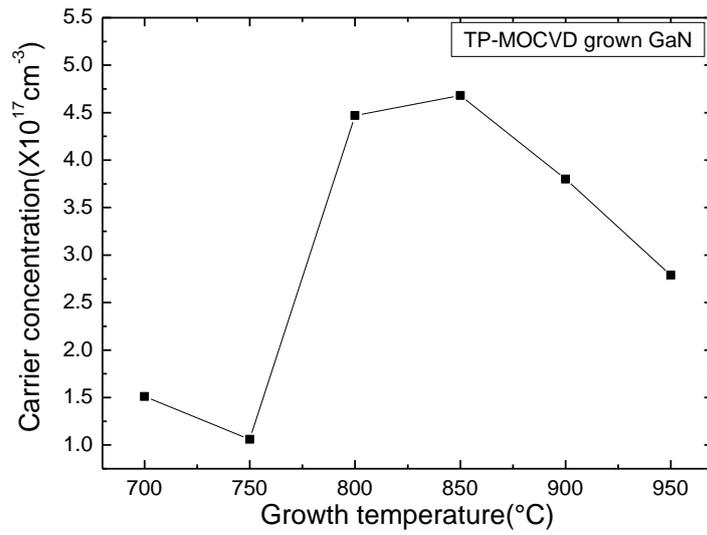
※650°C 樣品做霍爾量測時，其載子 Type 不固定，且電阻率過高(約 $10^5 \Omega\text{-cm}$)，故量測值不列入參考

$$\text{Hall coefficient : } R_H = \frac{dV_H}{BI}$$

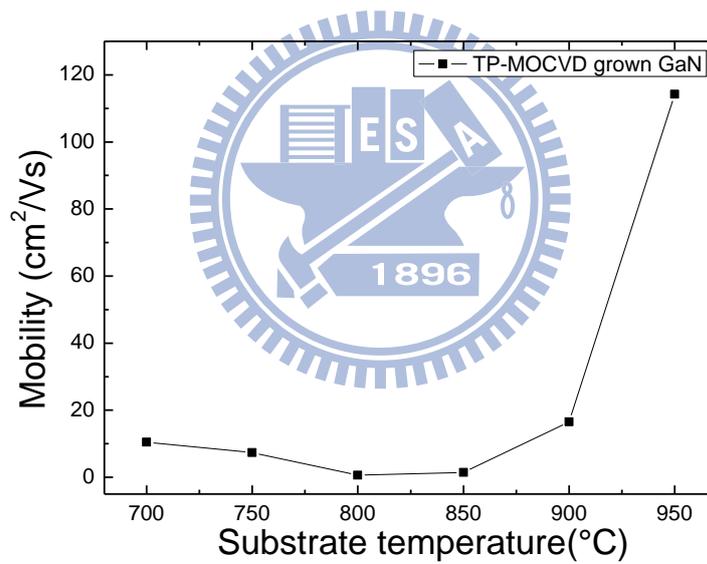
d: Sample cross section diameter, V_H : Hall voltage, B: Magnetic field, I: Injection current.

$$\text{Carrier concentration : } n = \frac{1}{qR_H}$$





(a)



(b)

圖 6-10 TP-MOCVD 系統 GaN n-型載子濃度(a)和遷移率(b)對其基板溫度關係圖

6-5 結論

本實驗利用自組式複合加溫 MOCVD 系統成長低溫氮化鎵(GaN)，援用 NH₃ 預熱概念，藉由獨立溫度控制機制提升成長環境溫度，使低溫 (Susceptor)環境下仍保有足夠的 NH₃ 裂解量(Cracking in gas phase)，有效在低溫環境下成長高品質的氮化鎵磊晶薄膜。由 TP-MOCVD 系統中 GaN 低溫 PL 光性與成長溫度的變化關係顯示，該系統可成功在低於 750°C 環境下成長出無論是近能帶邊緣(3.47eV)PL 峰值強度，亦或是整體譜線積分強度，均足以媲美典型 MOCVD 系統中高於 1000°C 所成長的 GaN 品質。WK2008 TP-MOCVD 系統所成長的仍保有近能帶邊緣發光的最低 GaN 成長溫度為 700°C，且在 13K PL 量測中並未發現與缺陷有關的黃光訊號(YL)。在該變化溫度系列樣品當中，TP-MOCVD 系統所成長 GaN 最低溫度為 650°C，其 PL 發光譜線轉由低能量(3.1~3.27eV)主導，且出現明顯 3 個近乎等間距(~90-100meV)的峰值訊號；經由初步 $\theta/2\theta$ XRD 繞射結果排除 GaN 閃辛礦結構，因此我們認為該 650°C 成長 GaN 其 PL 發光峰值應與淺層施子受子對(DAP)和其 Phonon replicas 行為有關。

再者，TP-MOCVD 系統中 GaN 成長溫度與其 PL 峰值、積分強度在溫度介於 800~850°C 均驟降其詳細物理原因仍不清楚，我們推估應該與 NH₃ 所分解的(N-H)_x radicals 濃度、發生於載流氣流中高溫副反應機率增加、雜質濃度增高、本質缺陷/結構缺陷等增加有關。不過詳細載子分布機制仍需藉由 DLTS 和 EDX 等實驗來佐證相關雜質能階位置分布濃度和介面元素含量分析等。

由先前低溫 GaN 成長利基描述可知，該低溫 GaN 成長技術可運用於 InGaN/GaN MQWs 結構中 GaN Barrier、Capping layer、p-GaN 等磊晶成長；相信在相對低溫環境能有效控制 MQWs 的發光波長、維持量子井能障的介面陡峭性，和減緩 In 原子界面(Barrier/Well)交互擴散行為等。

【參考文獻】

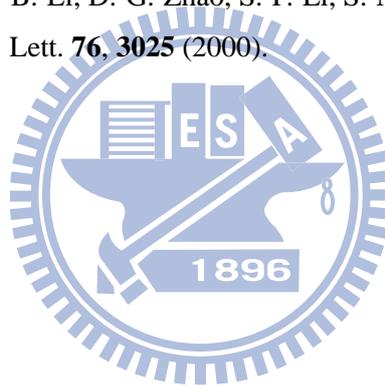
- [1]. D. D. Koleske, A. E. Wickenden, R. L. Henry, W. J. DeSisto, and R. J. Gorman, *J. Appl. Phys.* **84**, **1998**(1998).
- [2]. H. Morkoç, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burns, *J. Appl. Phys.* **76**, **1363** (1994).
- [3]. G. Y. Zhang, Y. Z. Tong, Z. J. Yang, S. X. Jin, J. Li, and Z. Z. Gan, *Appl. Phys. Lett.* **71**, **3376** (1997).
- [4]. Michael A. Reshchikov and Hadis Morkoç, *J. Appl. Phys.* **97**, **061301** (2005).
- [5]. J. Nelson, E. Jones, S. Myers, D. Follstaedt, H. Hjalmarson, J. Schirber, R. Schneider, J. Fouquet, V. Robbins, and K. Carey, *Phys. Rev. B* **53**, **15893–15901** (1996).
- [6]. I-hsiu Ho and G. B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* **69**, **2701** (1996).
- [7]. N. A. El-Masry, E. L. Piner, S. X. Liu, and S. M. Bedair, *Appl. Phys. Lett.* **72**, **40** (1998).
- [8]. Fabio Bernardini, Vincenzo Fiorentini and David Vanderbilt, *Phys. Rev. B* **56**, **R10024–R10027** (1997).
- [9]. S. F. Chichibu, A. C. Abare, M. S. Minsky, S. Keller, S. B. Fleischer, J. E. Bowers, E. Hu, U. K. Mishra, L. A. Coldren, S. P. DenBaars, and T. Sota, *Appl. Phys. Lett.* **73**, **2006** (1998).
- [10]. Philippe Riblet, Hideki Hirayama, Atsuhiko Kinoshita, Akira Hirata, Takuo Sugano, and Yoshinobu Aoyagi, *Appl. Phys. Lett.* **75**, **2241** (1999).
- [11]. E. Berkowicz, D. Gershoni, G. Bahir, E. Lakin, D. Shilo, E. Zolotoyabko A. C. Abare, S. P. Denbaars, and L. A. Coldren, *Phys. Rev. B* **61**, **10994–11008** (2000).
- [12]. R. W. Martin, P. G. Middleton, K. P. O'Donnell, and W. Van der Stricht, *Appl. Phys. Lett.* **74**, **263** (1999).
- [13]. Yong-Hoon Cho, G. H. Gainer, A. J. Fischer, J. J. Song, S. Keller, U. K. Mishra, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Lett.* **73**, **1370** (1998).
- [14]. S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **69**, **4188** (1996).
- [15]. Y. D. Qi, H. Liang, D. Wang, Z. D. Lu, W. Tang, and K. M. Lau, *Appl. Phys. Lett.* **86**, **101903** (2005).
- [16]. D. Holec, P.M.F.J. Costa, M.J. Kappers, C.J. Humphreys, *Journal of Crystal Growth* **303**, **314** (2007).
- [17]. Josh Abell and T. D. Moustakas, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 091901 (2008).
- [18]. Shuji Nakamura, Takashi Mukai, Masayuki Senoh and Naruhito Iwasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. **31**, pp. **L139-L142**(1992).
- [19]. Wonseok Lee, Jae Limb, Jae-Hyun Ryou, Dongwon Yoo, Theodore Chung, Russell and D. Dupuis, *J. Cryst. Growth* **287**, **577**(2006).

- [20]. Min-Suk Oh, Min-Ki Kwon, Il-Kyu Park, Sung-Ho Baek, Seong-Ju Park, S.H. Lee, and J.J. Jung, *J. Cryst. Growth* **289**, **107**(2006).
- [21]. Wonseok Lee, Jae Limb, Jae-Hyun Ryou, Dongwon Yoo, Theodore Chung, and Russell D. Dupuis, *J. Electron. Mater.* **35**, **587** (2006).
- [22]. Q. Wang, T. Wang, J. Bai, A. G. Cullis, P. J. Parbrook, and F. Ranalli, *Appl. Phys. Lett.* **93**, **081915** (2008).
- [23]. Chang-Cheng Chuo, Mao Nan Chang, Fu-Ming Pan, Chia-Ming Lee, and Jen-Inn Chyi, *Appl. Phys. Lett.* **80**, **1138** (2002).
- [24]. C.-C. Chuo, C.-M. Lee, T.-E. Nee, and J.-I. Chyi, *Appl. Phys. Lett.* **76**, **3902** (2000).
- [25]. M Senthil Kumar, J Y Park, Y S Lee, S J Chung, C-H Hong and E-K Suh, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, **5050**(2007).
- [26]. S M Olaizola, S T Pendlebury, J P O'Neill, D J Mowbray, A G Cullis, M S Skolnick, P J Parbrook and A M Fox, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35**, **599** (2002).
- [27]. X. H. Zheng, H. Chen, Z. B. Yan, D. S. Li, H. B. Yu, Q. Huang, and J. M. Zhou, *J. Appl. Phys.* **96**, **1899** (2004).
- [28]. M. G. Cheong, H. S. Yoon, R. J. Choi, C. S. Kim, S. W. Yu, C.-H. Hong, E.-K. Suh, and H. J. Lee, *J. Appl. Phys.* **90**, **5642** (2001).
- [29]. H. K. Cho, J. Y. Lee, N. Sharma, C. J. Humphreys, G. M. Yang, C. S. Kim, J. H. Song, and P. W. Yu, *Appl. Phys. Lett.* **79**, **2594** (2001).
- [30]. Y. Wang, X. J. Pei, Z. G. Xing, L. W. Guo, H. Q. Jia, H. Chen, and J. M. Zhou, *J. Appl. Phys.* **101**, **033509** (2007).
- [31]. L.W. Wu, S.J. Chang, Y.K. Su, R.W. Chuang, Y.P. Hsu, C.H. Kuo, W.C. Lai, T.C. Wen, J.M. Tsai, J.K. Sheu, *Solid-State Electron.* **47**, **2027** (2003).
- [32]. B. Van Daele, G. Van Tendeloo, K. Jacobs, I. Moerman, and M. R. Leys, *Appl. Phys. Lett.* **85**, **4379** (2004).
- [33]. Y.-H. Cho, J. J. Song, S. Keller, M. S. Minsky, E. Hu, U. K. Mishra, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Lett.* **73**, **1128**(1998).
- [34]. E. Oh, C. Sone, O. Nam, H. Park, and Y. Park, *Appl. Phys. Lett.* **76**, **3242**(2000).
- [35]. G. Franssen, T. Suski, P. Perlin, R. Bohdan, A. Bercha, W. Trzeciakowski, I. Makarowa, P. Prystawko, M. Leszczyński, I. Grzegory, S. Porowski, and S. Kokenyesi, *Appl. Phys. Lett.* **87**, **041109** (2005).
- [36]. J.-H. Ryou, W. Lee, J. Limb, D. Yoo, J. P. Liu, R. D. Dupuis, Z. H. Wu, A. M. Fischer, and F. A. Ponce, *Appl. Phys. Lett.* **92**, **101113** (2008).
- [37]. Chang-Cheng Chuo, Chia-Ming Lee, and Jen-Inn Chyi, *Appl. Phys. Lett.* **78**, **314** (2001).
- [38]. A. Dissanayake, J. Y. Lin, H. X. Jiang, Z. J. Yu, and J. H. Edgar, *Appl. Phys. Lett.* **65**, **2317** (1994).

- [39]. G. Li, S. J. Chua, S. J. Xu, W. Wang, P. Li, B. Beaumont, and P. Gibart, *Appl. Phys. Lett.* **74**, **2821** (1999).
- [40]. N. H. Karam, T. Parodos, P. Colter, D. McNulty, W. Rowland, J. Schetzina, N. El-Masry, and Salah M. Bedair, *Appl. Phys. Lett.* **67**, **94** (1995).
- [41]. H.Y. Wang, S.C. Huang, T.Y. Yan, J.R. Gong, T.Y. Lin, Y.F. Chen, *Mater. Sci. Eng., B* **57**, **218**(1999).
- [42]. Hyun Jin Kim, Soon-Yong Kwon, Sanggiun Yim, Hyunseok Na, Bong Kee, Euijoon Yoon, Jaehoon Kim, Si-Hyun Park, Heonsu Jeon, Sunwoon Kim, Jun Ho Seo, Keunseop Park, Moon Suk Seon, Cheolsoo Sone, Ok Hyun Nam, and Yongjo Park, *Current Applied Physics* **3**, **351** (2003).
- [43]. Sunwoon Kim, Kyuhan Lee, Haeseok Lee, Keunseop Park, Chang-Soo Kim, Seok-Jae Son, Kyung-Woo Yi, *J. Cryst. Growth* **247**, **55** (2003).
- [44]. Takashi Tokuda, Akihiro Wakahara, Susumu Noda, Akio Sasaki, *J. Cryst. Growth* **183**, **62** (1998).
- [45]. B. Shen, Y.G. Zhou, Z.Z. Chen, P. Chen¹, R. Zhang, Y. Shi¹, Y.D. Zheng, W. Tong, W. Park, *Appl. Phys. A* **68**, **593–596** (1999).
- [46]. Yu Jen Hsu, Lu Sheng Hong, Jing En Tsay, *J. Cryst. Growth* **252**, **144** (2003).
- [47]. S. J. Rosner, E. C. Carr, M. J. Ludowise, G. Girolami, and H. I. Erikson, *Appl. Phys. Lett.* **70**, **420** (1997).
- [48]. X. Li, P. W. Bohn, and J. J. Coleman, *Appl. Phys. Lett.* **75**, **4049** (1999).
- [49]. X. G. Qiu, Y. Segawa, Q. K. Xue, Q. Z. Xue, and T. Sakurai, *Appl. Phys. Lett.* **77**, **1316** (2000).
- [50]. J. J. Song and W. Shan, in *Group III Nitride Semiconductor Compounds*, edited by B. Gil (Oxford University Press, New York, 1998), pp. 182–241.
- [51]. Jörg Neugebauer and Chris G. Van de Walle, *Appl. Phys. Lett.* **69**, **503** (1996).
- [52]. C. B. Soh, S. J. Chua, H. F. Lim, D. Z. Chi, S. Tripathy, and W. Liu, *J. Appl. Phys.* **96**, **1341** (2004).
- [53]. G. Salviati, M. Albrecht, C. Zanotti-Fregonara, N. Armani, M. Mayer, Y. Shreter, M. Guzzi, Yu.V. Melnik, K. Vassilevski, V.A. Dmitriev, and H.P. Strunk, *phys. stat. sol. (a)* **171**, **325** (1999).
- [54]. Toshio Ogino and Masaharu Aoki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, **2395**(1980).
- [55]. A. F. Wright, *J. Appl. Phys.* **92**, **2575** (2002).
- [56]. E. F. Schubert, I. D. Goepfert, and J. M. Redwing, *Appl. Phys. Lett.* **71**, **3224** (1997).
- [57]. Kenji HARAFUJI, *Jpn. J. Appl. Phys. Vol.* **40**, pp. **6263** (2001).
- [58]. M. A. Reshchikov, D. Huang, F. Yun, P. Visconti, L. He, H. Morkoç, J. Jasinski, Z. Liliental-Weber, R. J. Molnar, S. S. Park, and K. Y. Lee, *J. Appl. Phys.* **94**, **5623** (2003).

- [59]. S. Fischer, C. Wetzel, E. E. Haller, and B. K. Meyer, *Appl. Phys. Lett.* **67**, **1298** (1995).
- [60]. A. Kasi Viswanath, Eun-joo Shin, Joo In Lee, Sungkyu Yu, Dongho Kim, Baeyong Kim, Yoonho Choi, and Chang-Hee Hong, *J. Appl. Phys.* **83**, **2272** (1998).
- [61]. Annamraju Kasi Viswanath, Joo In Lee, Sungkyu Yu, Dongho Kim¹, Yoonho Choi, and Chang-Hee Hong, *J. Appl. Phys.* **84**, **3848** (1998).
- [62]. C Merz, M Kunzer, U Kaufmann, I Akasaki and H Amano, *Semicond. Sci. Technol.* **11**, **712–716**(1996).
- [63]. M. Leroux, N. Grandjean, B. Beaumont, G. Nataf, F. Semond, J. Massies, and P. Gibart, *J. Appl. Phys.* **86**, **3721** (1999).
- [64]. G. Pozina, J. P. Bergman, T. Paskova, and B. Monemar, *Appl. Phys. Lett.* **75**, **4124** (1999).
- [65]. B. Šantic, C. Merz, U. Kaufmann, R. Niebuhr, H. Obloh, and K. Bachem, *Appl. Phys. Lett.* **71**, **1837** (1997).
- [66]. H. Y. An, O. H. Cha, J. H. Kim, G. M. Yang, K. Y. Lim, E. -K. Suh, and H. J. Lee, *J. Appl. Phys.* **85**, **2888** (1999).
- [67]. K. P. Korona, J. Kuhl, J. M. Baranowski, and S. Porowski, *phys. stat. sol. (b)* **216**, **85** (1999).
- [68]. K. W. Mah, J.-P. Mosnier, E. McGlynn, M. O. Henry, D. O'Mahony, and J. G. Lunney, *Appl. Phys. Lett.* **80**, **3301** (2002).
- [69]. K.W. Mah, E. McGlynn, J. Castro, J.G. Lunney, J-P. Mosnier, D. O'Mahony, M.O. Henry, *J. Cryst. Growth* **222**, **497** (2001).
- [70]. T.F. Huang, A. Marshall, S. Spruytte, J.S. Harris Jr, *J. Cryst. Growth* **200**, **362** (1999).
- [71]. J. Menniger, U. Jahn, O. Brandt, H. Yang, and K. Ploog, *Phys. Rev. B* **53**, **1881–1885** (1996).
- [72]. J. Wu, H. Yaguchi, K. Onabe, R. Ito, and Y. Shiraki, *Appl. Phys. Lett.* **71**, **2067** (1997).
- [73]. Z. X. Liu, A. R. Goñi, K. Syassen, H. Siegle, C. Thomsen, B. Schöttker, D. J. As, and D. Schikora, *J. Appl. Phys.* **86**, **929** (1999).
- [74]. D. J. As, F. Schmilgus, C. Wang, B. Schöttker, D. Schikora, and K. Lischka, *Appl. Phys. Lett.* **70**, **1311** (1997).
- [75]. 歐震, "Growths and characterizations of wide-bandgap III-antimonide and III-nitride epilayers and their device structure", 國立交通大學, 博士論文, 民國 88 年。
- [76]. X. H. Wu, D. Kapolnek, E. J. Tarsa, B. Heying, S. Keller, B. P. Keller, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* **68**, **1371** (1996).
- [77]. T. Kurobe, Y. Sekiguchi, J. Suda, M. Yoshimoto, and H. Matsunami, *Appl. Phys. Lett.* **73**, **2305** (1998).
- [78]. B-C. Chung and M. Gershenson, *J. Appl. Phys.* **72**, **651** (1992).

- [79]. S. Fischer, G. Steude, D.M. Hofmann, F. Kurth, F. Anders, M. Topf, B.K. Meyer, F. Bertram, M. Schmidt, J. Christen, L. Eckey, J. Holst, A. Hoffmann, B. Mensching, B. Rauschenbach, *J. Cryst. Growth* **189**, **556** (1998).
- [80]. S. Oktyabrsky, K. Dovidenko, A. K. Sharma, J. Narayan, and V. Joshkin, *Appl. Phys. Lett.* **74**, **2465** (1999).
- [81]. L. Sugiura, K. Itaya, J. Nishio, H. Fujimoto, and Y. Kokubun, *J. Appl. Phys.* **82**, **4877** (1997).
- [82]. X. H. Wu, P. Fini, S. Keller, E. J. Tarsa, B. Heying, U. K. Mishra, S. P. DenBaars and J. S. Speck, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, pp. **L1648-L1651** (1996).
- [83]. A. Munkholm, C. Thompson, C. M. Foster, J. A. Eastman, O. Auciello, G. B. Stephenson, P. Fini, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.* **72**, **2972** (1998).
- [84]. S. C. Jain, M. Willander, J. Narayan, and R. Van Overstraeten, *J. Appl. Phys.* **87**, **965** (2000).
- [85]. S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, *J. Appl. Phys.* **71**, **5543** (1992).
- [86]. Dapeng Xu, Hui Yang, J. B. Li, D. G. Zhao, S. F. Li, S. M. Zhuang, R. H. Wu, Y. Chen, and G. H. Li, *Appl. Phys. Lett.* **76**, **3025** (2000).



附錄 A WK2008 磊晶控制系統硬體設計及規劃

WK2008 MOCVD 磊晶系統控制主要分為硬體設計及軟體撰寫，本章節將著重說明 WK2008 MOCVD 磊晶控制系統的硬體設計及其傳輸介面配置，而系統控制程式則透過傳輸介面來達到硬體之監控。

在介紹 WK2008 MOCVD 磊晶系統硬體設計的排序上，本章將先由氣體傳輸管路設計理念提起，再來介紹 WK2008 控制系統硬體傳輸介面配置、控制指令設定意義及其硬體對應關係；之後將針對系統不同狀態下之氣體傳輸管路中氣動閥之開關控制邏輯、真空系統中氣動閥開關控制邏輯、真空泵浦開關控制等邏輯設計概念做完整陳述；最後針對氣動閥開關控制的邏輯電路設計、數位輸出/輸入(D I/O)控制卡輸出埠屬性設定及其配置、及實際控制電路接法等做完整說明。

本章最後部分將繼續介紹控制系統的多項附屬裝置，如 WK2008 磊晶系統之狀態偵測 LED 顯示電路設計、手套傳輸箱中電磁控制迴路設計、腔體和射頻(Radio frequency, RF)高週波加熱系統之冷卻循環水路設計、以及氫氣純化器之鈀金屬膜(Palladium membrane)氫氣純化原理及其加熱系統管路和控制電路設計。

A-1 WK2008 磊晶系統氣體傳輸管路設計

圖 A-1 為 WK2008 磊晶系統氣體管路設計，管路設計包含了氣體傳輸管路(Gas handling system)，真空系統(Pumping system)管路等設計；而氣體傳輸管路設計可分為下列 4 大項：

- 載流氣體(Carrier gas)管路。
- V 族管路。
- III 族管路。
- 腔體輔助氣體管路。

在載流氣體管路介紹中，尚加入了排氣端(Vent)管路介紹；V 族管路介紹中，包含 V 族分子(NH_3)、N 型摻雜源(SiH_4)管路介紹；III 族管路介紹中，亦包含有機金屬分子源(MO Source)管路、氣體走向切換區(Epifold)介紹等；以下章節將分點論述氣體傳輸管路上的諸多設計理念。此外，在系統管路通入氣體之前，尚需針對管路作氦氣測漏，以偵測出管路中是否有洩漏存在，因為些微的管路洩漏，可能會使管路內部氧化，造成不必要雜質進入腔體內，間接影響樣品成長品質；而如有大量洩漏，可能會使有機金屬分子氧化燃燒，造成系統重大傷害，故管路測漏在磊晶系統建構上佔有極重要的地位。

一般造成管路洩漏的來源有焊接(Welding)點洩漏、VCR 接頭端洩漏等，詳細的測漏方式請參閱附錄 G G-H WK2008 系統管路測漏。

WK2008 MOCVD Epitaxy System

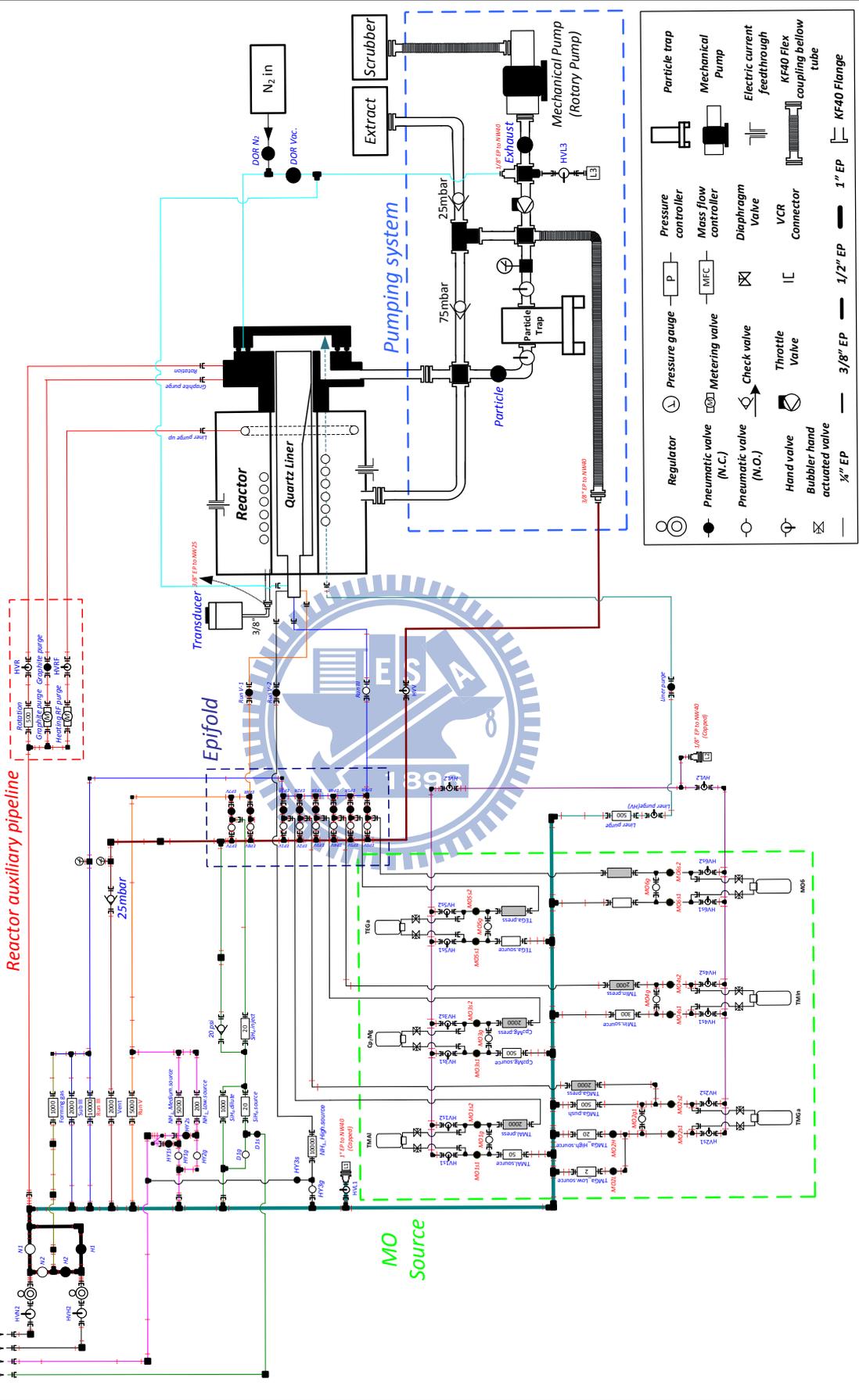


圖 A-1 WK2008 MOCVD 磊晶系統管路設計圖

A-1-1 【氣體傳輸管路設計理念】

為使使用者方便了解 WK2008 MOCVD 系統管路設計，圖 A-1 利用不同顏色標示管路，以利區分不同性質之氣體傳輸管路。

1. 【載流氣體管路(土耳其藍&墨綠色)】

載流氣體管路提供有機金屬分子(MO Source)、V 族分子(Hydride source)、摻雜分子(SiH_4 、 Cp_2Mg)、腔體輔助管路(Reactor auxiliary pipelines)等所有氣體管路所需的載流氣體源；而載流氣體管路末端接至反應腔體中，並由 *Liner purge* 流量計決定其流量。

MOCVD 系統是以氣流進行質傳(Mass transport)作用，氣體粒子間碰撞頻繁，且反應物分子主要是藉由擴散機制在管路中前進，所以載流氣體氣體在反應腔體中的流動分布及所受之熱量傳遞作用都會影響質傳作用的速率和反應物的濃度分布，在晶片載體(Substrate Susceptor)上方的氣體溫度甚高於主氣流之氣體均溫，氣體之黏滯係數(Viscosity coefficient)快速增高，氣流會在靠近晶片上方形成流速極為緩慢的邊界層(Boundary layer)，尤其在加熱區更為明顯，氣體流速極接近零；輸入的氣相反應物需藉由擴散作用穿越滯留層才能到達反應介面，為了達到這項需求，載流氣體必需具備及高擴散性及低黏滯性等條件，以確保滯留層的質傳效率。

對於磊晶系統而言，雜質污染是極為嚴重的問題，而載流氣體是磊晶系統中最大之氣體量，所以載流氣體需具備高純度，及易於純化；大部份 MOCVD 系統利用氫氣(H_2)做為反應分子源之載流氣體，因為 H_2 為最輕的氣體分子，具有高擴散係數^{註1}，可提高反應物分子源的擴散速度；且在大部分磊晶反應中，與反應物成鈍性(Inert)反應，即不和反應物參與反應，可避免發生污染，間接影響成長物之晶體品質；而 H_2 分子極易透過鈀(Pd)金屬過濾純化^{註2}，也是其主要優勢。

註 1：室壓下，H₂ 擴散係數對溫度關係如表 A-1：

Hydrogen self-diffusion coefficient		
T±0.5(K)	P(kPa)	D×10 ⁴ (m ² /s)
300.1	101.325	1.24
601.2	101.325	3.60
760.3	101.325	5.26
1070.9	101.325	8.60

表 A-1 室壓下，H₂ 擴散係數與溫度之關係

由於氣體擴散係數反比於分子量，故 H₂ 為所有氣態分子中最高者，N₂ 擴散係

數約為 H₂ 的 0.267 倍 ($\frac{D_{H_2}}{D_{N_2}} = \sqrt{\frac{M_{N_2}}{M_{H_2}}} = \sqrt{14}$)。

H₂ 之黏滯係數(Viscosity coefficient) η 如式(A-1)，

$$\eta = 8.76 \times 10^{-6} \cdot \frac{203.4}{0.555T + 40} \left(\frac{T}{294.4} \right)^{1.5} \left(N \cdot s / m^2 \right) \quad (A-1)$$

在溫度介於 27~1000°C，H₂ 之 η 介於 $8.89 \times 10^{-6} \sim 2.15 \times 10^{-5} \text{ Kg} / m \cdot s$ ，N₂ 之 η 介於 $1.78 \times 10^{-5} \sim 4.62 \times 10^{-5} \text{ Kg} / m \cdot s$ 。

註 2：H₂ 純化請參閱 A-10-1 【鈹膜氫氣純化原理】。

然而在成長 III 族氮化物材料中，氮化銦(InN)卻會受到 H₂ 之蝕刻(Etching)作用，降低其成長效率，所以選擇氮氣(N₂)作為成長氮化銦(InN)時的載流氣體；此外，在成長氮化銦鎵(In_xGa_{1-x}N)三元化合物時，由於 InN 與 GaN 適合不同載流氣體環境下成長，為了提高 Indium 在 In_xGa_{1-x}N 三元化合物中的組成比例(Indium incorporation ratio)，一般 In_xGa_{1-x}N 是在 N₂ 載流氣體環境下成長，且可利用混入些許的 H₂ 藉以改變 In_xGa_{1-x}N 的成長特性；所以在系統管路設計上，除了純用 N₂ 或 H₂ 作為管路載流氣體外；系統尚可藉由調變不同 N₂/H₂ 混合比率之載流氣體，來改變載流氣體之組成，對於 In_xGa_{1-x}N 的成長率(Growth rate)、表面形貌(Surface morphology)、固相組成、及光學特性皆有其影響，N₂/H₂ 混合比率可作為磊晶中可供調變參數。

綜合上述考量 WK2008 MOCVD 磊晶系統利用 N₂ 及 H₂ 作為可選擇的載

流氣體源；而系統利用 N1/N2/H1/H2 等 4 個氣動閥(Pneumatic valve)作為載流氣體的切換閥件，載流氣體管路設計如圖 A-2 所示。

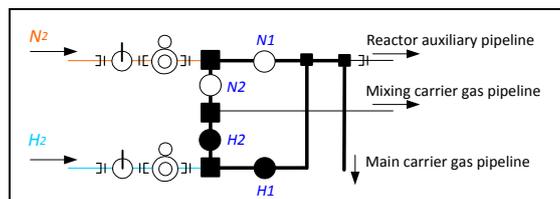


圖 A-2 載流氣體管路設計

載流氣體源頭管路分為 3 條，如下列 3 項介紹：

1. 腔體輔助管路(Reactor auxiliary pipeline)

腔體輔助管路為獨立連結至腔體的管路，主要有 Disk Rotation、Graphite purge、Heating RF purge 等管路，其供氣源來自載流氣體。

2. 混合載流管路(Mixing carrier gas pipeline)

提供混合載流氣體獨立於主載流管路的傳輸路徑。

3. 主載流管路(Main carrier gas pipeline)

主載流管路提供有機金屬分子(MO Source)、V 族分子(Hydride source)、摻雜分子(SiH₄)、腔體輔助管路(Reactor auxiliary pipelines)等所有氣體管路所需的載流氣體源。

其中 N1/H1 氣動閥為控制 N₂/H₂ 是否通入主載流管路及腔體輔助管路的氣動閥件，N2/H2 氣動閥為控制 N₂/H₂ 是否通入混合載流管路的氣動閥件。

WK2008 磊晶系統載流氣體可分為下列 4 種狀態切換：

➤ 載流氣體全為 N₂ 模式

該模式為系統中所有管路的載流氣體皆為 N₂ 的狀態。

➤ 載流氣體全為 H₂ 模式

該模式為系統中所有管路的載流氣體皆為 H₂ 的狀態。

➤ N₂/H₂ 混合模式(主載流管路為 N₂，混合氣體為 H₂)

該模式為主載流管路通入 N₂，混合載流管路通入 H₂ 的狀態。

➤ H₂/N₂ 混合模式(主載流管路為 H₂，混合氣體為 N₂)

該模式為主載流管路通入 H₂，混合載流管路通入 N₂ 的狀態。

1. 【載流氣體全為 N₂ 模式】

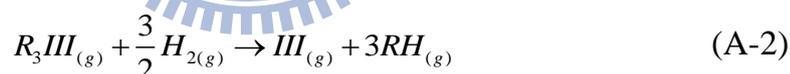
載流氣體全為 N₂ 為成長 InN 及 In_xGa_{1-x}N 使用的載流氣體模式。

早期 MOCVD 系統載流氣體多以 H₂ 為主，主要理由為 H₂ 易經由加熱鈀金屬膜(Heated Pd membrane)過濾純化，然而在 III 族氮化物(III Nitride)成長中，InN 卻會因 H₂ 而抑制其生成；在 1996~1999 年，有許多研究探討載流氣體對於 InN 生成及 In 在 In_xGa_{1-x}N 中固相組成比例的影響；多數研究提及 H₂ 不利於含 In 的氮化物成長；以下將就 H₂ 不利於 InN 及 In_xGa_{1-x}N 成長的原因做分項介紹。

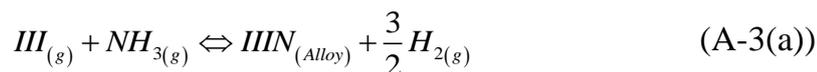
【H₂對於InN成長的影響】

Kuokitu 團隊由熱力學角度分析不同 III 族氮化物的生長相圖(Phase diagram)及不同 H₂ 比率對於 III 族氮化物成長之反應趨使力(Driving force)的影響^{註1}[1-5]。

在其研究中，首先引入 III 族有機金屬分子分解反應^{註2}及 III 族氮化物的化學反應式，由於 III 族有機金屬分子分解反應過程複雜，Kuokitu 僅利用 III 族有機金屬分子在固氣相界面的同質性(Homogeneous)化學反應，反應如式(A-2)，該反應生成氣相 III 族金屬(III_(g))；



在反應式(A-2)中，R代表烷基，可為甲基(CH₃，Methyl)或乙基(C₂H₅，Ethyl)，端看利用何種有機金屬分子，而生成物RH，則為甲烷(Methane)或乙烷(Ethane)分子；氣相金屬與氣相V族分子(NH₃)在晶片表面(Substrate surface)產生非同質性(Heterogeneous)化學反應，生成III族氮化物合金，反應如式A-3(a)，其中III代表In、Ga、Al；



$$K = \frac{P_{H_2}^{i \frac{3}{2}}}{P_{IIIN}^i \cdot P_{NH_3}^i} \quad (A-3(b))$$

式A-3(b)為IIIN合成的反應平衡常數K(Equilibrium constant K)，反應平衡常

數為長晶(異質)介面上生成物與反應物的氣相分壓比，而反應平衡常數為溫度的函數。

在III族氮化物生成反應中，由於H₂為反應產物，增加H₂濃度會提高III族氮化物的合成逆反應程度，進而降低其成長效率；而平衡常數之大小則決定H₂造成逆向反應的程度上差異。表A-2為列出InN、GaN、AlN合成反應平衡常數對溫度的數學關係式，圖A-3為InN、GaN、AlN平衡常數對數值(log₁₀ K)對溫度作圖；由圖A-3可得知在500~1200°C的溫度區間裡，III族氮化物反應平衡常數大小關係為AlN ≫ GaN ≫ InN；由平衡常數的差異觀點來說，由於InN相較於GaN、AlN的平衡常數間大小差異懸殊，H₂對於InN、GaN、AlN合成反應逆向程度影響以InN最劇，可由熱力學觀點預測H₂應最不利於InN生成，提高H₂量將會大幅降低InN的合成效率。

Reaction	Equilibrium constant (K)
$In_{(g)} + NH_{3(g)} \Leftrightarrow InN_{(Alloy)} + \frac{3}{2} H_{2(g)}$	$\log_{10} K = -13.1 + 1.13 \times 10^4 / T + 2.29 \log_{10} T$
$Ga_{(g)} + NH_{3(g)} \Leftrightarrow GaN_{(Alloy)} + \frac{3}{2} H_{2(g)}$	$\log_{10} K = -12.2 + 1.78 \times 10^4 / T + 1.79 \log_{10} T$
$Al_{(g)} + NH_{3(g)} \Leftrightarrow AlN_{(Alloy)} + \frac{3}{2} H_{2(g)}$	$\log_{10} K = -14.2 + 3.17 \times 10^4 / T + 2.33 \log_{10} T$

表 A-2 不同 III 族氮化物合成反應式及其平衡常數對溫度之關係

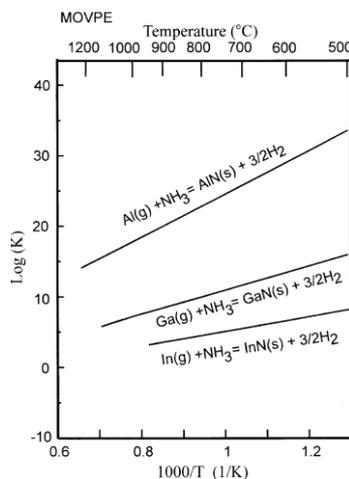


圖 A-3 不同 III 族氮化物 Log(K)對溫度之關係

資料來源：Reference 2

Kuokitu 團隊亦模擬載流氣體中H₂混合比率對於InN、GaN、AlN合成反應趨使力^{註1}的影響[2]，來量化H₂造成合成逆向反應的程度差異，模擬結果

如圖2-4所示；圖A-4參數說明如下：

$$F = \frac{P_{H_2}^0}{P_{H_2}^0 + P_{IG}^0} \text{，為H}_2\text{與H}_2\text{+惰性氣體(Inert gas)的輸入氣相分壓比。}$$

$P_{H_2}^0$ ：H₂輸入分壓。

P_{IG}^0 ：惰性氣體(Inert gas)分壓，例如N₂，He。

$\Delta P = P_{III}^0 - P_{III}^i$ ：反應趨使力。

P_{III}^0 ：氣相III族有機金屬分子輸入分壓。

P_{III}^i ：氣相金屬反應原子在成長介面上分壓。

α ：NH₃分解率($\alpha=0$)，其分解反應如式(A-4)。

$\sum P_i$ ：腔體總壓(1atm)。

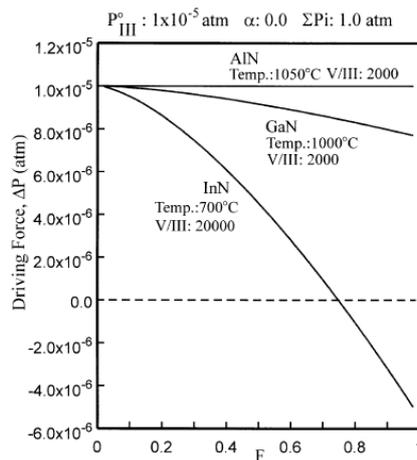
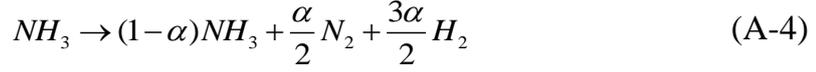


圖 A-4 不同 III 族氮化物其反應趨使力與 H₂ 比例之關係

資料來源：Reference 2

由圖 A-4 模擬結果可得知，較高的 H₂ 比率會造成 InN，GaN 合成的反應趨使力降低，AlN 則無顯著影響；而 InN 合成的反應趨使力隨著 H₂ 比例增高，其降低幅度最大；而 InN 合成反應在 H₂ 比率大於 80%(F>0.8)的環境下，合成反應趨使力<0，表示在該條件下，InN 蝕刻效應(Etching)^{註 1}發生，InN 不成長。

此外，在III族氮化物成長中，通入的V族反應分子(NH₃)氣體量通常僅次於載流氣體，在反應腔氣體含量中佔有極高的比率，故NH₃在高溫時(>400°C)分解所產生的H₂，也會相對提高InN合成反應的逆向程度，式(A-4)為NH₃分解反應式，H₂為生成產物， α 為其分解率^{註 3}；



但由於無法直接獲得NH₃在成長過程中的分解率(α)，故無法量化由NH₃分解而來的H₂所造成InN合成反應的逆向程度；不過，可確定的是，在高V/III的條件下，NH₃分解產生的H₂量是有可能多到足以降低InN的成長速率。

基於種種H₂不利於InN生成的因素，WK2008磊晶系統利用不會造成逆反應的N₂分子做為成長InN使用的載流氣體；且在絕大多數研究中，InN幾乎都在N₂環境下生成，Sunakawa[6]由實驗發現，在純H₂的環境下成長InN，其成長率幾乎為0。

註1：Kuokitu研究中提到，在IIIN(III族氮化物)生成反應中，可由反應趨使力(Driving force)決定成長模式，反應驅使力定義為： $\Delta P = P_{III}^0 - P_{III}^i$ [1]

P_{III}^0 ：反應前驅物(Precursor)輸入氣相分壓。

P_{III}^i ：氣相金屬反應原子在長晶介面上的分壓。

P_{III}^v ：氣相金屬反應原子在該狀態下的飽和蒸汽壓，略小於 P_{III}^0 。

反應趨使力大小和V/III、反應溫度、反應壓力、滯留層厚度(δ)等有關，其大小可對應於不同長晶相圖(Phase diagram)，原則上可分為3區塊：

$P_{III}^i > P_{III}^0$ ， $\Delta P < 0$ ：IIIN成長蝕刻，即不成長(Etching, no growth)。

$P_{III}^0 > P_{III}^i > P_{III}^v$ ：IIIN成長(Growth)，但氣相金屬反應原子分壓大於該狀態下的飽和蒸汽壓，滴狀金屬物由於過飽和析出(Metallic droplets formation)。

$P_{III}^0 > P_{III}^v > P_{III}^i$ ：IIIN成長，且無滴狀金屬物析出。

此外成長率(Growth rate)與反應驅使力有關，可定義為：

$$r = k_g (P_{III}^0 - P_{III}^i) = k_g \cdot \Delta P$$

其中 k_g 為常數，定義為：

$$k_g = c \cdot \frac{DM}{\rho RT \delta}$$

c：常數($J/mole \cdot cm^3$)。

D：平均氣相MO分子(TMIn, TMGa, TMAI)擴散係數($mole \cdot cm^2/s$)。

M：III族氮化物(InN, GaN, AlN)分子量($g/mole$)。

R：理想氣體常數($8.3145 J/mole \cdot K$)。

T：成長溫度(K)。

ρ ：III族氮化物(InN, GaN, AlN)分子密度(g/cm^3)。

δ ：邊界層厚度(cm)。

邊界層厚度簡易推估詳見 附錄G G-I。

註2：有機金屬分子分解為複雜且不可逆反應，有許多種生成氣相III族金屬的反應途徑，Kuokitu所提及有機金屬分子(R_3III)與 H_2 在成長界面發生同向性(Homogeneous)反應，應只是諸多反應途徑中的其中之一；此外，氣相III金屬尚有可能為在邊界層中透過有機金屬分子熱分解的連鎖反應(Chained fission)而來；由於反應途徑複雜，逆反應並非單一途徑，故有機金屬分子分解一般為不可逆反應(Invertible)。

有機金屬分子三甲基銦(Trimethylindium, TMIn, $(CH_3)_3In$)，在 $400^\circ C$ 以上已完全熱分解成氣相In金屬和甲基(Methyl-radical, CH_3)。

註3： NH_3 分解率(α)隨著溫度升高而提高，且在無催化劑(Catalyst)作用下， NH_3 分解率一般低於4%。

【 H_2 對於 $In_xGa_{1-x}N$ 成長的影響】

Kuokitu團隊利用熱力學模型分析 H_2 含量、成長溫度對於In在 $In_xGa_{1-x}N$ 中固相組成(Solid composition, x^s)的影響[2]，其研究中提到隨著 H_2 比率提高、 NH_3 分解率(α)增加，及長晶溫度上升，皆會降低In混入 $In_xGa_{1-x}N$ 合金中的效率，即In固相組成低於其輸入氣相比率。

在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 三元化合物成長中，In固相組成(x^s)可近似為In與Ga化合的反應趨使力(ΔP)比，如式(A-5)所示；

$$x^s \cong \frac{P_{\text{In}}^0 - P_{\text{In}}^i}{(P_{\text{In}}^0 - P_{\text{In}}^i) + (P_{\text{Ga}}^0 - P_{\text{Ga}}^i)} \quad (\text{A-5})$$

$P_{\text{In,Ga}}^0$ ：氣相前驅物(Precursor, TMIn、TMGa)的輸入分壓；該值與TMIn，TMGa等MO分子之輸入莫耳流率有關。

$P_{\text{In,Ga}}^i$ ：氣相In，Ga在固氣相界面(Solid-vapor interface)的分壓。

Kuokitu模擬中提到，在相對較低的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 成長溫度($\sim 500^\circ\text{C}$)，不含 H_2 成分的條件下，其氣相In、Ga之前驅物(Precursor)輸入分壓遠大於氣相In、Ga在固氣相界面上分壓，即 $P_{\text{Ga}}^0 \gg P_{\text{Ga}}^i, P_{\text{In}}^0 \gg P_{\text{In}}^i$ ；故In固相組成(x^s)可簡化成輸入氣相分壓比(x^v)，如式(A-6)；

$$x^s \cong \frac{P_{\text{In}}^0}{P_{\text{In}}^0 + P_{\text{Ga}}^0} = x^v \quad (\text{A-6})$$

在較低的成長溫度($\sim 500^\circ\text{C}$)，不含 H_2 成分的條件下成長 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ，其In固相組成(x^s)應與輸入氣相分壓比(x^v)，即氣相前驅物的莫耳流率比($\frac{F_{\text{TMIn}}}{F_{\text{TMIn}} + F_{\text{TMGa}}}$)呈現線性的比例關係，故可藉由該線性比例關係預測特定

TMIn、TMGa輸入莫耳流率其所對應的In固相組成(x^s)；III族磷化物(Phosphide)、III族砷化物(Arsenide)、III族銻化物(Antimonide)在 V/III 大於1的情況下固/氣相組成皆符合該線性比例關係。

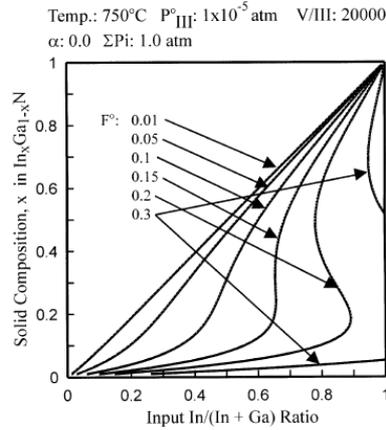
不幸的是，III族氮化物(III Nitrides)卻會隨著 H_2 比率提高、 NH_3 分解率(α)增加，及長晶溫度上升，使得III族固/氣相組成偏離線性比例關係；其中又以 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 三元化合物偏差最大。

Kuokitu藉由熱力學模型探討不同 H_2 含量對於 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 成長中，In固相組成的影響，圖A-5為Kuokitu團隊模擬在不同 H_2 比率條件下， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的固/氣相組成關係圖，其中 $F = \frac{P_{\text{H}_2}^0}{P_{\text{H}_2}^0 + P_{\text{IG}}^0}$ ，為 H_2 與 H_2 +惰性氣體(Inert gas)的分壓比，

由圖A-5可得知隨著 H_2 比例增高(F 增加)，In固/氣相組成偏離線性關係的程

度愈大；此外，隨著H₂比例增高，In固相組成(x^s)愈低於輸入氣相In比率

(Input $\frac{In}{In+Ga}$ ratio, x^v)。



圖A-5 不同H₂比率(F)對於In在In_xGa_{1-x}N中固氣相比影響

資料來源：Reference 2

Kuokitu推論H₂造成In固相組成(x^s)與其氣相組成(x^v)偏差，其主要原因為InN及GaN其反應平衡常數(K)差異所致，由於GaN反應平衡常數較InN大數個數量級(>5orders)，H₂所造成的InN合成反應逆向程度大於GaN，故 P_{In}^i (氣相金屬In在長晶界面上分壓)變得不可忽視，In固相組成(x^s ，式(A-5))受到 P_{In}^i 所影響，需改寫成式(2-7)；

$$x^s = \frac{P_{In}^0 - P_{In}^i}{P_{In}^0 - P_{In}^i + P_{Ga}^0 + P_{Ga}^i} \cong \frac{P_{In}^0 - P_{In}^i}{P_{In}^0 - P_{In}^i + P_{Ga}^0} \quad (A-7)$$

由於 P_{In}^i 增高的原因，造成在In_xGa_{1-x}N中，In的固/氣相組成偏離線性比例關係；隨著H₂量增多，其偏差量愈大，且In混合比率也相對降低。

除了 Kuokitu 團隊的模擬分析外，Piner[7]團隊亦由實驗指出，In 在 In_xGa_{1-x}N 中的固相組成隨著 H₂ 含量增加而遞減，其 H₂/N₂ 混合氣體比例範圍為 0~2%；Scholz[8]團隊也指出增加 H₂ 量皆會使 In_xGa_{1-x}N 塊材(Bulk)及單層量子井(SQW)中的 In 組成降低，其所使用的 H₂/N₂ 混合氣體比例為 0.3 及 1.2；Bosi[9]也提到增加 H₂ 成份，會使 In 混入 In_xGa_{1-x}N 合金的效率呈現類似指數的衰減；而此固氣相組成關係偏差主要發生在含有 In 的氮化物(In-contained nitride)生成，在 Al_xGa_{1-x}N 的合成中，純 H₂ 環境下，固氣相組成近乎為線性關係[2]。

綜合上述，為降低 In 在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中固/氣相組成偏差，WK2008 磊晶系統在成長 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 時利用 N_2 作為載流氣體，避免過量 H_2 造成 In 固相含量降低，以提升 In 混合效率(In incorporation efficiency)^{註 4}。

【載流氣體全為 N_2 模式之管路氣體流向】

圖 A-6 為系統管路簡圖，該簡圖重點畫出混合氣體(Mixing carrier)、III 族管路(Group III)、V 族管路(Group V)等進入反應腔體中內襯層(Liner)的氣體管路；圖中顯示載流氣體切換成全為 N_2 模式時，N1/N2/H1/H2 等氣動閥的對應狀態^{註 5}及該狀態下系統管路中載流氣體流向，其中混合載流氣體管路、腔體輔助管路、III、V 族、 NH_3 管路、Vent 管路皆通入 N_2 做為載流源；此外 N_2 亦通入 MO 分子冷浴槽(Bubbler)中，做為 MO 分子攜出過程所使用的載流氣體源。

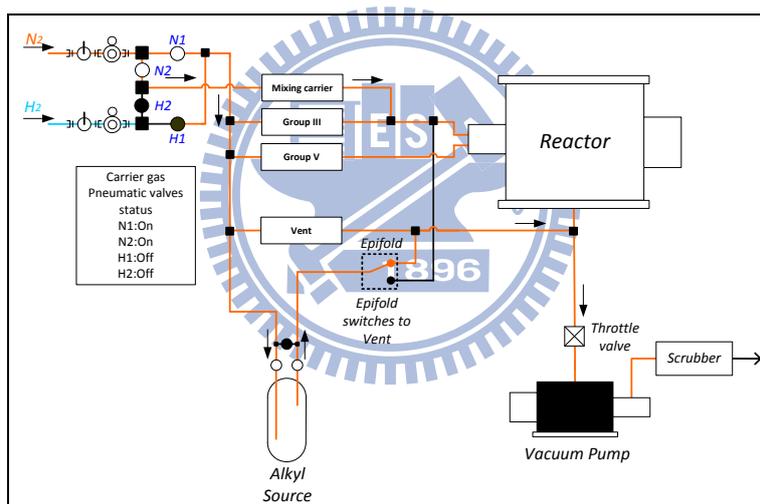


圖 A-6 系統管路中全為 N_2 作為載流氣體之氣流走向

註 4: 在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 成長中，當 In 組成低於 30%，增加其成長率有助於提升 Indium 混合效率(Incorporation efficiency)，即提高其固相組成。

註 5: 詳細的載流氣體管路之氣動閥控制請參閱 A-4-2 WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計之主載流氣體源管路氣動閥邏輯章節。

2. 【載流氣體全為 H_2 模式】

如同先前所提，基於易純化的特性，大部分 MOCVD 系統使用 H_2 作為其載流氣體；基於 H_2 的高擴散係數，可有利於增加成長速率。

絕大部分 MOCVD 所成長的 III 族氮化物中， AlN 、 GaN 低溫成核層

(LT-GaN, Nucleation layer)及高溫 GaN 緩衝層(HT-GaN, Buffer layer)成長時皆利用 H₂ 作為其載流氣體。

在 WK2008 磊晶系統中，LT-GaN 成核層及 HT-GaN 緩衝層即在載流氣體全為 H₂ 模式下成長；而系統所成長的高溫 GaN，其低溫(13K)光激螢光光譜(Photoluminescence)，主訊號峰值為 3.48eV，其譜線半高寬(FWHM)為 3.9meV，平均厚度為 1μm，表面粗糙度方均根值(R_{rms})為 0.6nm，已不亞於已發表的高品質 GaN 特性。

【載流氣體全為 H₂ 模式之管路氣體流向】

圖 A-7 為系統管路簡圖，該簡圖重點畫出混合氣體(Mixing carrier)、III 族管路(Group III)、V 族管路(Group V)等進入反應腔體中內襯層(Liner)的氣體管路；圖 A-7 顯示載流氣體切換成全為 H₂ 模式時，N1/N2/H1/H2 等氣動閥的對應狀態^{註 1}及該狀態下系統管路中載流氣體流向，其中混合載流氣體管路、腔體輔助管路、III、V 族、NH₃ 管路、Vent 管路皆通入 H₂ 做為載流源；此外 H₂ 亦通入 MO 分子冷浴槽(Bubbler)中，做為 MO 分子攜出過程所使用的載流源。

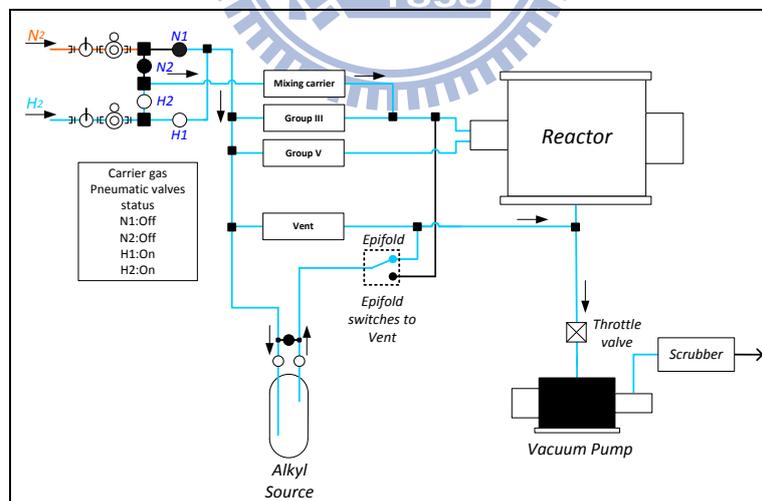


圖 A-7 系統管路中全為 H₂ 作為載流氣體之氣流走向

註 1：詳細之載流氣體管路之氣動閥控制請參閱 A-4-2 WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計之主載流氣體源管路氣動閥邏輯章節。

3. 【N₂/H₂(主載流管路為 N₂，混合氣體為 H₂)模式】

該混合模式為成長 In_xGa_{1-x}N 三元化合物(Ternary compounds)可利用的 N₂/H₂ 混合方式；一般來說，只需微量的 H₂ 即可改變 In_xGa_{1-x}N 表面形貌(降低表面粗糙度)、光學特性、Indium 組成等；而過多的 H₂ 會增加 Indium 原子的逸失(Desorption)，降低 Indium 在 In_xGa_{1-x}N 三元化合物中的固相組成。

In_xGa_{1-x}N 材料目前已廣泛運用於藍綠光 LED 光電元件，而 In_xGa_{1-x}N 為 LED 多層量子井結構(Multiple quantum wells, MQWs)中的主動發光層(Active layer)，在成長多層量子井結構上，層與層之間的界面平整度及主動層組成的均勻性將是影響多層量子井結構發光特性的關鍵要素。

Suihkonen[10]在成長 In_xGa_{1-x}N 多層量子井結構的研究中提到，提高 GaN 覆蓋層(Barrier)的成長溫度、在 In_xGa_{1-x}N QW(Quantum well)及 GaN 覆蓋層穿插成長中斷(Growth interruption)，即 In_xGa_{1-x}N QW 在 N₂ 下短暫退火(Annealing)、在成長 GaN 覆蓋層(Barrier layer)時，混入微量 H₂ 等方法皆能增加 QW 之間的界面平整度及提高 In_xGa_{1-x}N 組成均勻性；不過，根據其研究發現，在成長 GaN 覆蓋層(Barrier layer)時，些微增加 H₂ 比例($\frac{H_2}{H_2 + N_2} = 2\%$)，相較於上述其他方法，可更有效率的抑制 In 叢集物(Cluster)生成、降低 GaN 覆蓋層表面的粗糙度，及增加 In_xGa_{1-x}N QW 中的 In 成分均勻度(XRD 譜線半高寬 FWHM 降低)；此外些微增加 H₂ 比例對於 In_xGa_{1-x}N PL 發光譜線強度未有顯著影響，但峰值卻有 30nm 的藍移量；平均 In 組成也從 18% 降到 10%，不過將 H₂ 比例提高到 20%($\frac{H_2}{H_2 + N_2} = 20\%$)，其 In_xGa_{1-x}N QW 的 PL 譜線峰值波長會有大量藍移(>50nm)及伴隨著 PL 譜線強度大幅降低；故 H₂ 混合量的精確控制在 In_xGa_{1-x}N QW 成長中將是其關鍵要素。

此外 Piner[7]也提到 710°C 成長的 In_xGa_{1-x}N 磊晶層(epilayer)，當 $\frac{H_2}{H_2 + N_2}$ 由 0% 增至 2%，平均 In 組成由 40% 降至 17%。

根據 Suihkonen 研究，N₂/H₂(主載流管路為 N₂，混合氣體為 H₂)混合模式

應可利用於成長 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井結構時，作為提升 QW 之間界面平整度及提升組成均勻度的調變參數。

【 N_2/H_2 (主載流管路為 N_2 ，混合氣體為 H_2)模式之管路氣體流向】

WK2008 磊晶系統 N_2/H_2 混合方式為先決定利用 N_2 或 H_2 作為主載流管路之載流氣體，而要混合的載流氣體則透過獨立管路(Mixing carrier line)通入腔體中，以避免混合之載流氣體影響主管路中氣體傳輸速度；而獨立之混合載流氣體則經由 *Forming Gas* 流量計決定其流量後，經由 III 族管路端匯入反應腔體中；系統可藉由 *Forming Gas* 流量與管路中所有載流氣體的流量總和比值作為 N_2/H_2 混合比率。

圖 A-8 為系統管路簡圖，該簡圖重點畫出混合氣體(Mixing carrier)、III 族管路(Group III)、V 族管路(Group V)等進入反應腔體中內襯層(Liner)的氣體管路；圖 2-8 顯示載流氣體切換成主載流管路為 N_2 ，混合載流氣體為 H_2 模式時，N1/N2/H1/H2 等氣動閥的對應狀態^{註2}及該狀態下系統管路中載流氣體流向；其中腔體輔助管路、III、V 族、 NH_3 管路、Vent 管路皆通入 N_2 做為載流源，此外 N_2 亦通入 MO 分子冷浴槽(Bubbler)中，做為 MO 分子攜出過程所使用的載流源。而混合載流氣體 H_2 則獨立於系統中氣體傳輸管路，單獨經由混合載流管路(Mixing carrier line)透過 *Forming Gas* 流量計決定其流量後，經由 III 族管路端匯入反應腔體中，如圖 A-8 中藍色部分所示。

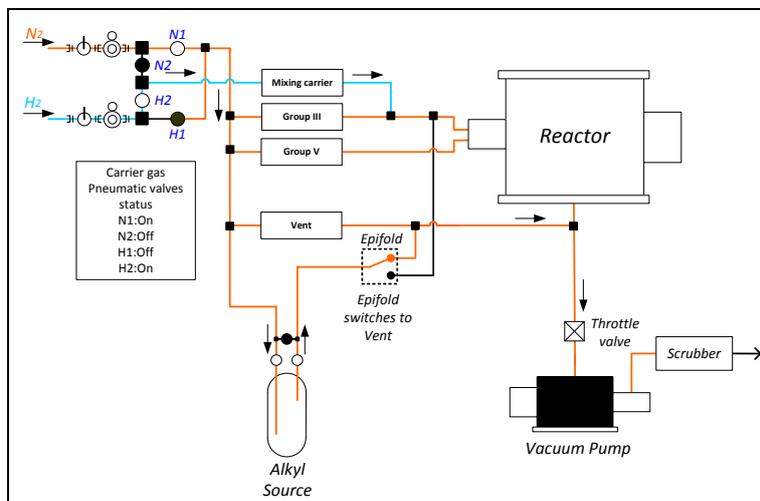


圖 A-8 主管路為 N_2 ，Mixing carrier gas 為 H_2 之氣流分佈

註 1：一般使用 H₂/N₂ 混合比例約為 0.04%~20%。

註 2：詳細之載流氣體管路之氣動閥控制請參閱 A-4-2 WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計之主載流氣體源管路氣動閥邏輯章節。

註 3：WK2008 磊晶系統載流氣體使用量範圍約為 5~10SLM，載流氣體使用量主要由 NH₃ 用量所決定，NH₃ 最小使用流量為在成長高溫 GaN 緩衝層(1130°C，GaN Buffer layer)時，其條件為 NH₃：2000sccm，TMGa：5sccm，由於 NH₃ 混入 V 族管路中，故將 V 族管路總流量定為 2.5SLM (NH₃：2SLM，Carrier gas：0.5SLM)；且為維持 III、V 族氣流總量匹配，III 族載流氣體量亦定為 2.5SLM，所以最低載流氣體量為 5SLM；不過為配合低溫 GaN 成核層(520°C，GaN Nucleation layer)成長，其條件為 NH₃：2.7SLM，TMGa：2sccm，故 V 族管路總流量定為 3.5SLM，所以在系統成長 GaN 成核層及緩衝層時，III、V 族管路總流量定為 7SLM。

一般成長全域組成 In_xGa_{1-x}N(x=0~1)其 V/III 約為 1.3×10⁴~2.5×10⁴，在 WK2008 磊晶系統流量計配置中，配合 V/III 條件下，NH₃ 最小使用流量約為 4.8SLM，其條件為 TMGa：1sccm，TMIn：25~200sccm，V/III ≅ 9800 ~ 27200，故 V 族管路流量定為 5SLM (NH₃：4.8SLM，Carrier gas：0.2SLM)；所以系統成長 In_xGa_{1-x}N 時，III、V 族管路總流量定為 10SLM。詳細的成長條件如表 A-3 所示。

Unit: sccm	GaN Nucleation layer	GaN Buffer layer	In _x Ga _{1-x} N
TMGa	2	5	1
TMIn	0	0	25~200
NH ₃	2700	2000	4800
V/III	10000	3000	9800~27200
V、III Flow	3500	3500	5000
Total flow	7000	7000	10000

表 A-3 GaN 成核層、緩衝層，In_xGa_{1-x}N 成長對應之 III、V 族流量表

若 Forming gas 流量計全流量為 5000sccm，以流量計有效範圍為

2%F.S.~98%F.S.來計算， $\frac{H_2}{N_2}$ 可調變的比例範圍約為1.9%~94%。

Total flow: 10SLM, NH ₃ =4.8SLM, Main carrier N ₂ : 5200sccm		
	Min	Max
Mixing carrier H ₂ /5000	100	4900
H ₂ /N ₂	0.019	0.94

表 A-4 N₂/H₂(主載流管路為 N₂，混合氣體為 H₂)模式之 H₂/N₂ 計算

4. 【H₂/N₂(主載流管路為 H₂，混合氣體為 N₂)模式】

該載流氣體混合模式可供研究在 GaN 生成時，不同 N₂/H₂ 混合比率對其表面形貌、結構缺陷、結構應力，及電性的影響；而大多數研究都著眼於 N₂/H₂ 混合比率對於 GaN 結構缺陷的影響。

Yong Suk Cho[11] 團隊在高溫 GaN(HT-GaN) 成長中利用不同 N₂/H₂($\frac{N_2}{N_2+H_2}$) 混合比例的載流氣體，研究不同載流氣體組成對於 GaN 成核(Nucleation)過程、結構缺陷、及電性的影響；其研究發現，當 N₂ 比例增高，HT-GaN 接合時間(Coalescence time)隨之減短；而在 N₂ 環境下初期成長的 HT-GaN 島狀物(Islands)，由於未受 H₂ 蝕刻(Etching)影響，相較於在 H₂ 環境下愈趨近於 2-D 側向成長(2D Lateral growth)；此外，隨著 N₂ 成分比例的提升，GaN(102)面的 XRD Rocking curve 半高寬(FWHM)也隨之增加，如圖 A-9 所示。

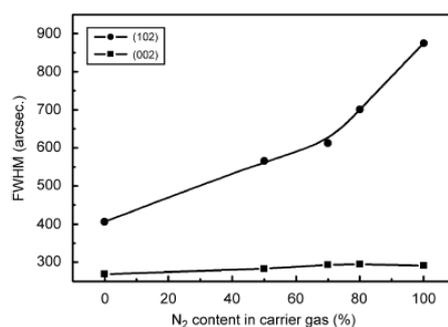


圖 A-9 不同 N₂ 比率對於 GaN XRD 半高寬(FWHM)的影響

參考資料：Reference 11

而 XRD 半高寬值變大，對應著晶格中線缺陷(Threading dislocation)密度增加；該研究中提到，(102)面半高寬的增加與邊緣缺陷(Edge dislocation)有關，而由於載流氣體組成會影響 GaN 初期接合機制(Coalescence phase)，

該研究中推論邊緣缺陷形成與此初期接合機制有關；此外，Fini[12]團隊也提及，HT-GaN 表面結構線缺陷密度與初期在低溫 GaN 成核層(LT-GaN NL) 上 HT-GaN 島狀物生成機制有關，如初期生成時有較高的 HT-GaN 島狀物密度(Island density)、較多島狀物邊界(Grain boundaries)及較短的接合時間，其後生成的 HT-GaN 薄膜會有較高的邊緣(Edge)及混合(Mixed)線缺陷密度；H.X. Wang[13]團隊也提到，較高的 N₂ 比例在 GaN 表面易形成 Hillock 結構，而提高 H₂ 比例則表面傾向形成平坦的鏡面(Mirror-like)結構。

Yong Suk Cho[11]團隊尚研究載流氣體混合比例對於 GaN 表面片電阻(Sheet resistance)的影響，如圖 A-10 所示，隨著 N₂ 比例成分的增加，片電阻有增加的趨勢，Yong Suk Cho 團隊歸因於邊緣缺陷的增加造成電子捕捉率(Capture rate)變高，間接造成電子濃度降低，提高 GaN 單位面積的電阻值，根據 Yong Suk Cho 實驗結果，在成長高溫 GaN 緩衝層時，提高 H₂ 成分比例有助於降低線缺陷密度、及提高 GaN 的導電性。

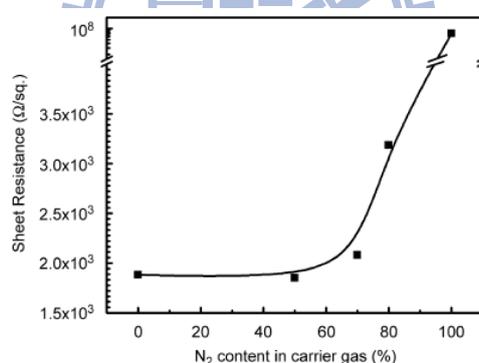


圖 A-10 不同 N₂ 比率對於 GaN 片電阻(Sheet resistance)影響
資料來源：Reference 11

Cho在其研究中提到，利用不同N₂/H₂混合比率可作為在高速電子遷移率電晶體(HEMT)運用中，控制GaN緩衝層中電阻率的調變參數。

【H₂/N₂(主載流管路為 H₂，混合氣體為 N₂)模式之管路氣體流向】

圖 A-11 為系統管路簡圖，該簡圖重點畫出混合氣體(Mixing carrier)、III 族管路(Group III)、V 族管路(Group V)等進入反應腔體中內襯層(Liner)的氣體管路；圖 A-11 顯示載流氣體切換成主載流管路為 H₂，混合載流氣體為模式 N₂ 時，N1/N2/H1/H2 等氣動閥對應狀態^{註1}及該狀態下系統管路中

載流氣體流向；其中腔體輔助管路、III、V 族、NH₃ 管路、Vent 管路皆通入 H₂ 做為載流源，此外 H₂ 亦通入 MO 分子冷浴槽(Bubbler)中，做為 MO 分子攜出過程所使用的載流源。而混合載流氣體 N₂ 則獨立於系統中氣體傳輸管路，單獨經由混合載流管路(Mixing carrier line)透過 *Forming Gas* 流量計決定其流量後，經由 III 族管路端匯入反應腔體中，如圖 A-11 橘色部分所示。

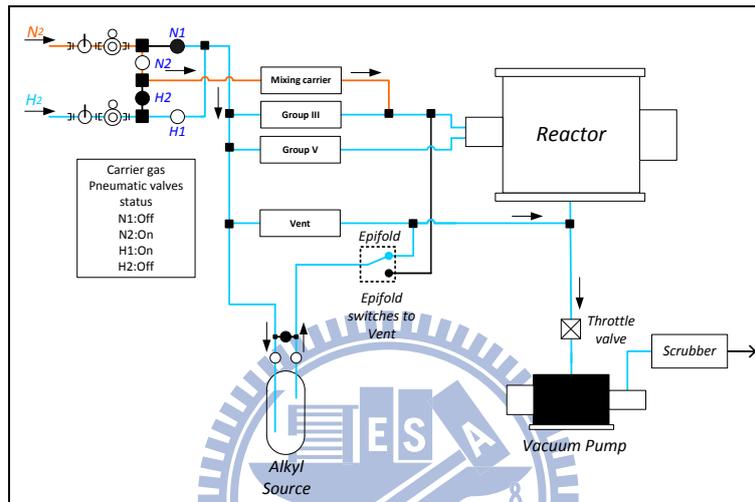


圖 A-11 主管路為 H₂，Mixing carrier gas 為 N₂ 之氣流分佈

註 1：詳細的載流氣體管路之氣動閥控制請參閱 A-4-2 WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計之主載流氣體源管路氣動閥邏輯章節。

註 2：WK2008 磊晶系統載流氣體使用量範圍約為 5~10SLM，以成長 GaN 緩衝層(GaN Buffer layer)所需 NH₃ 流量為 2SLM 來說(總流量 7SLM)，若 *Forming gas* 流量計全流量為 5000scm，以流量計有效範圍為 2%F.S.~98%F.S.來計算， N_2/H_2

可調變的比例範圍約為 2%~98%。

Total flow: 7SLM, NH ₃ =2SLM, Main carrier H ₂ : 5000scm		
	Min	Max
Mixing carrier N ₂ /5000	100	4900
N ₂ /H ₂	0.02	0.98

表 A-5 H₂/N₂(主載流管路為 H₂，混合氣體為 N₂)模式之 H₂/N₂ 計算

【排氣端(Vent)管路】

排氣端(Vent)管路為圖 A-1 中褐色部份所示，其為不進入反應腔體且直接連接至真空泵浦端的氣體管路，主要設計目的為提供有機金屬分子或 SiH_4 預流(Pre-flow)時，直接排至真空泵浦之路徑；此外 Vent 管路末端連結至腔體壓力控制系統之節流閥(Throttle valve)前端，目的為維持與 III、V 族管路、主載流管路、反應腔體間的壓力平衡。

2. 【V 族管路】

V 族管路為圖 A-1 中黃色部份所示，其主要設計目的為提供載流氣體預流，V 族分子(NH_3)則經由 V 族管路藉由載流氣體帶往反應腔體中；其中 V 族載流氣體源由 Run V 流量計決定其氣體流量。

在 WK2008 磊晶系統中，V 族分子源只有 NH_3 ，在 NH_3 管路(如圖 2-1 中粉紅色部分所示)設計中，基於 V/III 比範圍需求，設計有 $\text{NH}_3_Medium(5000)$ 及 $\text{NH}_3_Low(200)$ 兩台中小流量之流量計，且藉由 HY1s/HY2s/HY1g/HY2g 這 4 個氣動閥(Pneumatic valves)邏輯切換控制決定是否通入 NH_3 分子源及通入中或小流量之氣體流量計中。

NH_3 管路分為下列 3 種模式(下列 3 種模式皆以載流氣體為 N_2 為例)：

➤ 【潔淨(Purge)模式】

如圖 A-12 所示， NH_3 管路全為載流氣體，而未通入 NH_3 ，且中小流量計皆通入載流氣體；該狀態為潔淨 NH_3 管路用。

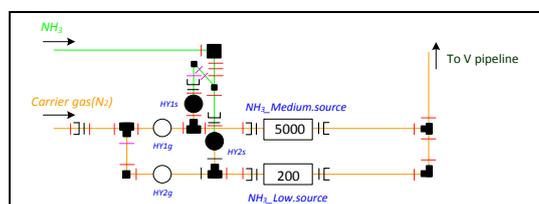


圖 A-12 NH_3 管路 Purge 狀態氣動閥狀態

➤ 【 NH_3 通入中流量計，小流量計通入載流氣體模式】

如圖 A-13 所示， NH_3 通入中流量計，小流量計則通入載流氣體，該模式 NH_3 用量範圍為 100~4900sccm，主要為提供高 V/III 比條件使用；在 WK2008 磊晶系統中，低溫 GaN 成核層(LT-GaN Nucleation layer)、高溫 GaN 緩衝層(HT-GaN Buffer layer)、全域組成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、高 V/III(>1000)條

件的 InN，皆是利用該 NH₃ 大流量模式下成長。

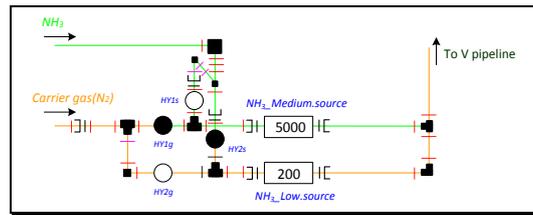


圖 A-13 NH₃ 通入中流量計時氣動閥對應狀態

➤ 【NH₃ 通入小流量計，中流量計通入載流氣體模式】

如圖 A-14 所示，NH₃ 通入小流量計，中流量計則通入載流氣體，該模式下 NH₃ 用量範圍為 4~196sccm，由於 NH₃ 用量極少，故該模式主要提供極低的 V/III 成長條件；在 WK2008 磊晶系統中，低 V/III(<1000) 成長條件的 InN，即使用該 NH₃ 小流量模式。

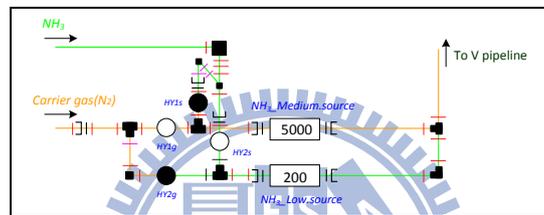


圖 A-14 NH₃ 通入小流量計時氣動閥對應狀態

在調變流率的長晶模式 (Flow rate Modulation Epitaxy, FME) 中，當 V 族 (NH₃) 流量切換時，WK2008 系統可利用 NH₃_Medium 及 NH₃_Low 等流量計交替切換其流量值 (功能類似 III 族管路的 SubIII 流量計)，可省去調變 RunV 流量計的流量值；其目的為維持 V 族進入反應腔體之總流量恆定，避免影響流線圖騰 (Flow pattern)，間接改變長晶條件。

註：詳細之 NH₃ 管路之氣動閥控制請參閱 A-4-2 WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計之 V 族氣體分子源管路之氣動閥邏輯章節。

【N 型摻雜源 (SiH₄) 管路】

WK2008 氣體傳輸管路中設計有 N 型摻雜源 (SiH₄) 管路，如圖 A-1 中綠色部分所示，藉由摻雜技術可增加樣品的載子濃度 (Carrier concentration)，而系統利用氣動閥切換控制 SiH₄ 分子源是否通入氣體管路中，其管路末端也接至氣體流向切換區 (Epifold)，提供其氣體走向切換。

在成長 III-V 族材料中，我們需要 IV 族來作為 N 型摻雜源，而 P 型摻雜源則可以利用 II 族。在 WK2008 磊晶系統設計中，我們利用 SiH₄ 當作 IV

族 N 型摻雜源， Cp_2Mg 有機金屬分子當做 II 族 P 型摻雜源。 Cp_2Mg 有機金屬分子源之管路設計如同 III 族有機金屬分子，而 IV 族 N 型摻雜源 SiH_4 之氣體管路有特別設計考量。在 III 族氮化物中，由於 N 型載子相較於 P 型載子活化能較低(差一個數量級)，也就是 N 型摻雜源獲得有效電子的活化效率較 P 型摻雜源獲得電洞活化效率來得高，故在 WK2008 磊晶系統設計上， Cp_2Mg 流量計(H_2 , 500sccm)較 SiH_4 (SiH_4 , 20sccm)流量計大上一個數量級之多， Cp_2Mg 即利用較大的流量值來提升有效摻雜量。相較於 P 型摻雜由於 N 型摻雜的分子源輸入流量對於摻雜電子濃度有極高之影響(活化效率較高)，些微的流量變化就足以造成電子濃度幾個數量級之變化，此對於元件電性影響極大，所以在設計 N 型摻雜分子源氣體流量應要有較大的可調變範圍；主要管路設計內容我們參考 AIXTRON Corp. AIX 200/4RF 機台之設計，如下例：

一個全流量為 100sccm 的流量計，一般可使用的流量範圍約 5%~95%F.S.，即 5~95sccm。如有 *Source*、*Dilute*、*Inject* 三台全流量各為 100sccm 之流量計，配置如圖 A-15 所示；

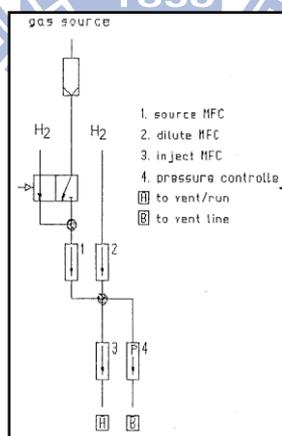


圖 A-15 AIXTRON 機台之摻雜分子源管路設計

該組合可做高流量調變，即

$$\text{Source} = 95, \text{Dilute} = 5 \text{ and } \text{Inject} = 95 \rightarrow \text{effective flow} = 95 \times \frac{95}{95+5} = 90.25\text{sccm}$$

或非常低的等效流量，即

$$\text{Source} = 5, \text{Dilute} = 95 \text{ and } \text{Inject} = 5 \rightarrow \text{effective flow} = 5 \times \frac{5}{5+95} = 0.25\text{sccm}$$

由上例知，藉由稀釋氣體方式，我們可以將流量計的可調變倍率由原先的 100 倍放大至 360 倍。

AIXTRON 200/4RF 機型 SiH_4 管路使用的 *Source*、*Dilute*、*Inject* 流量計大小各別為 10、10、2000sccm，該設計中 SiH_4 可調變流量範圍約為： $1.315 \times 10^{-4} \sim 8.24 \times 10^{-1} \text{sccm}$ ，放大倍率約為 6266 倍。

圖 A-16 為 THOMAS SWAN 機台 SiH_4 管路設計，該設計中 SiH_4 可調變流量範圍約為： $2.6 \times 10^{-2} \sim 62.241 \text{sccm}$ ，放大倍率約為 2394 倍。

註：流量計操作範圍皆取 5%F.S.~95%F.S.作為計算。

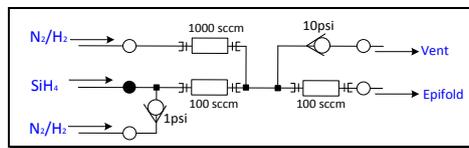


圖 A-16 THOMAS SWAN 機台之摻雜分子源管路設計

WK2008 磊晶系統中 N 型摻雜源(SiH_4)管路端設計如圖 A-17 所示。

其管路主要由 SiH_4_Source 、 SiH_4_Dilute 、 SiH_4_Inject 等 3 台流量計所組成， SiH_4_Source 決定初始流量， SiH_4_Dilute 及 SiH_4_Inject 可決定稀釋程度，多餘氣體則透過 20psi 的止逆閥連結至 Vent 端排放。

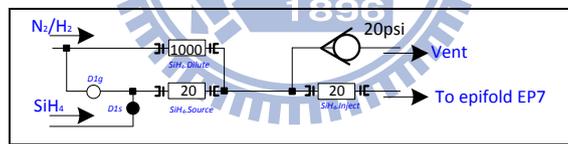


圖 A-17 WK2008 系統 N 型摻雜源(SiH_4)氣體管路設計

表A-6為不同機台之間 SiH_4 流量設定與N-type GaN摻雜電子濃度關係比較，因為 SiH_4 氣體具有毒性、腐蝕性、爆炸性^{註2}，在安全性的考量上，在儲存時需加入惰性氣體稀釋，如Ar、He、Xe、 N_2 等氣體；故在計算 SiH_4 等效莫耳流率時，需再乘上稀釋係數(Diltion rate, %)，表A-6亦附上各式機台間 SiH_4 鋼瓶/儲存槽的稀釋係數。

註 1：一般 n-GaN 摻雜電子濃度約為 $10^{17} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ ，且莫耳流率約為數個到數百 nmole/min 。

註 2： SiH_4 爆炸上下限(Flammability limit)各為 1.4 及 96%(Volume)。

Unit: sccm	Source flow	Dilute flow	Inject flow	Pressure (mbar)	Effective flow	Amp.	Dilution rate (%)	Mole flow (nmole/min)	n-GaN Carrier concentration (cm^{-3})
中科院	8	1000	8	1800		6			$1\sim 2\times 10^{17}$
Aixtron	20	1000	20	1800					5×10^{18}
Thomas Swan	10	1000	90	×	4.45×10^{-2}	×	5	1.99	5.8×10^{18}

表 A-6 N 型摻雜源(SiH_4)流量設定與 n-GaN 載子濃度關係表

3. 【III 族管路】

III 族管路如圖 A-1 中藍色部分所示，其設計理念如同 V 族管路，目的都是提供載流氣體預流，將需要通入反應腔體之有機金屬分子(包含 III 族或 II 族有機金屬分子)帶入反應腔體中；而 III 族管路載流氣體流量由 *Run III* 流量計決定。如此將 III、V 族氣體傳輸管路分開且獨立接至腔體，可避免反應物在未進入腔體前即已先行反應，以致於生成副產物附著於氣體管壁上，進而污染管路。

註：在 III 族管路端另有設計 *Sub III* 流量計，其目的為在調變流率之長晶模式(Flow rate Modulation Epitaxy, FME)中，於 III 族分子源切換間，補足在流量調變時所減少的 III 族氣體流量，維持 III 族端進反應腔之總流量恆定，避免流量擾動產生紊流(Turbulence)或造成腔體壓力變化，間接使其長晶條件有所改變。

【有機金屬分子源(MO Source)管路】

WK2008 磊晶系統中個別有機金屬分子源^{註1}皆有其獨立傳輸管路，且藉由氣動閥切換控制決定是否帶出有機金屬分子；其管路末端個別獨立接至所屬的氣體流向切換區(Epifold)，以提供進反應腔體(經由 III 族管路)或排 Vent 端切換。

圖 A-18 為典型有機金屬分子源(MO 分子)管路設計，主要由主管路、MO 分子冷浴儲存槽(Bubbler)、氣體流向切換區等管路所構成；主管路(Mainline)之載流氣體經由流量計(MFC)進入 MO 分子源管路，而所配置的流量計，其目的為決定通入 MO 分子儲存槽的載流氣體莫耳流率，而 MO

分子儲存槽出口端所配置的上游(Upstream)壓力控制器，其目的為控制 MO 分子冷浴儲存槽內壓力^{註 2}；最後管路末端接至氣體流向切換區，可供進反應腔或排 Vent 端切換。

一般有機金屬分子源為固態或液態狀，並儲存在冷浴槽(Bubbler)中，而揮發的氣態有機金屬分子在儲存槽中具有在該溫度下之氣體飽和蒸汽壓(Equilibrium Vapor Pressure)；而氣態 MO 分子則藉由載流氣體所攜出，而 MO 分子管路可依是否攜出 MO 分子區分為兩種模式，如圖 A-18 所示；圖 A-18(b)即為攜出 MO 分子的管路狀態，當常閉型(N.C.)氣動閥狀態切換(開啟)時，特定流量的載流氣體通入 MO 分子冷浴儲存槽中並將 MO 分子蒸氣攜出，而經由壓力控制器決定區域管路(圖 A-18(b)紅色區域所示)壓力後，混合氣體即通往下游 Epifold 端，再由 Epifold 端的氣動閥邏輯切換控制選擇通入反應腔或排至 Vent 管路端。

而另外銜接之旁路管路(Bypass pipeline)，如圖 A-18(a)橫向管路，其目的為在磊晶成長前，在控制有機金屬分子源端的常閉型氣動閥尚未開啟時，先以旁路(Bypass)載流氣體通入流量計中穩定其訊號，管路狀態如圖 A-18(a)所示；待其訊號穩定後再將控制有機金屬分子源端氣動閥打開，同時關閉旁路管路端之常開型(N.O.)氣動閥，使得反應氣體源在反應腔中之流量保持穩定；此外該旁路管路可維持氣體持續流動，同時也具有潔淨(Purge)管路的功用，系統閒置時，即維持該管路潔淨狀態。

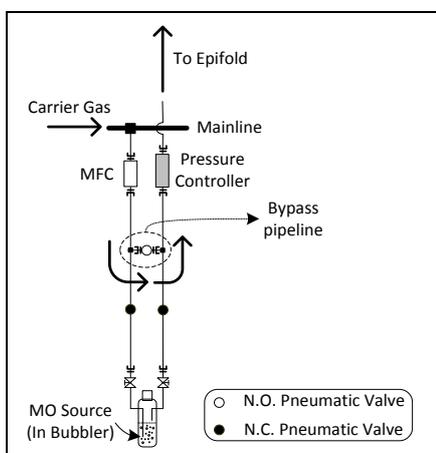


圖 A-18(a)不帶 MO Source，保持氣流穩定

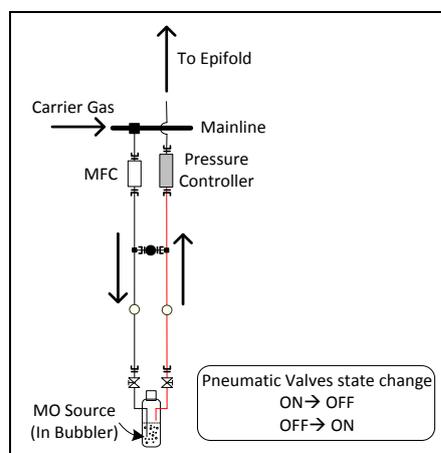


圖 A-18(b)帶 MO Source，氣動閥狀態切換

註 1：有機金屬分子包含 III 族及作 P 型摻雜的 II 族 $((C_5H_5)_2Mg, Cp_2Mg)$ 。

註 2：我們可藉由這兩項參數(載流氣體通入流量及有機金屬分子儲存槽內總壓力)推算出實際有機金屬分子的氣相莫耳流率，詳細推導請參閱附錄 G G-C。

在 WK2008 磊晶系統中，有機金屬分子源如 TEGa, TMIn, TMAI, Cp₂Mg 等氣體管路皆是這樣的設計理念。較為特別是 TMGa 之氣體管路，由於 TMGa 有較高之氣體飽和蒸汽壓(相較於 TEGa, TMIn, TMAI 之有機金屬分子源，其飽和蒸汽壓在相同溫度點比較下，約大 1 個數量級)，其所需攜帶的載流氣體流量可以較低(WK2008 磊晶系統 III 族分子流量計設計：*TMGa(H) MFC* : 20sccm, *TMGa(L) MFC* : 2sccm ; *TMIn MFC* : 300sccm)，但是如此低的載流氣體流量卻會造成在氣體傳輸的過程中，其氣體傳輸時間(Transient time)過長，造成反應腔端的 TMGa 氣體分子流量變化過於緩慢，這在要求快速反應的長晶過程中，如：調變流率之長晶模式(Flow-rate Modulation Epitaxy, FME)， δ -參雜(Delta-Doping)，多層量子井結構(MQWs, Multiple Quantum Wells)有極大之影響。為了克服這般嚴重影響，在 TMGa 分子源管路末端^註加入一個有較大流量之流量計(*TMGa(Push) MFC* : 500sccm)，以加速其氣體傳輸速度，系統中 TMGa 管路設計如圖 A-19 所示。

註：Push 流量計功用僅為加速氣體傳輸，由於前端流量計(通入 MO 分子冷浴儲存槽中)為決定 III 族分子源莫耳流率，如將 Push 流量計加在管路前端則會影響攜出的 MO 分子莫耳流率，造成錯誤設計；故 Push 流量計僅能加在 MO 分子冷浴儲存槽的出口端，如圖 A-19 所示。

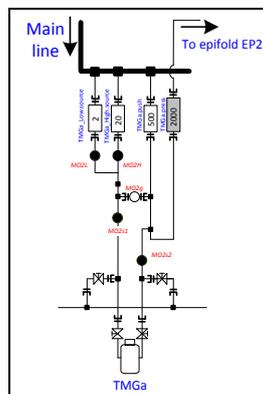


圖 A-19 有機金屬分子源 TMGa(MO₂)管路設計

另外由於儲存有機金屬分子源為較低溫之環境(TMGa 恆溫槽溫度:5°C),當 MO 氣體分子流經較高溫之 Epifold 端(氣體混合區),可能會造成其他反應物在氣體混合管路中冷凝(Condensation),加入 *Push* 流量計可以將有機金屬分子源稀釋,以降低其露點溫度(Dew point),以避免造成在較高溫環境中,造成反應物在管路中冷凝,影響氣體傳輸;此外加入 *Push* 流量計還有一個好處就是在 III 族氣體切換時,如要維持 III 族進反應腔體的總氣體莫耳流量恆定,可藉由 *Push* 流量計來補足差值,可省去調變 *Run III* 之流量值。

註: III、V 族管路設計差異

1. III 族管路中需要得知管路末端壓力值來決定其有機金屬分子莫耳流率(詳見附錄 E E-C),所以在 III 族氣體管路設計上需在有機金屬分子源管路末端加入壓力控制器以決定其莫耳流率;而由於 V 族分子源已全為氣體分子,無飽和蒸汽壓之問題,且氣體分子濃度不會因壓力變化而改變,所以在 VMB(未進入系統管路的氣體分盤,有手動閥、調壓閥等閥件)中之壓力變化下,並不會改變其分子濃度及分子莫耳數,故 V 族分子源管路端不需設計壓力控制器。
2. III、V 族分子直到反應腔中石英內襯層(Quartz Liner)入口端才相互混合,避免 III、V 族在氣體傳輸管路中發生副反應,附著於氣體管壁內。
3. V 族管路接至反應腔體入口端下方,III 族管路則接至反應腔體入口端上方,由於有機金屬分子較 V 族氫化物為重(分子量差異),如此設計可藉由重力使 III、V 族均勻混合。

【氣體流向切換區(Epifold)】

個別之有機金屬分子源和 N 型摻雜源(SiH_4)管路末端皆有其獨立的管路氣體流向切換(Epifold),如圖 A-20 所示;可藉由控制程式經由電磁控制系統,決定氣體走向為通入反應腔體或經由 Vent 管路排放至真空幫浦。此外維持 Vent 管路、III、V 族管路、反應腔體間的壓力平衡可避免在氣體走向切換時,由於壓力差造成氣流擾動,間接影響成長環境。

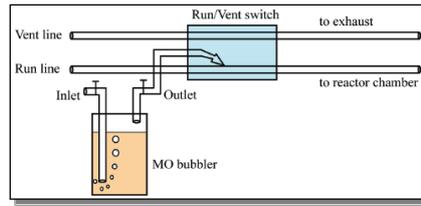


圖 A-20 Epifold 簡易示意圖

設計 Epifold 主要目的為降低有機金屬分子(MO Source, Precursor)的傳輸暫態影響，MO 分子一般為固態或液態方式儲存於鋼瓶內，且分子源部分揮發為氣態分子，且在鋼瓶內具有該溫度下的飽和蒸汽分壓，而 MOCVD 系統則利用載流氣體攜出氣態 MO 分子進入腔體中反應；在載流氣體一開始通入時，鋼瓶內的 MO 分子氣態分壓尚處於不穩定態，如果直接通入反應腔體中，在估算 MO 分子莫耳流率時，會造成誤差，間接影響實際氣體組成；故在 MO 分子通入腔體之前，先將帶有 MO 分子之氣流切換至排氣端(Epifold switches to Vent)，作為氣體預流用；待 MO 氣態分子分壓穩定後，才將反應物通入腔體內(Epifold switches to Reactor)；如此複合設計更能精確控制氣體組成。

Epifold 設計在量子井(Quantum Wells)結構中具有關鍵性影響，由於單層量子井結構通常厚度極薄(約為幾個奈米)，快速的反應分子源切換是極為必需的，而 MO 分子在管路中的傳輸暫態與其所需的穩定時間皆會影響其結構組成；例如成長 $\text{GaN}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 多層量子井結構，可先將 TMGa、TMIn 通往 Vent 管路預流，待 MO 分子氣態分壓穩定後，再開始後續成長；當成長 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Well 時，直接將 TMGa、TMIn 氣流方向切換至通入反應腔；而成長 GaN 覆蓋層(Barrier)時，只需將 TMIn 氣流方向切換至 Vent 即可，如此作法可降低 MO 分子的傳輸暫態及穩定時間。

註 1：MO 分子氣態蒸汽壓穩定時間與 MO 分子種類、載流氣體流量、Bubbler 溫度有關，通常固態穩定時間會較液態久。

表 A-7 為典型 MO 分子所需的穩定時間，s：固態，l：液態。

MO Source	Transient time (min)
TMGa _(l)	2.5
TEGa _(l)	2.5
TMAI _(l)	3
TMIn _(s)	5
Cp ₂ Mg _(s)	200

表 A-7 典型 MO 分子所需的穩定時間

註 2：在 V 族分子(NH₃)管路末端未有 Epifold 之設計，主要理由為 NH₃ 分子在進入系統管路前，已先經由純化器純化且無蒸氣態分壓穩定問題，所以無需設計 Epifold 作為預流用，而 N 型摻雜分子(SiH₄)管路末端有 Epifold 設計；由於 SiH₄ 一般在 MOCVD 系統中用量極小，所以不需設計純化器來純化，故在管路上必需設計 Epifold 作為 SiH₄ 在通入腔體前的預流用，以提高其氣體純度。

4. 【腔體輔助氣體管路】

腔體輔助氣體管路包含 Rotation、Graphite Purge、Heating RF Purge 等管路，如圖 A-1 中紅色部分所示；個別管路有其特定設計需求，且腔體輔助管路中所通入的氣流源為載流氣體。

WK2008 反應腔體內部分為上、中、下三層，如圖 A-1 中反應腔體(Reactor)圖示，在腔體中層與層間利用石英板做為主要區格，反應腔體中所有分層末端出口皆透過真空系統管路且經由節流閥(Throttle valve)連接至真空泵浦；隔層間末端共接點設計可使層與層間達到壓力平衡。

III(或 Cp₂Mg)、V 族(或 SiH₄)反應物各別經由 III 族，V 族管路通入位於腔體中層之石英內襯層內(Quartz Liner)，而為維持層與層之間的氣流壓力平衡，故各別設計獨立管路通至腔體不同層中，其中 Heating RF purge 管路接至腔體中上、下分層內，而管路中氣體流量則由旋鈕式流量計(Metering MFC)決定；反應腔體中間分層(即石英內襯層與上下兩片石英隔板間)的 Purge 氣體，則由主氣流管路末端提供，且透過 Liner Purge 流量計決定其氣體流量。

Graphite purge 及 Rotation 管路則各別接至上、下石墨晶舟(Graphite Susceptor^{註 1})內，Graphite purge 管路設計目的為防止反應物附著(Coating)

在石英內襯層上側；而 Rotation 管路設計目的為提供位於下石墨晶舟上之待成長晶圓(Wafer)氣浮式旋轉機制中的所需氣體^{註2}。

腔體輔助管路另有設計為提供 III、V 族管路進氣端接頭氣密及反應腔體末端(連結至手套傳輸箱)閥門氣密用的管路，其中 III、V 族管路進氣端接頭及反應腔體末端閥門皆有雙 O 型環(Double O-rings)之設計，利用真空泵浦將雙 O 型環間隙間氣體抽走，利用壓力差達到接頭密合作用；而腔體末端閥門開啟則通入氣體至雙 O 型環間隙中，以便開啟閥門，其中藉由氣動閥控制其腔體閥門開關。

註：

1. 石墨晶舟(Graphite susceptor)位於石英內襯層內，可透過鎢絲燈(Tungsten lamp)輻射紅外線(IR)加熱或 RF 高週波感應加熱，一般石墨晶舟會在表層鍍上 SiC(SiC Coating)作為石墨氧化阻隔層(Oxidation resistance)，厚度約為 100~200 μm ，以避免 NH_3 及 H_2 侵蝕石墨本體。
2. WK2008 磊晶系統為水平式反應腔，氣體在石墨晶舟(Graphite Susceptor)上方為水平傳輸，如此反應方式較垂直式反應腔不均勻(受熱也較不均勻)，為了達到晶片成長方向均勻，在石墨晶舟上方設計氣浮式旋轉盤，可以利用氣體提供其晶片旋轉，使反應介面有較均勻的長晶條件，而 *Disk Rotation* 流量計可以決定此氣體流量，控制其載體轉速，WK2008 磊晶系統配置全流量為 500sccm 之 *Disk Rotation* 流量計，250sccm 約可提供每分鐘 70~80 轉(rpm)。
3. MOCVD 反應腔設計依據進氣方向可分為水平式(Horizontal)及垂直式(Vertical)反應腔，如圖 A-20(a)~(b)所示。

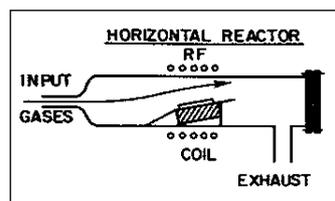


圖 A-20(a) 水平式反應腔

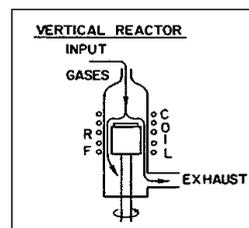


圖 A-20(b) 垂直式反應腔

雖然水平式與垂直式腔體進氣方向不同，但必須維持在晶片上方形成側向層流(Lateral laminar flow)，以利形成流向穩定的滯留層(Boundary layer)；由於

流體分布行為不同，一般水平式轉速約為 60~80 轉(rpm)，而垂直式轉速則約為 500~2000 轉(rpm)。

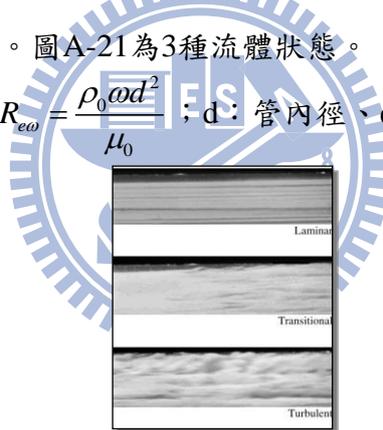
在晶片表面上主導氣流分布可分為兩種對流行為：

I. 強迫對流(Forced convection)

強迫對流可利用雷諾數(Reynold's number, $R_e = \frac{\rho_0 v_0 d}{\mu_0}$ ， ρ_0 ：氣體密度、 v_0 ：

氣體流速、 d ：管內徑、 μ_0 ：氣體黏滯係數，其中 ρ 、 v 、 μ 皆為溫度函數)來評估流體狀態，雷諾數可視為氣體流場中慣性力與黏滯力比值的量度。雷諾數較小時，黏滯力對流場影響大於慣性力，流場中流速擾動會因黏滯力而衰減，氣體流動穩定，為層流；反之若雷諾數較大時，慣性力對流場影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展，增強，形成紊亂、不規則的湍流流場。一般來說 $R_e < 2100$ 為層流狀態， $R_e > 4000$ 為湍流狀態， R_e 介於2100~4000為過渡狀態。圖A-21為3種流體狀態。

定義旋轉雷諾數 $R_{e\omega}$ ， $R_{e\omega} = \frac{\rho_0 \omega d^2}{\mu_0}$ ； d ：管內徑、 ω ：轉動角速度。



圖A-21 層流(Laminar)、過渡流(Transitional)、擾流(Turbulence)示意圖

II. 自然對流(Natural convection)

由於靠近晶片表面的氣流溫度高於氣流均溫，越靠近晶片表面的氣體密度越低，會造成因為熱浮力(Buoyancy)引起的鉛直方向迴流(recirculation)，該狀態可用Grashof值來量化。

$$\text{Grashof number, } G_r = \frac{\beta \rho_0^2 g H^3 (t_s - t_0)}{\mu_0^2} \quad \text{where } \beta = \frac{-1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

β ：氣體熱膨脹係數。

ρ_0 ：氣體密度。

g ：重力加速度。

H：氣流進氣端與晶片表面的特徵距離。

t_s ：晶片表面溫度。

t_0 ：腔體內部流場均溫。

μ_0 ：氣體在晶片表面的黏滯係數。

若不考慮反應氣體隨不同溫度而產生的密度變化，可將 G_r 改寫成：

$$\beta = \frac{1}{t_0} \Rightarrow G_r = \frac{\beta \rho_0^2 g H^3 (t_s - t_0)}{t_0 \mu_0^2} \quad (\text{A-8})$$

在衡量熱浮力在壓力驅動流場中的相對強度上，常用混合對流參數(Mixing convention, $\frac{G_r}{R_e^m}$ $m=1,2,1.5$ 、 $\frac{G_r}{R_e \cdot R_{e\omega}}$ 、 $\frac{R_{e\omega}}{R_e^2}$)做為指標，用以分析不同轉速、

氣體流量、腔體壓力、加熱溫度對於晶片表面氣流的分布狀態(不在本論文討論範圍)，藉由流場分析可得到形成穩定層流的最佳轉速區間；根據分析結果，在臨界轉速(ω_c)附近可獲得最佳的均勻度及成長率[14]。

而垂直式反應腔轉速較高的原因應為自然對流(Buoyancy induced)對於垂直式腔體內流場有較大的影響，較水平式易於產生無次序的氣體迴流(Disordered recirculation)，所以需提高轉速以加快晶片表面的氣體軸向(radial)速度，以減低自然對流在晶片表面所造成的流場擾動；但轉速不可過高，過高轉速可能會造成紊流(Turbulence)。

4. 晶片旋轉轉速愈高($\omega \leq \omega_c$)，相對的成長速率(Growth rate)就愈快。由於一般MOCVD 晶體成長溫度控制於質傳區(Mass transport regime)，所謂質傳區意指成長速率較不受溫度變化而改變的區間，而在此狀態下，長晶介面幾乎接近熱平衡狀態。在質傳區中，固氣相介面(Solid-Vapor interface)反應速率大於氣相反應物傳輸速率，而成長速率主要受限於氣相原料在固氣相介面上方邊界層(Boundary layer)中的擴散(濃度梯度差致使)速率，而根據邊界層模型中對於水平式反應腔的邊界層厚度(δ)推估如式(A-9)：

$$\delta \approx 4 \cdot \left(\frac{\eta}{\omega} \right)^{1/2} \quad (\text{A-9})$$

其中 η : 反應物的氣體黏滯係數(cm^2/sec) , ω : 轉速角頻率(rad/sec) 。由式

A-9 中可發現當轉速提高, 邊界層厚度(δ)會相對變薄; 而邊界層厚度變薄相對地加快反應物在邊界層中的擴散速率, 進而提高反應速率。

$$\text{擴散通量}(J_1) : J_1 = D_g \frac{\Delta C}{\Delta y} \cong \frac{D_g}{\delta_m} (C_g - C_s) ,$$

$$\text{又 } PV = nRT \Rightarrow C = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$\Rightarrow J_1 = D_g \frac{\Delta C}{\Delta y} \cong \frac{D_g}{\delta_m RT} (P^0 - P^i) .$$

J_1 ($\text{mole}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) : 反應物擴散通量(Diffusion Flux)。

D_g (m^2/s) : 氣相擴散係數(Gas Phase Diffusion Coefficient)。

δ_m : 滯留層平均厚度(m)。

C_g 、 C_s : 主氣流與晶片表面反應物氣體濃度(mole/cm^3)。

P^0 、 P^i : 主氣流和晶片表面之反應物氣體分壓。

由於在質傳區中表面反應快速, P^i 可近似為 0, 故擴散通量和滯留層厚度成反比($J_1 \propto \frac{1}{\delta_m}$)。

$$\text{質傳區反應速率} : v_e \left(\frac{\text{nm}}{\text{s}} \right) = D_g \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \cdot \frac{M_g}{C_0 \delta_m} \propto J = \frac{D_g (P^0 - P^i)}{RT \delta_m} .$$

E_d (eV) : 擴散所需之能量。

M_g (mole/cm^3) : 反應分子源的通入濃度。

C_0 (atoms/cm^3) : 單位體積內原子數目。

J : 通入的反應氣體分子濃度通量。

質傳區反應速率和滯留層厚度成反比($v_e \propto \frac{1}{\delta_m}$)。

邊界層厚度簡易推估詳見附錄 G G-I。

A-1-2 【真空系統管路】

WK2008 真空系統主要由 MKS 651C 腔體壓力控制器、節流閥或稱蝶型閥)(Throttle valve, Butterfly valve)、真空泵浦(Vacuum Pump)、粒子過濾器(Particle trap)、逆止閥(Check valve)、Particle 及 Exhaust 等氣動閥所構成，主要為建立腔體低壓環境，及使系統內氣流形成穩定的單一流向，其中壓力控制系統則利用調節節流閥的開口度來控制反應腔體壓力。此外腔體出口端及 Vent 端管路接至節流閥前端，其目的為維持 Vent 管路與 III、V 族管路及反應腔體間的壓力平衡；粒子過濾器之設計為過濾流經腔體內的氣體中較為大型的粒子或粉塵，以避免異物傷及真空泵浦葉片；Exhaust 氣動閥開關設計邏輯與真空泵浦開關相同，其目的為避免當真空泵浦關閉時，泵浦內的潤滑油蒸氣回流至真空系統管路中，間接污染管路；逆止閥為單向導通閥(One way valve)，其設計為當系統閒置時(此時腔體壓力與室壓平衡)，確保氣體不逆流，以防止大氣倒灌至腔體內部；其中逆止閥順向壓力差總和設計為 100mbar，其目的為控制腔體壓力上限值為(室壓+95mbar)，典型值約為 1070mbar；由於 III 族壓力控制器於系統閒置時一般設置為 1200mbar，為避免腔體內氣體逆流回 III 族 MO 分子管路中，故限制腔體壓力上限需低於 1200mbar；圖 A-22 為系統閒置(Idle)時真空系統中的氣體走向；此時 Particle 氣動閥關閉，腔體內氣體不經粒子過濾器，節流閥關閉，真空泵浦及 Exhaust 氣動閥關閉，通入反應腔及 Vent 管路的潔淨氣體(Purge gas)經由逆止閥排至大氣中(Extract)。

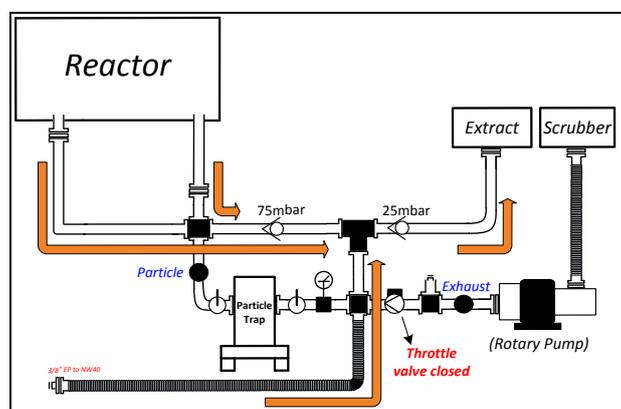


圖 A-22 系統閒置(idle)狀態之真空系統氣體走向

圖 A-23 為系統成長樣品(低壓)時真空系統中的氣體走向；此時真空泵浦啟動、Particle 及 Exhaust 氣動閥開啟，腔體內氣體先流經粒子過濾器過濾粉塵後再流至真空泵浦內；節流閥開啟，而節流閥在不同腔體壓力時，會有其相對應的開口度(%)。

真空系統操作在低壓狀態時，一般來說，粒子過濾器其進/出口端壓力差約為+25~45mbar；而由於壓力差未達 70mbar，故氣體不會流經 70mbar 逆止閥旁路(Bypass)管路(NW40 Fitting)，但如果粒子過濾器發生堵塞(Particle trap blocked)時，其進/出口端壓力差可能會大於 70mbar，此時由於真空系統內管路氣流排放不及，間接造成腔體壓力上升；而旁路管路的設計目的即為當發生粒子過濾器堵塞時，腔體內多餘氣體可即時經由旁路管路排放至真空泵浦，避免腔體內部壓力產生擾動，逆止閥壓力差規格的考量為限制粒子過濾器進/出口端壓力差上限值在 70mbar，而該逆止閥壓力差規格也不可低於 30mbar，否則會造成粒子過濾器失去過濾功效。

註：WK2008 真空系統設計中，粒子過濾器出口端設計有負壓型壓力表(Gauge)，如果系統在低壓狀態時，腔體中壓力感測器(Transducer)壓力值與該表壓讀值的相差值約為+70~75mbar 時，需在該次運轉(Run)結束後清理粒子過濾器。

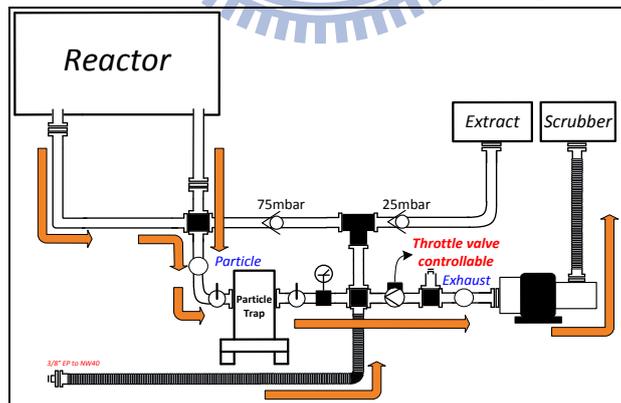


圖 A-23 系統長晶狀態(Run)之真空系統氣體走向

A-1-3 【有機金屬分子源手閥端測漏管路】

WK2008 系統的氣體傳輸管路中，共設計有 3 個氦氣測漏點，分別為 L1~L3。L1 位於主要載流氣體管路上，L2 位於有機金屬分子源手閥端管路(如圖 A-1 中紫色管路)上，L3 則位於節流閥後端與真空幫浦進口端間。

設計 MO 分子源手閥端(L2 測漏點)測漏管路主要目的為當更換有機金屬分子源時，提供分子源接頭端(VCR Fitting)測漏，詳細管路測漏，請參閱附錄 G G-H。

A-2 WK2008 磊晶系統硬體傳輸介面配置

A-2-1 【WK2008 磊晶系統硬體傳輸介面配置】

系統硬體介面配置，如圖 A-24 所示；使用了 SIC 氣體流量控制器(Mass Flow Controller, MFC)、EUROTHERM 溫度控制器(Temperature controller)、MKS 腔體壓力控制器(MKS pressure controller)、Bronkhorst 之 III 族，SiH₄ 下游氣體壓力控制器(Pressure controller)及 TMGa(L)氣體流量計、SMC 氣動閥供氣端壓力偵測器、研華(ADVANTECH)之介面控制卡(PCI-1739U、PCI-1620A)。

在 WK2008 磊晶系統中，工業級電腦裡共配置了 2 張研華提供的介面控制卡(ADVANTECH--PCI-1739U，PCI-1739U 電氣規格參閱 A-5-1 【氣動閥控制設計概念】)，及 4 張研華之 RS-232 介面通訊卡(ADVANTECH--PCI-1620A，PCI-1620A 規格參閱附錄 G G-D)。

其中 PCI-1739U 為 48 埠(port)之數位訊號輸入/輸出介面卡，而 PCI-1620A 為一提供 8 個獨立且可供序列(Parallel)傳輸之 RS-232 通訊埠的介面卡。使用 PCI-1739U 介面卡目的為輸出 TTL 0/5V(邏輯 0/邏輯 1)的數位訊號，藉由輸出的數位訊號獨立控制 48 個氣動閥開關，詳細之氣動閥控制流程硬體規劃請參閱 2-5 氣動閥控制流程規劃；另外，真空泵浦之開關控制、系統狀態指示燈號(Alarm signal)，及氣動閥供氣端壓力值之偵測輸入，皆利用 PCI-1739U 來達到控制及偵測。

在 WK2008 控制系統中，所有的儀器(包含 20 台氣體流量計(Mass Flow Controller, MFC)、6 台 III 族下游氣體壓力控制器、1 台 SiH₄ 末端管路壓力控制器，1 台反應腔體壓力控制器、2 台溫度控制器，1 台溫度偵測器，1 台不斷電系統)都是藉由 RS-232 通訊協定(RS-232 通訊協定簡介參閱 附錄 G G-B)做為電腦與儀器間的通訊介面，所有硬體皆各自有其獨立之通訊埠編號(Com port number)，由於 RS-232 通訊協定為一非同步的資料傳輸(Asynchronous data transfer)，利用 PCI-1620A RS-232 通訊介面卡可以達到通訊埠之間的資料同步(Data synchronization)；在我們撰寫流量計通訊程式區塊時，藉由 PCI-1620A 可以達到在 0.1 秒內將所有要寫入流量計的資料傳出至個別硬體中。

詳細的通訊埠和硬體間配置如圖 A-24 所示。



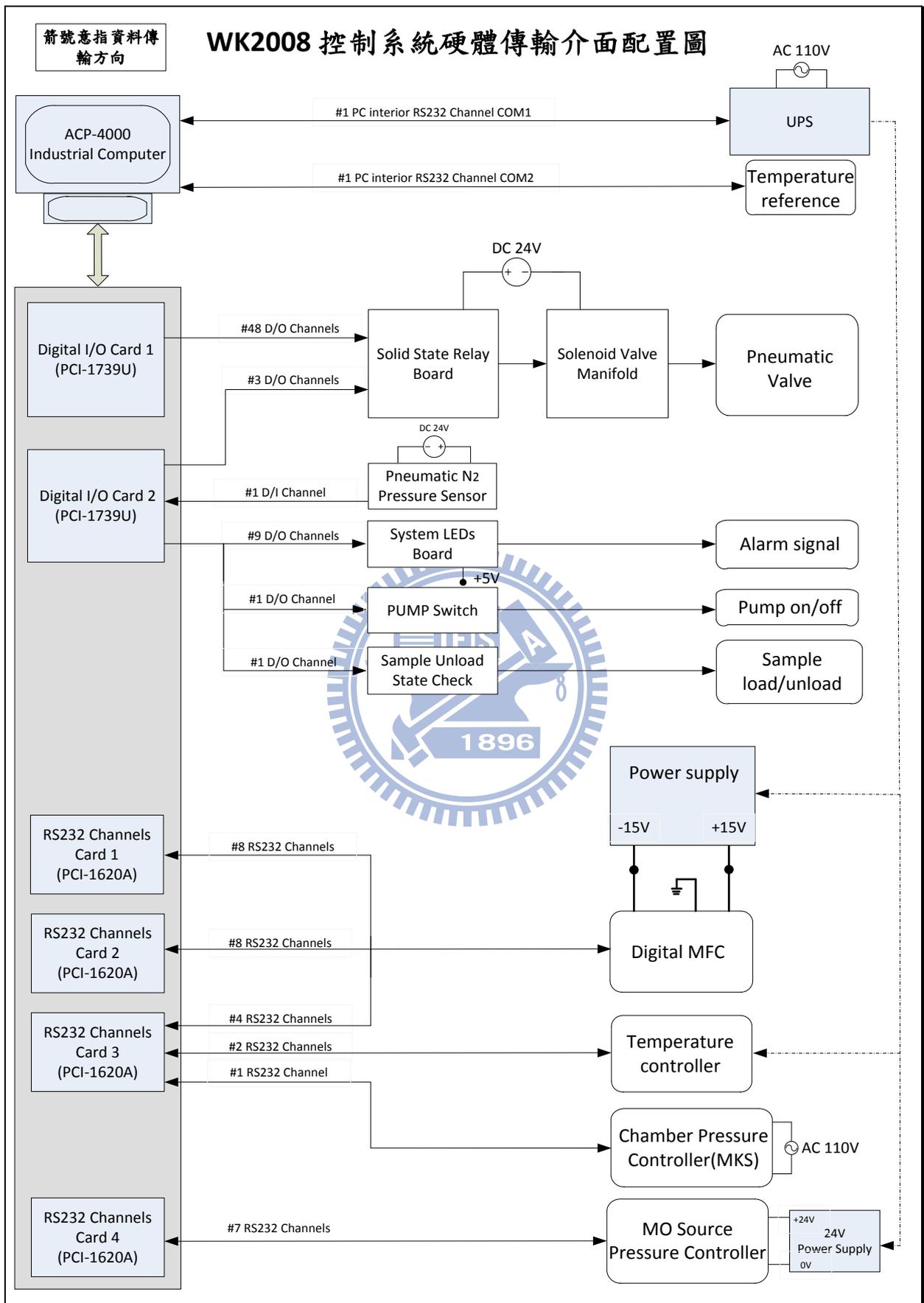


圖 A-24 WK2008 磊晶控制系統硬體傳輸介面配置圖

A-2-2 【WK2008 磊晶系統硬體配置及其規格表】

WK2008 磊晶控制系統主要的硬體配置可分為系統工業級電腦，介面控制卡，氣體流量控制器(Mass flow controller, MFC)，有機金屬分子源上游氣體壓力控制器(Pressure controller)，正負直流電源供應器($\pm 15\text{VDC}$)，24V 直流電源供應器，電磁閥(Solenoid valve)，固態繼電器(Solid State Relay, SSR)，腔體溫度控制器，腔體壓力控制器，不斷電系統(UPS)，及位於氣動閥進氣端調壓閥上的數位式壓力表頭開關(Digital pressure switch)；個別硬體之簡易規格、型號，及供應廠商資訊如表 A-8 所示。

註：供應廠商資料中，星號(*)顯示為台灣區代理商，無星號即台灣廠商。

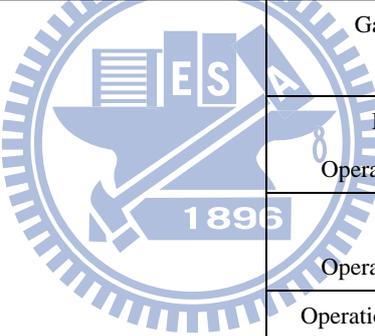


WK2008 磊晶控制系統簡易硬體規格表

品項	廠牌	產品型號	簡易規格	
系統工業電腦(Industrial Computer)				
外殼 背板 主機板	ADVANTECH(研華)	ACP-4000BP-30ZE	ACP-4000BP w/o BP With 300W P/S RoHS	
	ADVANTECH(研華)	PCA-6114P10-0B2E	14 slot PICMG BP,2ISA,10PCI,2PICMG RoHS	
CPU 記憶體	ADVANTECH (研華)	PCA-6194VG-00A1E	LGA775 FSBC with VGA/GbE LAN/HISA, RoHS 1VGA,1LAN,2COM,6USB	
	Intel(英特爾)	Intel CORE2 2.13G	INTEL CR2 DUO DT 2.13G 1KF 2M 775P TY(G)	
	Transcend(創見)	DDRII RAM 1G*2	1G DDR2-667MHz 240P 64x8(G)	
介面控制卡(Interface Control Card)				
Digital I/O 控制卡 ×2	ADVANTECH (研華)	PCI-1739U	48 Channels TTL Digital I/O Universal PCI card Logic 0(0V)/1(5V) Output status read-back	
RS232 通訊控制卡 ×4	ADVANTECH (研華)	PCI-1620A	8 ports RS232 PCI Communication Card Speeds Up to 921.6kbps Universal PCI(Supports 3.3V or 5V bus signal)	
氣體流量控制器(Mass Flow Controller)				
數位式 氣體流量控制器 (Digital MFC)	SIC (啟成科技)	MC-2100NC	Valve operation mode	Normally Closed
			Range(full scale) (SCCM)	5,10,20,50,100,200,300, 500,1000,2000,5000
			Min. controllable flow rate(%F.S.)	2
			Response Time(sec) (2-98 %F.S)	1
			Accuracy (%F.S.)	±1.0%
			Linearity (%F.S.)	±0.5%
			Repeatability (%F.S.)	±0.2%
			Required Different Pressure	0.5~3.0(kg/cm ²) 49~294KPa
			Withstand Pressure	10(kg/cm ²) 980KPa
			Max. Operation Press.	3(kg/cm ²) 294KPa
			Operation Temperature	0~50°C
			Temperature Coefficient(%F.S.)/°C	ZERO SPAN 0.02
Leakage rate(He)	<1*10 ⁻¹⁰			

			(atm*CC/sec)	
數位式 氣體流量控制器 (Digital MFC)	SIC (啟成科技)	MC-2100NC	Body Material	SUS-316L
			Control Valve Material	SUS-316L: Diaphragm PCTFE: Plug
			Seal	Gold(Au)
			Blazing at sensor Material	Nickel (Ni)
			Fitting	1/4"VCR,SWL
			Flow rate output signal	0~5V (Proportional to flow rate)
			Flow rate setting signal	0~5V (Proportional to flow rate)
			Digital Communication	RS-232/RS-485
			Power Supply	+15VDC,100mA -15VDC,150mA

氣體壓力控制器 (Pressure Controller)

有機金屬分子源數 位式壓力控制器	Bronkhorst HIGH TECH (*子嘉科技)	 P-702CM- 6K0A-AA	Gas Flow rate	1 liter/min
			Gas type	Hydrogen
			Max. Inlet Operational Pressure	0.2~3bar
			Outlet Operational Pressure	2000mbar
			Operational Temperature	0~65°C
			Accuracy	0.8%Read±0.2%F.S.
			Seal	Kalrez
			Pipe Electric Polish(EP) Roughness	R _a =0.2~0.6μm
			Fitting	1/4" VCR Face seal Male
			Communication	With RS232 & Analog I/O
			Output signal	0-5VDC
			Set-point Signal	0-5VDC Digital 0~100%
			Power Supply	+15~24VDC

直流電源供應器 (DC Power Supply)

MFC ±15VDC	GWINSTEK	GPC-3060D	Power Consumption	375W
			Independent	(0~30V/0~6A)×2 (5V/3A MAX)×1

電源供應器 MFC ±15VDC 電源供應器	(固緯電子) GWINSTEK (固緯電子)	GPC-3060D	Series	60V/6A
			Parallel	30V/12A
			Input Voltage Constant Voltage Mode Regulation	AC110V <u>Line regulation:</u> 0.01% + 3mV <u>Load regulation:</u> 0.01% + 5mV (rating current ≤ 10A)
			Ripple & Noise	≤ 1mVrms(5Hz ~ 1MHz)
電磁閥&有機金屬分子源壓力控制器 Fixed 24VDC 工業用交換式電源供應器	MEALWELL (明緯電子)	S-150-24	DC Output Rated Voltage/Current	24V/0~6.5A
			Power Consumption	156W
			Voltage Adjustment Range	21~28V
			Ripple & Noise (max.)	240 mV _{p-p}
			Voltage Tolerance	±1.0%
			Line Regulation	±0.2%
			Load Regulation	±0.2%
Input Efficiency	85%			
電磁閥(Solenoid Valve)				
電磁閥	SMC (* 寧英機械)	SY-114-5LZE-Nil	Type	3口2位閥(常關型, N.C.)
			Fluid	Air
			Ambient & Fluid Temperature	-10~50°C
			Response time	<10ms
			Max Operation Frequency	20Hz
			Coil Rated Voltage	24V±10%
			Power Consumption	0.55W
			Cv	0.008
			Seal	Rubber
			Operated Pressure Range	0~0.7MPa
			Vacuum Specification	-100 kPa to 0
			Port Size	M5 x 0.8mm
			Effective area (mm ²)	0.14mm ²
固態繼電器(Solid State Relay)				
固態繼電器	KYOTTO	KF0602D	Controllable Volt. Range	3~32 VDC
			Load Volt. Range	3-60 VDC
			Max. Durable Current	3 A

(SSR)	(凱優特)		Isolated Resistance	10 ⁹ Ω
			Response Time	< 2ms
			Frequency Range	47~70Hz
數位壓力表(Digital Pressure Switch)				
氣動閥--N ₂ 進氣端 數位式壓力表頭	SMC (*寧英機械)	ISE30-T1-25-MLA	Power Supply	24V±10%
			Current Consumption	≤45mA
			Switch Output	NPN Output
			Pressure Sensor Range	-0.1MPa~1MPa
			Response Time	2.5ms(min)
			Min. Display Unit	0.001MPa
			Withstand Pressure	1.5MPa
			Material for Fluid Contact	O-ring: HNBR Press. Sensing Part: Silicon Piping Port: C3602 (Electroless Nickel Plated)
溫度控制器(Thermal Controller)				
反應腔溫度控制器	EUROTHERM (*陵勝實業)	818P15/TC/0V10/NON E/NONE/NONE/232/96 /SN/03/0/1200/C/RR/R H/E/IN/S/N/MN/MN/H	Power Supply/Power	110VAC/8.5W
			Input Type	Thermal Couple
			Output Type	0~10V
			Input Curve	K-Chromel™/Alumel™ K-Type (Ni Cr/Ni Al) Min: 250°C Max: 1200°C Min. Span(5μV/ dig): 125
			Display Max.	1200°C
			Display Min.	0°C
			Program Segment	15
			Linkage	Yes
			PID Control	Self-Tune Adaptive-Tune Manual-Tune
			Program Command	Set-point(°C) Ramp Rate(°C/min) Dwell Time(min)
			Power Supply/Power	110VAC/8.5W
			Input Type	Thermocouple
			Output Type	0~5V

反應腔溫度控制器	EUROTHERM (*陵勝實業)	818P15/TC/0V10/NON E/NONE/NONE/232/96 /SN/03/0/1200/C/RR/R H/E/IN/S/N/MN/MN/H	Input Curve	K-Chromel™/Alumel™ K-Type (Ni Cr/Ni Al) Min: 250°C Max:1200°C Min. Span(5μV/ dig):125
反應腔溫度控制器	EUROTHERM (*陵勝實業)	818P15/TC/0V5/NON E/NONE/NONE/232/96 /SN/03/0/1200/C/RR/R H/E/IN/S/N/MN/MN/H	Display Max.	1200°C
			Display Min.	0°C
			Program Segment	15
			Linkage	Yes
			PID Control	Self-Tune Adaptive-Tune Manual-Tune
Program Command	Set-point(°C) Ramp Rate(°C/min) Dwell Time(min)			
腔體壓力控制器(Reactor Pressure Controller)				
反應腔壓力控制器	MKS (*萬機科技)	651CD2S1N	Power Supply	115AC
			Power Consumption	150VA (max)
			Control Mode	Self-Tuning PID Control
			Valve Control	Open Close Hold
			Valve Control	Soft start Rate
			Connector	
			Valve I/O Transducer	9 Pin "D" Type Female 37 Pin "D" Type Female 15 Pin "D" Type Female
			Communication	RS232 (9 Pin "D" Type Male)
			Controller Repeatability	±0.1%F.S.
			Display Unit	Torr,mTorr,mbar,ubar,Pa,kPa
不斷電系統(UPS)				
不斷電系統 (UPS)			容量	2KVA/1600W
			輸入額定電壓	110,120VAC
			輸入電壓功率因數	≥0.97
			輸出電壓	110VAC

不斷電系統 (UPS)	台達電子	GES202R	輸出電壓頻率	60Hz
			輸出電壓穩定度	±2%
			過窄容量	125%~150%維持 30 秒
			輸出插座	NEMA5-15/20R×6 NEMA5-20R×1
			電池額定電壓	48V
			電池型式	鉛酸電池 12V/8.5Ah
			電池備用時間(標準)	4 分鐘(1600W)
			電池再充電時間	6 小時充至 80% 電位
			市電電池轉換時間	< 10ms
			電池額定電壓	48V
			LED 狀態指示燈	市電正常、旁路正常、電池供電、過載、電池低壓、故障、需更換電池、電池容量百分比、負載百分比
			通訊介面	RS-232
			外接電池箱	有
噪音	50dB			
數位式氣體流量控制器(MFC)				
數位式氣體流量控制 器(MFC) For TMGa(L)	Bronkhorst (*子嘉科技)	F-200CV-002-AAD-8 8V	Accuracy (incl. linearity)	Standard: ±0.8%Rd±0.2%F.S
			Base on actual calibration	±1%F.S. for range 3~5ml _n /min ±2%F.S. for range < 3ml _n /min
			Repeatability	<0.2%Rd
			Setting time(controller)	Standard: 1~2sec
			Control stability	<±0.1%F.S. (Typical for 1 l _n /min N ₂)
			Operating temp.	-10~70°C
			Temp. sensitivity	Zero: <0.05%F.S./°C Span: <0.05%F.S./°C
			Pressure sensitivity	0.1%bar typical N ₂ 0.01%bar typical H ₂
			Leak integrity, outboard	Tested<2×10 ⁻⁹ mbarl/s He
			Warn up time	30min. for optimum accuracy 2 min. for accuracy±2%F.S.
			Surface quality(wetted parts)	Ra=0.8µm typical

			Seals	Standard: Viton
			Power supply/Consumption	+15~24V , Max: 320mA
			Analog output	0~5VDC
			Communication(I/O)	RS-232+Analog (N.C. controller)
			Electrical connection	Aanalog/RS232 9 pin D-connector(Male)
			F-200CV series	Min flow: 0.014~0.7ml _n /min Max flow: 0.06~9ml _n /min
			Nominal Range	0~2 SCCM
			Pressure rating	64bar
			Connector	1/4" Face seal male

表 A-8 WK2008 磊晶控制系統簡易硬體規格表



A-3 WK2008 控制系統指令邏輯及相關硬體對應關係說明

WK2008 控制系統相關對應圖(如圖 A-25(a)~(c)所示)，是利用 DAQ 卡做為通訊介面，主要為 WK2008 控制系統與工業電腦間的資料傳遞用。其中 PCI-1739U 介面卡功能有：數位輸出(Digital Output, D/O)、數位輸入(Digital Input, D/I)兩種功能。而 PCI-1620A 通訊卡主要的功能為建立電腦和儀器間的 RS-232 數位通訊。由圖 A-25 可清楚得看出系統指令的邏輯輸出和其硬體之間的對應關係。

圖形(圖 A-25(a)~(c))解說如下：

I. 控制程式相關參數設定：

- (1) 流量計(MFC)：顯示每台流量計的名稱，和每台流量計的可供調變的質量流量(Mass Flow)範圍(2~98%F.S.)，流量單位為在標準狀態下(1atm, 0°C)，每分鐘流過的氣體體積量(c.c.) (Standard Cubic Centimeter per Minute, SCCM)。
- (2) III 族下游壓力控制器：顯示每台壓力控制器的可調變壓力範圍(200~2000mbar)。
- (3) 腔體溫度控制器：顯示可設定之溫度範圍(0~1200°C)。
- (4) MKS 腔體壓力控制器：顯示腔體可供設定之壓力範圍(26.4~1333.2mbar)。
- (5) h(def)/l：表示流量計是使用高流量(h)或是低流量(l)，其中(def)代表為數位訊號為邏輯零(Logic 0)的預設狀態。
- (6) g(def)/s：表示是否帶出 MO 分子源(MO Source)進系統，是否通入 V 族分子源(V Source, NH₃)，是否通入 N 型摻雜源(N-type dopant, SiH₄)。
註：g→不開或不帶 Source 進系統；s→打開或帶出 Source 進系統。
- (7) v(def)/r：指 Epifold 端氣體的流向切換。
v (vent) - 氣體流向排氣端(通往真空幫浦, Mechanical Pump)；r (reactor)- 氣體流入反應腔體內。

- (8) $n / h / N(h+n) / H(h+n)$ ：通入系統之載流氣體(Carrier gas)選擇。
 $n(N_2)$ -管路全通氮氣。
 $h(H_2)$ -管路全通氫氣。
 $N(h+n) - N_2$ 混合 H_2 ，主管路為 N_2 (Forming gas $\rightarrow H_2$)。
 $H(h+n) - N_2$ 混合 H_2 ，主管路為 H_2 (Forming gas $\rightarrow N_2$)。

II. 程式之邏輯設計及 PCI-1739U 輸出埠/PCI-1620A 通訊埠對應：

- (1) 流量計(MFC)：指明每台流量計的硬體編號(Device Number)，及其對應之 RS-232 通訊埠。
 註：在菜單中所設定之流量值，經由 PCI-1620A 卡的個別通訊埠寫入對應之流量計中。
- (2) 氣動閥邏輯(Pneumatic Valve Logic)：菜單中設定之磊晶狀態(h/l、g/s、v/r、 $n / h / N(h+n) / H(h+n)$)透過程式的邏輯判斷，經由 PCI-1739U 卡 D/O 輸出數位邏輯訊息(Logic 0/1)給電磁閥(Solenoid Valve, EM)，藉以控制氣動閥之開關。
 註：個別氣動閥之常態狀態(N.O/N.C)標示於括號中。
- (3) 壓力控制器(P.C.)：指明每台壓力控制器的序號(Serial Number, SN)，及其 RS-232 的通訊埠編號。
 註：在菜單中設定之壓力值，透過 PCI-1620A RS232 通訊卡的個別通訊埠將設定之壓力值寫入對應之壓力控制器中。
- (4) 腔體壓力控制器：腔體壓力值透過 Com24(內腔體)/Com36(外腔體)所對應的 RS-232 通訊埠寫入 MKS 651C 壓力控制器中。
- (5) 腔體溫度控制器：腔體中上下石墨所需的加熱溫度透過 Com25(上溫控器)及 Com26(下溫控器) RS-232 通訊埠寫入各別的溫控器中。

WK2008 控制系統中，各項硬體對應之通訊埠編號如表 A-9 所示。

WK2008 控制系統中	
硬體 RS-232 通訊埠(Com port)配置表	
硬體	通訊埠
UPS	Com1

Eurotherm 818P(ref)	Com2
Forming gas MFC	Com3
Run V MFC	Com4
Run III MFC	Com5
Sub III MFC	Com6
Vent MFC	Com7
NH ₃ (M) MFC	Com8
NH ₃ (L) MFC	Com9
TMGa(H) MFC	Com10
TMGa(L) MFC	Com11
TMGa(Push) MFC	Com12
TMin MFC	Com13
Disk Rotation MFC	Com14
Liner Purge MFC	Com16
TMGa_Press	Com17
TMin_Press	Com18
SiH ₄ Source MFC	Com19
SiH ₄ Dilute MFC	Com20
SiH ₄ Inject MFC	Com21
MKS 651C Pressure controller(Inner chamber)	Com24
MKS 651C Pressure controller(Outer chamber)	Com36
Eurotherm 818P ↑	Com25
Eurotherm 818P ↓	Com26
NH ₃ (H) MFC	Com28
TMAI MFC	Com29
TMAI_Press	Com30
Cp ₂ Mg MFC	Com31
Cp ₂ Mg_Press	Com33

表 A-9 WK2008 控制系統各式硬體與系統連結通訊埠對應表

III. 氣動閥控制電磁迴路之硬體對應：

- (1) 顯示 PCI-1739U 卡輸出通道(Output Channel)和固態繼電器(Solid State Relay, SSR)，電磁閥(EM)的實際硬體對應關係。

WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖 (1)

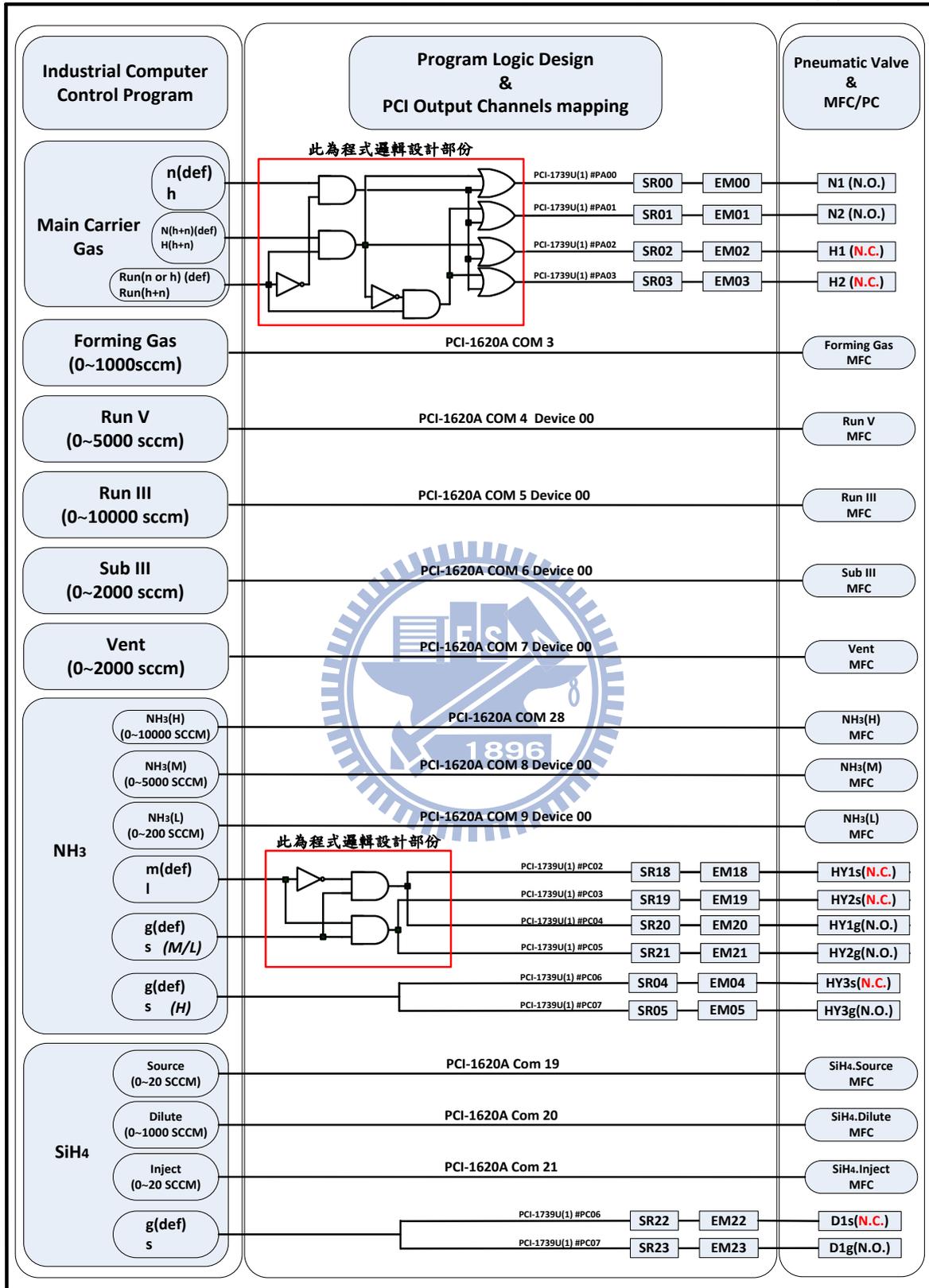


圖 A-25(a) WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖(1)

WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖 (2)

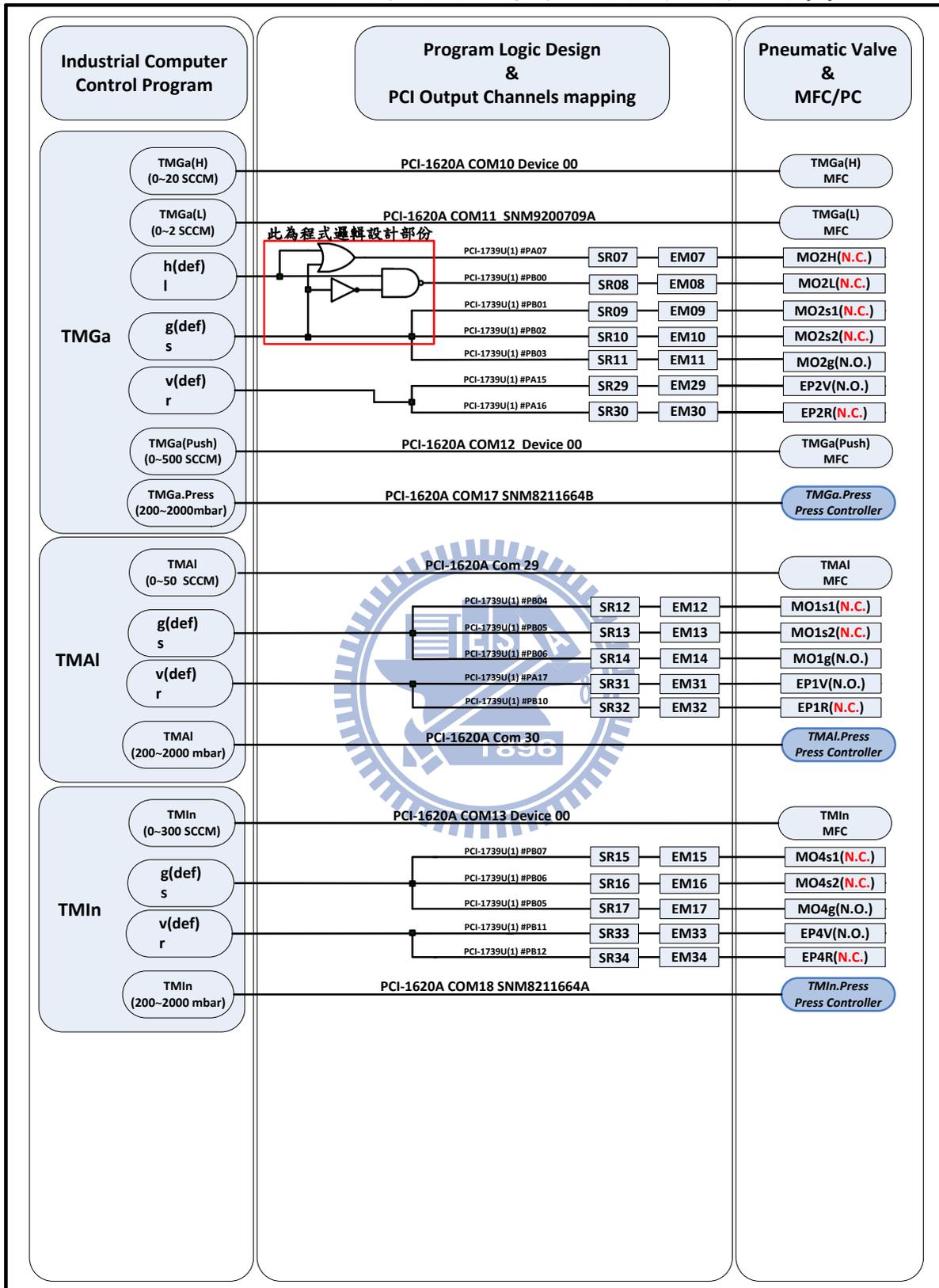


圖 A-25(b) WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖(2)

WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖 (3)

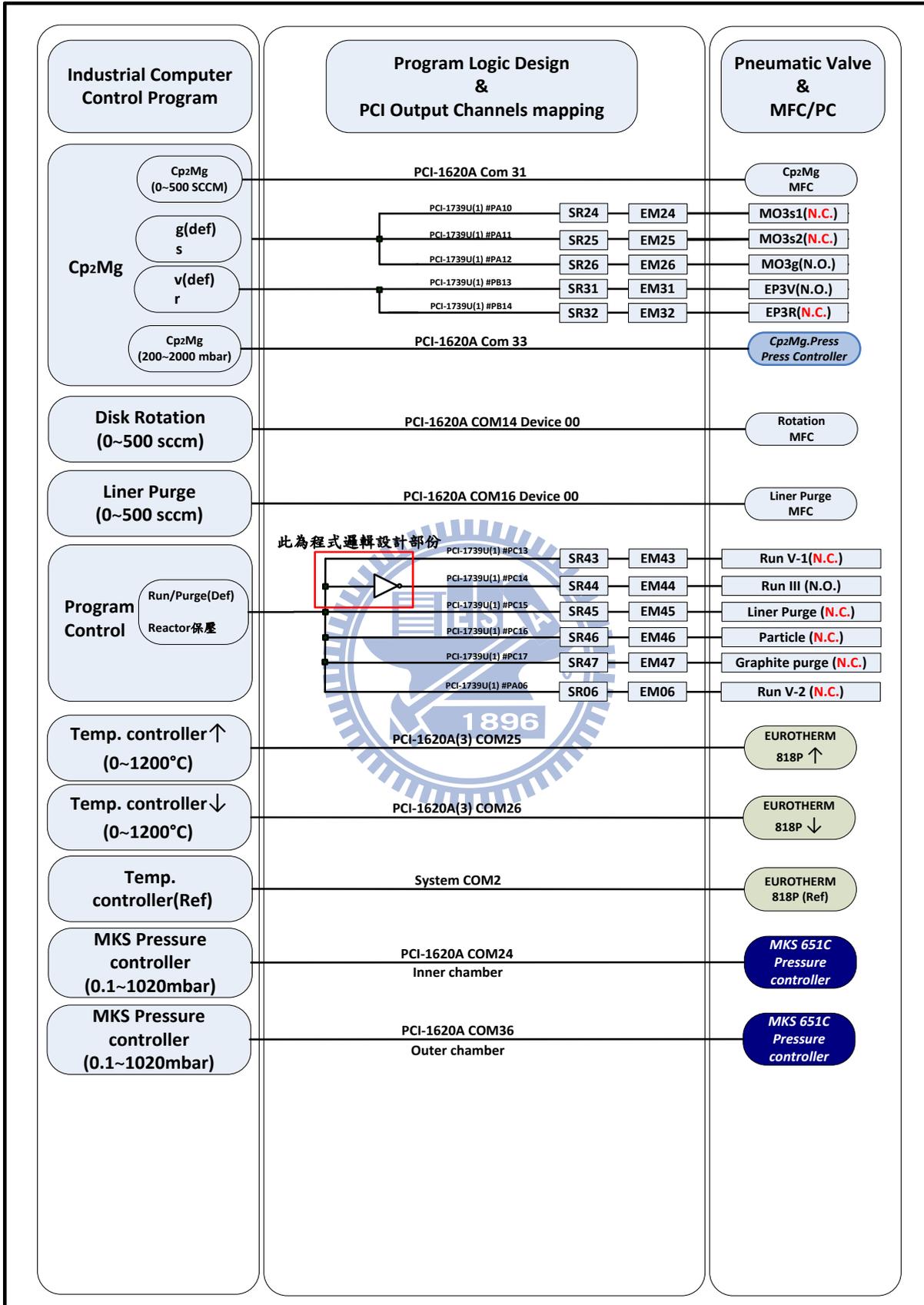


圖 A-25(c) WK2008 MOCVD 控制系統指令邏輯及硬體對應關係圖(3)

A-4 氣動閥控制流程及電路規劃

A-4-1 【氣動閥控制設計概念】

氣動閥開關控制主要是利用固態繼電器(Solid State Relay, SSR)之電路迴路導通或斷路特性，進而控制電磁閥開關，而透過電磁閥的不鏽鋼鐵芯開關控制通往氣動閥的氮氣(N₂)迴路。

主要接線方式如圖 A-26 所示，其說明如下：

1. 固態繼電器(SSR)(直流輸入 SSR 硬體規格參閱附錄 G G-E)輸入端和 PCI-1739U 數位輸出端構成電路迴路，而繼電器(SSR)輸出端和 24V 直流電源及電磁閥(Solenoid valve)訊號端構成封閉迴路。相關正負端接腳如圖 A-26 所示。
2. 當訊號為邏輯 1(Logic high)時，繼電器輸出端迴路導通(輸出端為可承載 3-60VDC/2A 之電路)，此時電磁閥和 24V 直流電源導通，電磁閥開，氮氣源送往氣動閥端，氣動閥狀態改變。
{ 常態關(Normally Close, N.C.)→轉為開(Open)，常態開(Normally Open, N.O.) →轉為關(Close) }
3. 當訊號為邏輯 0(Logic low)時，繼電器輸出端迴路開路，此時電磁閥和 24V 直流電源斷路，電磁閥關，氣動閥狀態不變。
(N.C.→Close，N.O. →Open)
4. 使用設備如下：(供應廠商,硬體型號)
 - 48 Channels D I/O Card：ADVANTECH, PCI-1739U
 - Solid State Relay，SSR：KYOTTO, KF0602D
 - Solenoid Valve：SMC, SY114

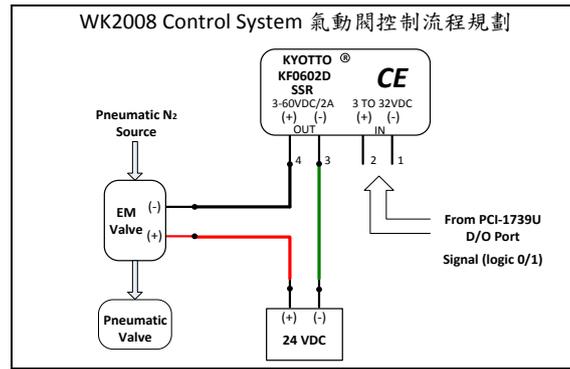


圖 A-26 氣動閥開關控制示意圖

註：相關硬體的電氣規格

Advantech PCI-1739U Digital Output

Logic level 0: 0.4Vmax.@24mA (sink)

Logic level 1: 2.4Vmin.@15mA (source)

SMC Solenoid valve , EM Valve

Power Requirement: 24VDC±10% , Power Consumption: 0.55W

Mealwell 24VDC Switching Power Supply

Load Regulation: ±0.2% (±0.048V for 24V)

Ripple& Noise: 240mVp-p

Voltage supply for EM Valve: 24VDC±0.168V

A-4-2 【WK2008 磊晶系統氣動閥邏輯設計】

本節為詳細介紹氣體傳輸管路中氣動閥之開關邏輯設計。

註：氣動閥預設狀態 N.C.代表常態關閉，N.O.代表常態開啟。

➤ **載流氣體源管路之氣動閥邏輯**

載流氣體狀態可分為全氮氣(N₂)，全氫氣(H₂)，及氮氫氣混合(N₂+H₂)。其中全氮氣(N₂)為系統預設狀態，在氮氫氣混合狀態中，可再區分為(Run N₂/H₂ Main carrier : N₂)及(Run N₂/H₂ Main carrier : H₂)狀態。

《Run N₂/H₂ , Main carrier : N₂》

主氣源管路為氮氣；而混合氣體，即氫氣，則透過 *Forming gas* 流量計經由 III 族管路進入反應腔體中。

《Run N₂/H₂ , Main carrier : H₂》

主氣源管路為氫氣，而混合氣體；即氮氣，則透過 *Forming gas* 流量計匯入反應腔體中。各別狀態對應的氣動閥邏輯設定如圖 A-27 所示。

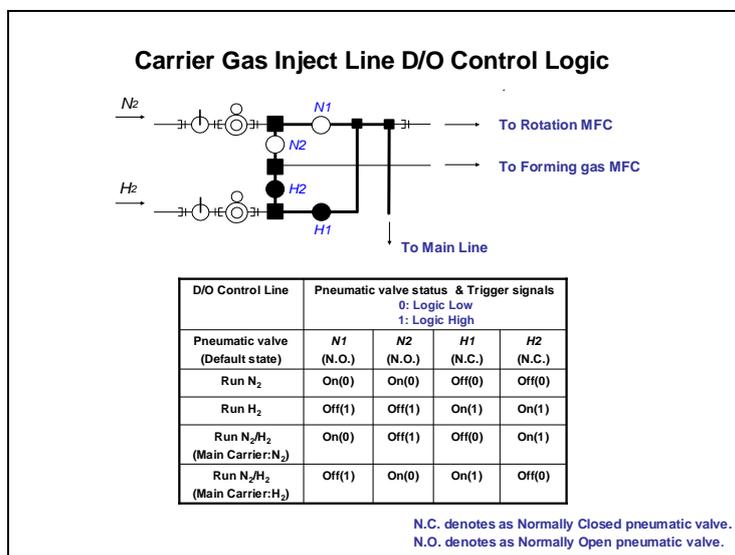


圖 A-27 載流氣體管路端氣動閥控制邏輯

➤ III 族有機金屬分子源管路之氣動閥邏輯

III 族有機金屬分子源氣體管路氣動閥邏輯設定主要分為分子源端氣動閥端邏輯，及 Epifold 混合端氣動閥邏輯設定。

分子源氣動閥端邏輯有(帶 source, s)及(不帶 source, g)兩種；而由(s/g)狀態字元控制其邏輯；而控制氣體切換的 Epifold 端，則是由(v/r; Vent→v, Reactor→r)狀態字元控制其排 Vent(To Vent)或進 Reactor(To Reactor)之邏輯切換。

以下分別就 MO5(TEGa)、MO1(TMAI)、MO4(TMIn)、MO3(Cp₂Mg)管路之氣動閥邏輯作詳細說明。

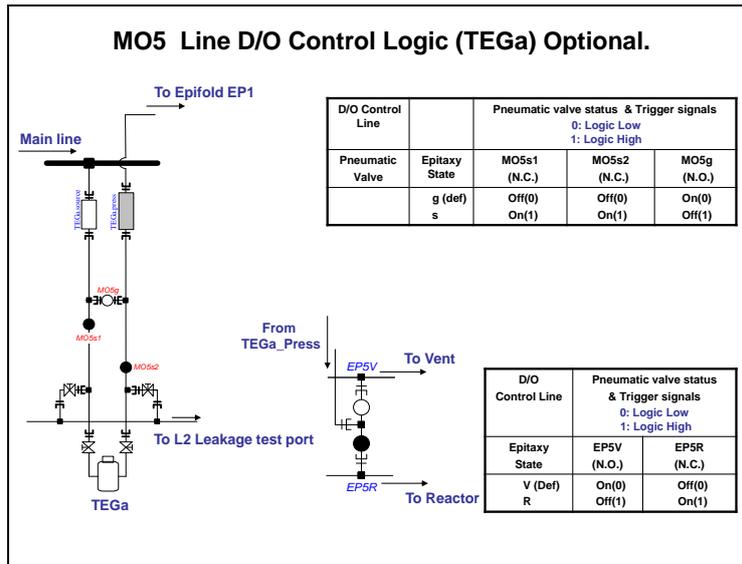


圖 A-28 MO5 III 族有機金屬分子源(TEGa)端氣動閥控制邏輯設計

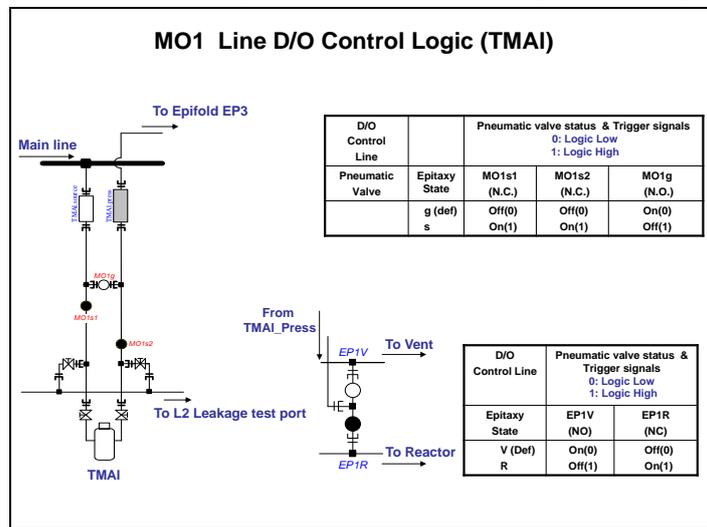


圖 A-29 MO1 III 族有機金屬分子源(TMAI)端氣動閥控制邏輯設計

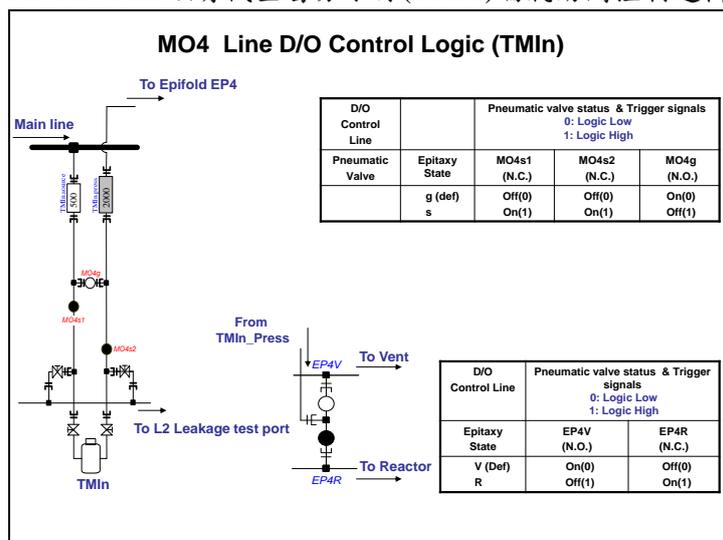


圖 A-30 MO4 III 族有機金屬分子源(TMIn)端氣動閥控制邏輯設計

➤ MO2(TMGa)管路之氣動閥邏輯設計

基於五三比(V/III Ratio)範圍需求之考量，WK2008 磊晶系統在MO2(TMGa)管路中配置了不同流量大小之流量計，且各別在流量計末端配置氣動閥以控制其切換，圖 A-31 即說明其各別的氣動閥邏輯。

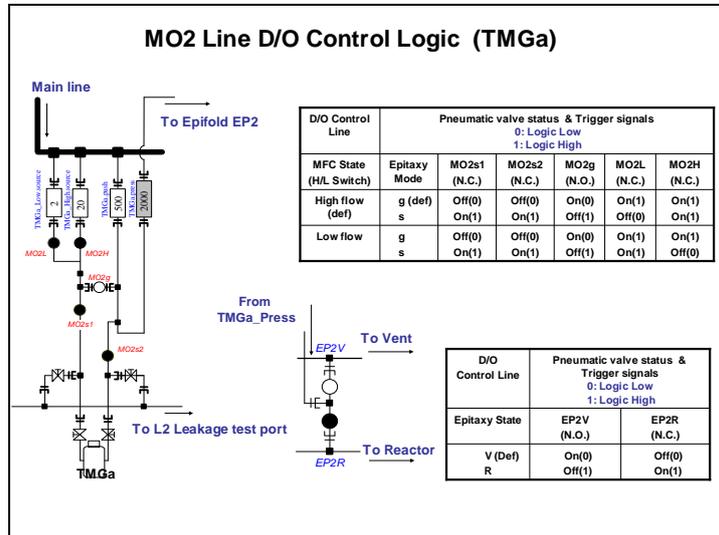


圖 A-31 MO2 III 族有機金屬分子源(TMGa)端氣動閥控制邏輯設計

➤ V 族氣體分子源管路之氣動閥邏輯

WK2008 磊晶系統中 V 族分子源只有氨氣(NH₃)，也由於五三比範圍之需求，配置了兩個中小流量的流量計，當使用中流量之流量計時，小流量之流量計則通入載流氣體，做為補足 V 族端總氣體流量恆定用的流量計，功能同 III 族中的 Sub III 流量計；反之使用小流量之流量計帶 NH₃ 分子源時，則利用中流量之流量計補足之。圖 A-32 為 NH₃ 管路中的個別氣動閥邏輯。

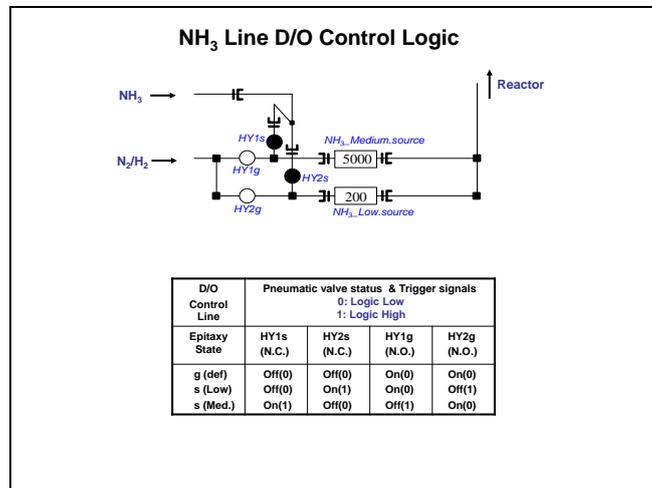


圖 A-32 HY1 V 族分子源(NH₃)端氣動閥控制邏輯設計

➤ N 型摻雜分子源(Doping source)管路之氣動閥邏輯

如同一般 MOCVD 管路之設計，WK2008 磊晶系統也預留了摻雜分子源管路，而 N 型摻雜源，矽甲烷(Silane, SiH_4)的氣體管路及氣動閥開關邏輯如圖 A-33 所示。

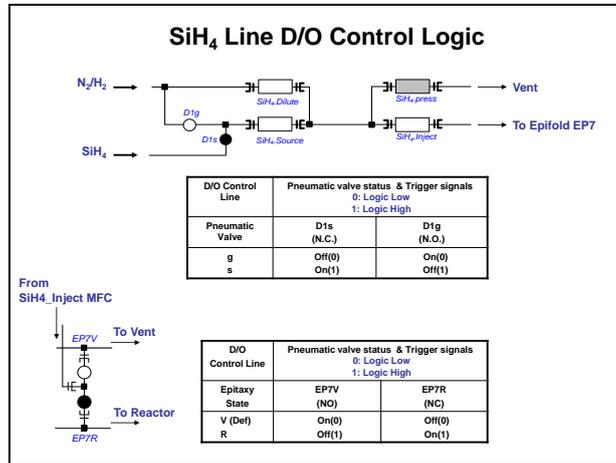


圖 A-33 D1 N 型摻雜分子源(SiH_4)端氣動閥控制邏輯設計

➤ P 型摻雜分子源(Doping source)管路之氣動閥邏輯

如同一般 MOCVD 管路之設計，WK2008 磊晶系統也預留了摻雜分子源管路，而 P 型摻雜源(二茂鎂, $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Mg}$, bis-cyclopentadienyl magnesium, Cp_2Mg)之氣體管路及氣動閥開關邏輯如圖 A-34 所示。

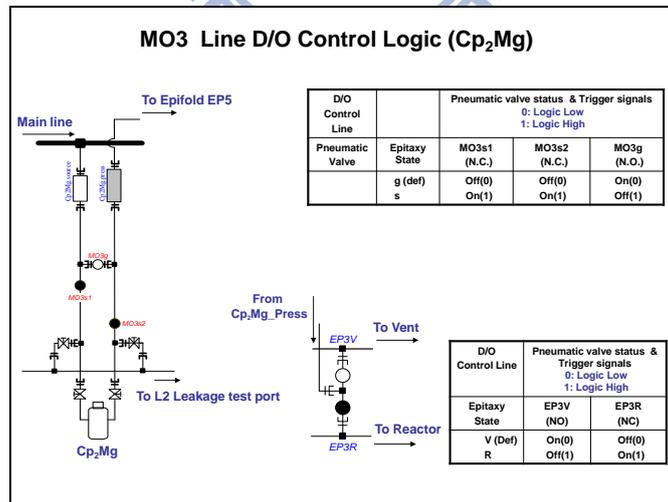


圖 A-34 MO5 P 型摻雜分子源(Cp_2Mg)端氣動閥控制邏輯設計

➤ 連結至反應腔端的氣動閥邏輯及真空泵浦開關邏輯

在 WK2008 磊晶系統中，有 4 個氣動閥連結至反應腔體進口端；分別為控制 V 族的 Run V(常態關閉, N.C.)氣動閥，控制 III 族的 Run III(常態開啟, N.O.)氣動閥，及提供腔體潔淨(Purge)用的 Liner Purge(常態關閉, N.C.)

及 Graphite Purge(常態關閉, N.C.)氣動閥; 而在腔體出口端, 則僅有位於粒子過濾器(Particle trap)前端的 Particle(常態關閉, N.C.)氣動閥, 該氣動閥控制氣流是否流經粒子過濾器; 如不流經粒子過濾器, 末端氣體則直接由逆止閥(Check valve, One way valve)排至大氣中。

Particle 氣動閥常態為關閉(系統閒置狀態), 當系統切換至長晶模式時, 該氣動閥開啟, 氣流將通過粒子過濾器進入真空泵浦, 而腔體壓力則由節流閥(Throttle valve)及 MKS 651C 壓力控制器迴路控制。

此外, 真空系統中尚有 1 個位於真空泵浦進口端前方的氣動閥(Exhaust), 該氣動閥為常態關閉, 其開關控制邏輯同真空泵浦開關, 其主要設計目的為防止真空幫浦油氣回流至反應腔中, 各別氣動閥於不同系統狀態之開關切換如圖 A-35 所示。

連結至反應腔體進口端之氣動閥, 除了位於 III 族管路末端之 Run III 氣動閥為常態開啟(N.C.)外, 其餘皆為常態關閉(N.C.), 主要為因應系統於保壓狀態(Reactor keeps saturated pressure)而設計, 在系統為閒置狀態(idle)時, WK2008 磊晶系統一般處於腔體潔淨(Purge)狀態, 而該狀態設定為將連結至腔體進口端之所有氣動閥開啟, 以總量為 1000sccm 之氮氣(N₂)通入腔體中, 作為腔體潔淨用。而當系統閒置且腔體不做潔淨時, 則是將連結至腔體進口端之所有氣動閥關閉, 而此時系統會持續偵測腔體壓力值, 當壓力值低於 1030mbar 時, 則會開啟 Run III 氣動閥以維持腔體處於正壓(略大於 1 大氣壓), 目的為防止大氣倒灌回腔體內, 該狀態稱為腔體保壓狀態(Reactor keeps saturated pressure)。

註: 系統主要防止大氣倒灌之作法為在管路末端配置單向導通之逆止閥(兩端壓差值為 70mbar 及 25mbar 之逆止閥, Check valve)。

Run III 氣動閥配置為常態開啟的目的為: 當系統停電時(停電時, 電磁閥無電力供應, 故系統所有氣動閥回至常態), 系統仍可利用該常態開啟型氣動閥供給氣體至腔體內, 做為腔體保壓用。

註: 當系統停電時, 供給流量計之±15V 之直流電僅有約 4 分鐘之電力供應(UPS

供電)，而 WK2008 磊晶系統所配置之流量計為常態關閉型，亦即流量計斷電，壓電閥(Piezoelectric valve)立即關閉。

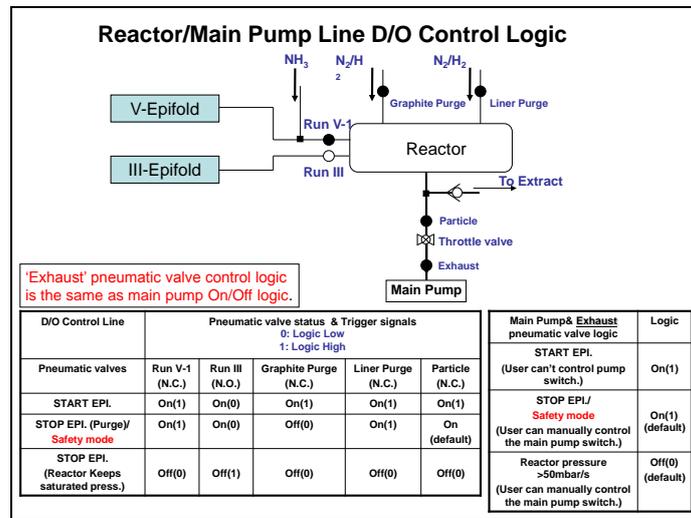


圖 A-35 連結至腔體之氣動閥控制邏輯設計

圖 A-35 中也顯示真空泵浦之開關邏輯，原則是控制程式執行時，真空泵浦立即開啟(Exhaust 氣動閥開啟)，此時使用者無法控制真空泵浦開關；而程式結束時(即執行至指令(command)為 e 時)，使用者方可控制其開關。在安全模式(Safety Mode)下，腔體預設壓力為 800mbar，真空泵浦維持開啟(開啟狀態為程式預設值)，使用者此時仍可任意切換其開關，惟獨腔體壓力值上升速率大於 50mbar/s (Reactor pressure >50mbar/s)，程式強制真空泵浦關閉(Exhaust 氣動閥關閉)。

註 1.WK2008 系統真空泵浦控制硬體設計參閱附錄 G G-F。

註 2.安全模式設定請參閱 B-7 系統安全模式設計。

A-5 D I/O 控制卡(48 Channels I/O PCI-1739U)設定

研華(Advantech)提供之 PCI-1739U 介面控制卡為擁有 48 位元(bit)之數位序列(parallel)輸入/輸出埠模組(48 bits of parallel digital input/output module)。輸入/輸出(I/O)位元共分為 6 個通訊埠(port)，每個通訊埠各自擁有 8 個輸入/輸出(I/O)位元，通訊埠編號分別為 A0，A1，B0，B1，C0，C1，使用者可透過程式設定個別通訊埠(I/O port)之輸入/輸出屬性(I/O attribute)。

而 PCI-1739U 介面控制卡可適於下列應用：

- 工業用交流/直流(AC/DC)，輸入/輸出(I/O)模組狀態偵測與控制。
- 繼電器(Relay)和開關(Switch)之狀態偵測與控制。
- 序列資料傳輸(Parallel data transfer)。
- 感測 TTL，DTL，CMOS 之邏輯訊號。
- 驅動直流 LED 之開關顯示。

A-5-1 【輸入/輸出腳位設定】

在 PCI-1739U 未安裝於電腦前，須先設定個別通訊埠(port)之輸出輸入屬性，此動作至為重要，如未先確認輸入/輸出屬性，及個別位元預設狀態，導致訊號錯誤或使系統異常，將對硬體造成損害。圖 A-36 為 PCI-1739U 介面控制卡之上視圖。

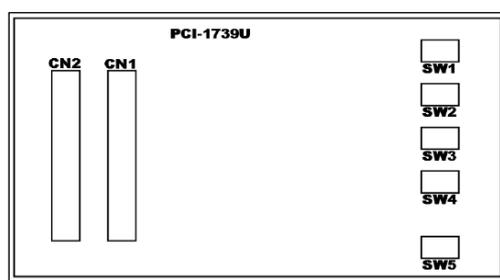


圖 A-36 PCI-1739U 介面控制卡俯視圖

說明如下：

CN1：埠 A, B, C 之直流輸入/輸出埠的 50 pin 接腳位

CN2：埠 A, B, C 之直流輸入/輸出埠的 50 pin 接腳位

SW1：PA0, PB0, PC0H, PC0L 埠之屬性(輸入/輸出)設定

SW2：PA1, PB1, PC1H, PC1L 埠之屬性(輸入/輸出)設定

SW3：PA0, PB0, PC0H, PC0L 埠輸出之預設狀態(low/high)設定

SW4：PA1, PB1, PC1H, PC1L 埠輸出之預設狀態(low/high)設定

SW5：該控制卡之 ID 設定(0~15)

註：埠的屬性如設定為輸入時，其預設狀態為邏輯高態(Logic high)，亦即當無外部訊號輸入時，其顯示為邏輯高態。

在 SW3 的屬性設定中，PA0 為設定 PA00~PA07，PB0 為設定 PB00~PB07，PCIH 為設定 PC00~PC03，PCIL 為設定 PC04~PC07。

在 SW4 的屬性設定中，PA1 為設定 PA10~PA17，PB1 為設定 PB10~PB17，PCIH 為設定 PC10~PC13，PCIL 為設定 PC14~PC17。

1. 輸出/輸入埠之屬性設定

SW1，SW2 功能為輸入/輸出埠屬性之設定，當切換至"OFF"時，屬性可由程式設定。

Port status setting(SW1, SW2 Switch)	
ON	Set as output
OFF	Set port I/O by software

表 A-10(a) PCI-1739U 埠之屬性設定

2. 輸出埠之預設狀態

SW3，SW4 功能為當系統重新開機，或重置時，輸出埠預設狀態之設定，該設定需在埠屬性設定為輸出時才有效。

Port status setting(SW3, SW4 Switch)	
ON	Output HIGH after reset
OFF	Output LOW after reset

表 A-10(b) PCI-1739U 埠之預設狀態設定

3. 控制卡 ID 設定

切換 SW5 之 ID3~ID0 之 ON/OFF 可供設定控制卡 ID，不過 WK2008 系統中，SW5 皆設定為 0，實際控制卡 ID 由系統 BIOS 決定。

Board ID Setting				
Board ID	ID3	ID2	ID1	ID0
0*	ON	ON	ON	ON
1	ON	ON	ON	OFF
2	ON	ON	OFF	ON

3	ON	ON	OFF	OFF
4	ON	OFF	ON	ON
5	ON	OFF	ON	OFF
6	ON	OFF	OFF	ON
7	ON	OFF	OFF	OFF
8	OFF	ON	ON	ON
9	OFF	ON	ON	OFF
10	OFF	ON	OFF	ON
11	OFF	ON	OFF	OFF
12	OFF	OFF	ON	ON
13	OFF	OFF	ON	OFF
14	OFF	OFF	OFF	ON
15	OFF	OFF	OFF	OFF

表 A-10(c) PCI-1739U 控制卡 ID 設定

*控制卡預設 ID 為 0。

表 A-5 為 WK2008 系統, PCI-1739U 的輸出/輸入位元之 JUMPER 設定。

PCI-1739U Device00					
	PA0	PB0	PC0	PC0H	PCOL
SW1	ON	ON	ON	ON	ON
SW2	ON	ON	ON	ON	ON
SW3	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
SW4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PCI-1739U Device01					
	PA0	PB0	PC0	PC0H	PCOL
SW1	ON	ON	ON	OFF	OFF
SW2	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
SW3	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
SW4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

表 A-11(a) PCI-1739U 輸出位元(bit)JUMPER 設定

PCI-1739U Device 00&01				
SW5	ID3	ID2	ID1	ID0
	ON	ON	ON	ON

表 A-11(b) PCI-1739U 輸出位元(bit)JUMPER 設定

A-5-2 【實際輸出輸入腳位對應】

PCI-1739U 控制卡 CN1 及 CN2 端輸出訊號經由排線接至 ADAM-3950 輸出模組上，圖 A-37 顯示腳位編號與輸出輸入埠之對照關係。ADAM-3950 輸出模組中，Pin49 為直流 5V 輸出，偶數編號為共接點(-)。

其中 PA00~PA07 為 Port 0；PB00~PB07 為 Port 1；PC00~PC07 為 Port 2；PA10~PA17 為 Port 3；PB10~PB17 為 Port 4；PC10~PC17 為 Port 5。

舉 PA00~PA07 說明通訊埠的設定方式，在 PA00~PA07 包含 PA00, PA01, PA02, ...~PA07 共 8 個位元，其中最後一個數值 0~7 代表為第 0 到第 7 個位元，這 8 個位元同屬埠編號 0(Port 0)中。

而程式中需設定的 4 個參數即：

- 硬體編號(Device number)：即是控制卡 ID(Board ID)。
- 埠編號(Port number)：指定埠編號，可設定為 0~5，共 6 組。
- 位元編號(Line number)：個別埠中的位元編號，可設定為 0~7，共 8 位元(bit)，實際對應如 ADAM-3950 輸出模組上編號所示。
- 位元狀態(Line state)：指定個別埠之邏輯狀態(Logic state)，可為高態(Logic 1)或低態(Logic 0)。

CN1			CN2		
PC 07	1 2	GND	PC 17	1 2	GND
PC 06	3 4	GND	PC 16	3 4	GND
PC 05	5 6	GND	PC 15	5 6	GND
PC 04	7 8	GND	PC 14	7 8	GND
PC 03	9 10	GND	PC 13	9 10	GND
PC 02	11 12	GND	PC 12	11 12	GND
PC 01	13 14	GND	PC 11	13 14	GND
PC 00	15 16	GND	PC 10	15 16	GND
PB 07	17 18	GND	PB 17	17 18	GND
PB 06	19 20	GND	PB 16	19 20	GND
PB 05	21 22	GND	PB 15	21 22	GND
PB 04	23 24	GND	PB 14	23 24	GND
PB 03	25 26	GND	PB 13	25 26	GND
PB 02	27 28	GND	PB 12	27 28	GND
PB 01	29 30	GND	PB 11	29 30	GND
PB 00	31 32	GND	PB 10	31 32	GND
PA 07	33 34	GND	PA 17	33 34	GND
PA 06	35 36	GND	PA 16	35 36	GND
PA 05	37 38	GND	PA 15	37 38	GND
PA 04	39 40	GND	PA 14	39 40	GND
PA 03	41 42	GND	PA 13	41 42	GND
PA 02	43 44	GND	PA 12	43 44	GND
PA 01	45 46	GND	PA 11	45 46	GND
PA 00	47 48	GND	PA 10	47 48	GND
+5 V	49 50	GND	+5 V	49 50	GND

圖 A-37 PCI-1739U 輸出/輸入位元與 ADAM-3950 腳位對應圖

A-5-3 【安裝驅動程式】

詳請參閱 PCI-1739U User manual p.11 2.2 Driver installation。

A-5-4 【研華之 Advantech Device Manager 埠屬性設定】

由 WK2008 系統工業電腦中開啟 Advantech Automation/Device Manager/Advantech Device Manager，路徑如圖 A-38 所示。



圖 A-38 PCI-1739U Device Manager 程式路徑

Advantech Device Manager 程式將出現目前安裝於系統之控制卡，如圖 A-39 中所示，Device manager 中顯示出 PCI-1739U(BoardID=000)及 PCI-1739U(BoardID=001)兩張不同硬體編號之控制卡。



圖 A-39 PCI-1739U Device Manager

PCI-1739U(Device01)輸出埠屬性設定：

由於 PCI-1739U(Device00)之所有位元已設定為輸出，所以不需程式設定，而 PCI-1739U(Device01)之 PC0H 即 PC0L 埠的屬性則透過該軟體設定，如圖 A-40 所示。

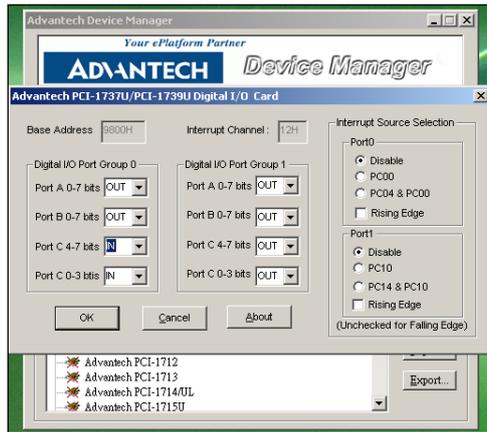


圖 A-40 PCI-1739U(Device01)輸出埠屬性設定

PC0H 屬性變更如下步驟：

點選 SETUP，進入畫面如圖 A-40 所示，將 Port C 0-3 bits 設定為 In(輸入態)即可。

A-6 WK2008 控制系統數位輸出埠配置

本節列出 WK2008 控制系統數位輸出埠實際配置表，其中包括 WK2008 磊晶系統中數位輸出埠配置如表 A-12(a)~(b)所示，數位輸入/輸出控制卡 PCI-1739U(Device00)之 CN1 輸出端子配置如表 A-13(a)所示；PCI-1739U(Device00)之 CN2 輸出端子配置如表 A-13(b)所示。

WK2008 控制系統中電磁閥(Solenoid valve)與氣動閥(Pneumatic valve)對應關係如表 A-14 所示，PCI-1739U(Device00) "CN1"數位輸出實際走線圖如圖 A-41 所示；PCI-1739U(Device00) "CN2"數位輸出實際走線圖如圖 A-42 所示。

WK2008 D/O Channel 對應關係(PCI-1739U BoardID: 00)

Items	Source Line	Pneumatic Valve	Control Channel (PCI-1739U/BoardID: 00)	SSR	Solenoid Valve
Main Carrier	Carrier gas Line (N ₂ /H ₂)	N1	PA00	SR00	EM00
		N2	PA01	SR01	EM01
		H1	PA02	SR02	EM02
		H2	PA03	SR03	EM03
V Source (NH₃ High)	NH ₃ (s/g)	HY3s	PA04	SR04	EM04
		HY3g	PA05	SR05	EM05
		Run V-2	PA06	SR06	EM06
III Source	TMGa (H/L) (s/g)	MO2H	PA07	SR07	EM07
		MO2L	PB00	SR08	EM08
		MO2s1	PB01	SR09	EM09
		MO2s2	PB02	SR10	EM10
	TMAI (s/g)	MO2g	PB03	SR11	EM11
		MO1s1	PB04	SR12	EM12
		MO1s2	PB05	SR13	EM13
	TMIn (s/g)	MO1g	PB06	SR14	EM14
		MO4s1	PB07	SR15	EM15
		MO4s2	PC00	SR16	EM16
V Source (NH₃ Medium & Low)	NH ₃ (s/g)	MO4g	PC01	SR17	EM17
		HY1s	PC02	SR18	EM18
		HY2s	PC03	SR19	EM19
		HY1g	PC04	SR20	EM20
Dopant Source	SiH ₄ (s/g)	HY2g	PC05	SR21	EM21
		D1s	PC06	SR22	EM22
	Cp ₂ Mg (s/g)	D1g	PC07	SR23	EM23
		MO3s1	PA10	SR24	EM24
		MO3s2	PA11	SR25	EM25
		MO3g	PA12	SR26	EM26

表 A-12(a) WK2008 控制系統數位輸出埠與其 SSR、電磁閥對應表

WK2008 D/O Channel 對應關係(PCI-1739U BoardID: 00)

<i>Items</i>	<i>Source Line</i>	<i>Pneumatic valve</i>	<i>Control Channel (PCI-1739U)</i>	<i>SSR</i>	<i>Solenoid Valve</i>
Epifold	TMAI	EP1V	PA13	SR27	EM27
		EP1R	PA14	SR28	EM28
	TMGa	EP2V	PA15	SR29	EM29
		EP2R	PA16	SR30	EM30
	Cp ₂ Mg	EP3V	PA17	SR31	EM31
		EP3R	PB10	SR32	EM32
	TMIn	EP4V	PB11	SR33	EM33
		EP4R	PB12	SR34	EM34
	TEGa	EP5V	PB13	SR35	EM35
		EP5R	PB14	SR36	EM36
	Reserved (For III)	EP6V	PB15	SR37	EM37
		EP6R	PB16	SR38	EM38
	SiH ₄	EP7V	PB17	SR39	EM39
		EP7R	PC10	SR40	EM40
Reserved (For V)	EP8V	PC11	SR41	EM41	
	EP8R	PC12	SR42	EM42	
Reactor inlet	Hydride	Run V-1	PC13	SR43	EM43
	MO source	Run III	PC14	SR44	EM44
	Liner Purge	Liner Purge	PC15	SR45	EM45
	Pumping	Particle	PC16	SR46	EM46
	Graphite Purge	Graphite Purge	PC17	SR47	EM47

表 A-12(b) WK2008 控制系統數位輸出埠與其 SSR、電磁閥對應表

Digital I/O Card(0)--PCI-1739U(00) "CN1" Port assignments						
Items	Source Line	Pneumatic Valve Label	ADAM-3950 I/O stage port number (Signal)		ADAM-3950 I/O stage port number (Ground)	
Main Carrier	Main Line (N ₂ /H ₂)	N1	PA00	01	02	GND
		N2	PA01	03	04	GND
		H1	PA02	05	06	GND
		H2	PA03	07	08	GND
V Source (NH₃ High)	NH ₃ (s/g)	HY3s	PA04	09	10	GND
		HY3g	PA05	11	12	GND
		Run V-2	PA06	13	14	GND
III Source	TMGa (H/L) (s/g)	MO2H	PA07	15	16	GND
		MO2L	PB00	17	18	GND
		MO2s1	PB01	19	20	GND
		MO2s2	PB02	21	22	GND
	TMAI (s/g)	MO2g	PB03	23	24	GND
		MO1s1	PB04	25	26	GND
		MO1s2	PB05	27	28	GND
	TMIn (s/g)	MO1g	PB06	29	30	GND
		MO4s1	PB07	31	32	GND
		MO4s2	PC00	33	34	GND
V Source (NH₃ Medium & Low)	NH ₃ (s/g)	MO4g	PC01	35	36	GND
		HY1s	PC02	37	38	GND
		HY2s	PC03	39	40	GND
		HY1g	PC04	41	42	GND
Dopant Source	SiH ₄ (s/g)	HY2g	PC05	43	44	GND
		D1s	PC06	45	46	GND
		D1g	PC07	47	48	GND

表 A-13(a) WK2008 控制系統數位輸出埠配置表

Digital I/O Card(0)--PCI-1739U(00) "CN2" Port assignments						
Items	Source Line	Pneumatic Valve Label	ADAM-3950 I/O stage port number (Signal)		ADAM-3950 I/O stage port number (Ground)	
Dopant Source	Cp ₂ Mg (g/s)	MO3s1	PA10	01	02	GND
		MO3s2	PA11	03	04	GND
		MO3g	PA12	05	06	GND
Epifold	TMAI (v/r)	EP1V	PA13	07	08	GND
		EP1R	PA14	09	10	GND
	TMGa (v/r)	EP2V	PA15	11	12	GND
		EP2R	PA16	13	14	GND
	Cp ₂ Mg (v/r)	EP3V	PA17	15	16	GND
		EP3R	PB10	17	18	GND
	TMIn (v/r)	EP4V	PB11	19	20	GND
		EP4R	PB12	21	22	GND
	TEGa (v/r)	EP5V	PB13	23	24	GND
		EP5R	PB14	25	26	GND
	Reserved (For III)	EP6V	PB15	27	28	GND
		EP6R	PB16	29	30	GND
	SiH ₄ (v/r)	EP7V	PB17	31	32	GND
		EP7R	PC10	33	34	GND
	Reserved (For V)	EP8V	PC11	35	36	GND
		EP8R	PC12	37	38	GND
Reactor Terminal	Reactor Inlet	Run V-1	PC13	39	40	GND
		Run III	PC14	41	42	GND
		Liner Purge	PC15	43	44	GND
		Particle	PC16	45	46	GND
		Graphite Purge	PC17	47	48	GND

表 A-13(b) WK2008 控制系統數位輸出埠配置表

WK2008 Solenoid Valve-Pneumatic Valve 對應關係

Solenoid valve	Pneumatic valve		Solenoid valve	Pneumatic valve		Solenoid valve	Pneumatic valve	
EM00	N1	N.O.	EM20	HY1g	N.O.	EM40	EP7R	N.C.
EM01	N2	N.O.	EM21	HY2g	N.O.	EM41	EP8V	N.O.
EM02	H1	N.C.	EM22	D1s	N.C.	EM42	EP8R	N.C.
EM03	H2	N.C.	EM23	D1g	N.O.	EM43	Run V-1	N.C.
EM04	HY3s	N.C.	EM24	MO3s1	N.C.	EM44	Run III	N.O.
EM05	HY3g	N.O.	EM25	MO3s2	N.C.	EM45	Liner Purge	N.C.
EM06	Run V-2	N.C.	EM26	MO3g	N.O.	EM46	Particle	N.C.
EM07	MO2H	N.C.	EM27	EP1V	N.O.	EM47	Graphite Purge	N.C.
EM08	MO2L	N.C.	EM28	EP1R	N.C.	EM48	Pump N ₂	N.O.
EM09	MO2s1	N.C.	EM29	EP2V	N.O.	EM49	MO6s1	N.C.
EM10	MO2s2	N.C.	EM30	EP2R	N.C.	EM50	MO6s2	N.C.
EM11	MO2g	N.O.	EM31	EP3V	N.O.	EM51	MO6g	N.O.
EM12	MO1s1	N.C.	EM32	EP3R	N.C.	EM52	DOR Vac	N.O.
EM13	MO1s2	N.C.	EM33	EP4V	N.O.	EM53	DOR N ₂	N.O.
EM14	MO1g	N.O.	EM34	EP4R	N.C.			
EM15	MO4s1	N.C.	EM35	EP5V	N.O.			
EM16	MO4s2	N.C.	EM36	EP5R	N.C.			
EM17	MO4g	N.O.	EM37	EP6V	N.O.			
EM18	HY1s	N.C.	EM38	EP6R	N.C.			
EM19	HY2s	N.C.	EM39	EP7V	N.O.			

表 A-14 WK2008 控制系統氣動閥(及其預設狀態)與電磁閥對應表

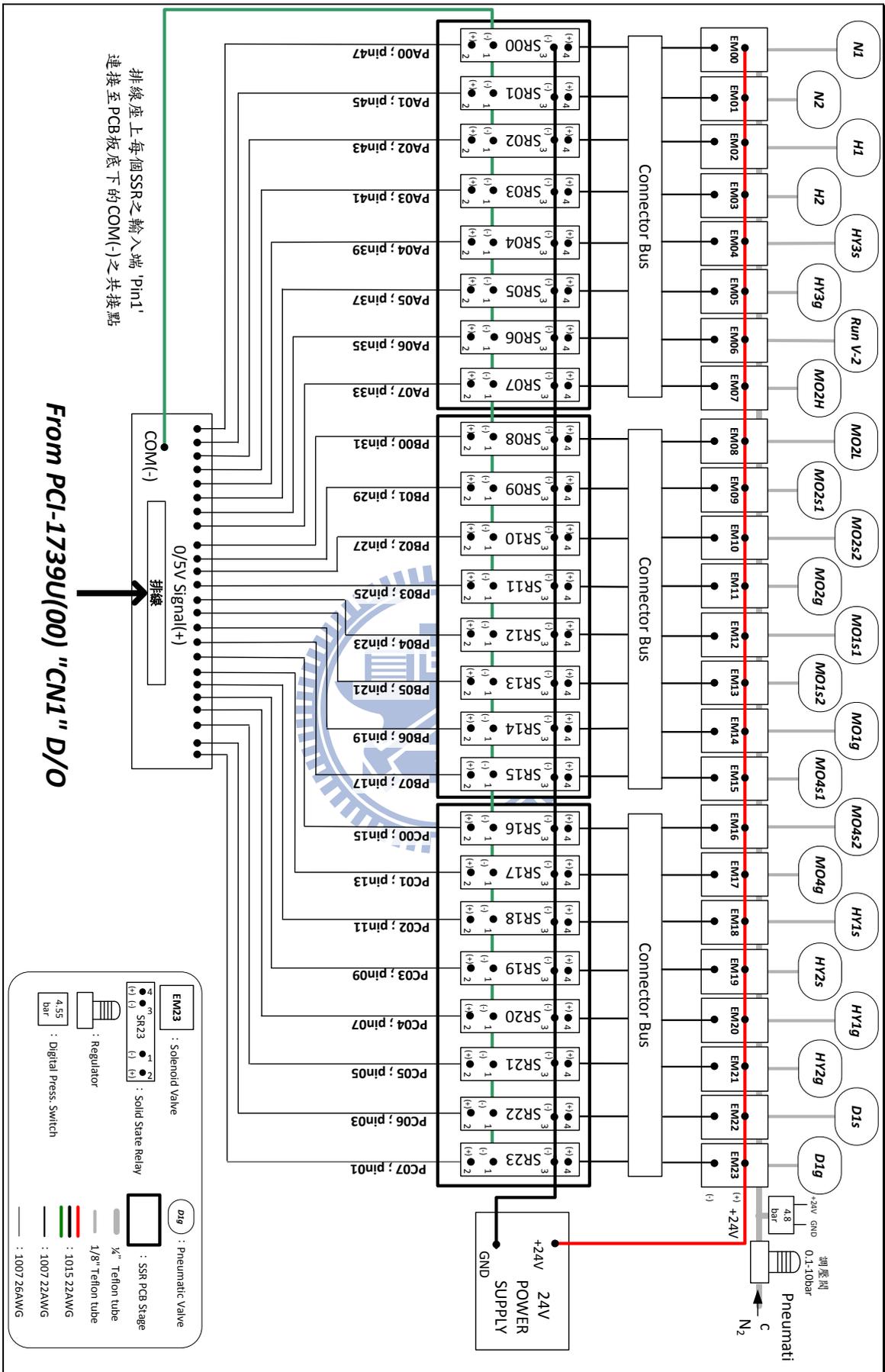


圖 A-41 PCI-1739U(Device00) "CN1"數位輸出實際走線圖

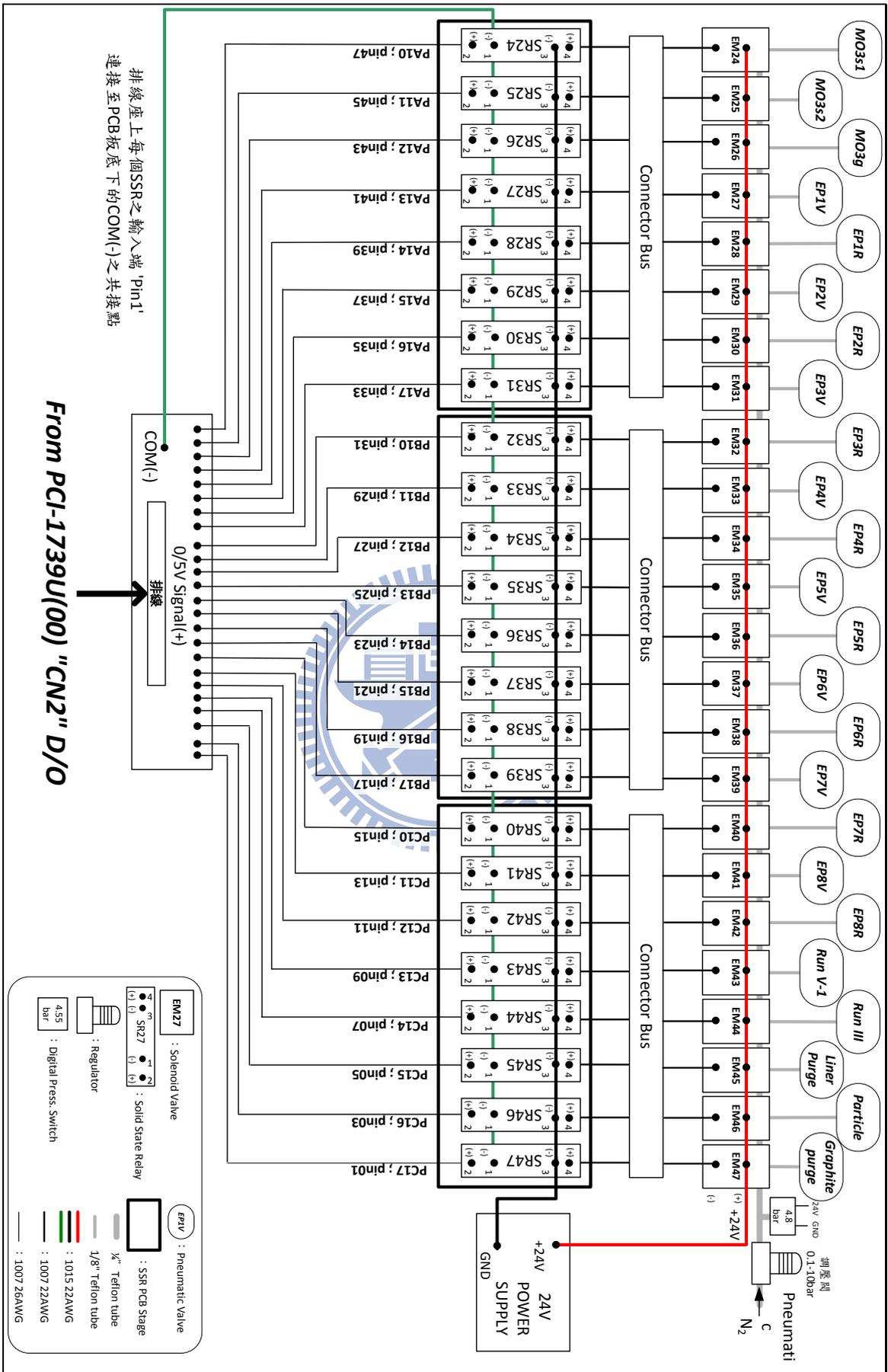


圖 A-42 PCI-1739U(Device00) "CN2"數位輸出實際走線圖

A-7 WK2008 系統狀態偵測

A-7-1 【WK2008 系統異常狀態偵測】

WK2008 MOCVD 磊晶系統設計有系統異常狀態偵測機制，偵測訊號透過 PCI-1739U(Device01)輸出埠輸出，各別輸出訊號接至狀態偵測 LED 電路，提供系統異常狀態指示。系統異常狀態偵測 LED 電路主要利用反相閘(Not gate,HD7405P)邏輯 IC 搭配 100Ω 電阻，個別狀態接至對應之雙色 LED 之 Pin 腳上，電路接法如圖 A-43 所示。

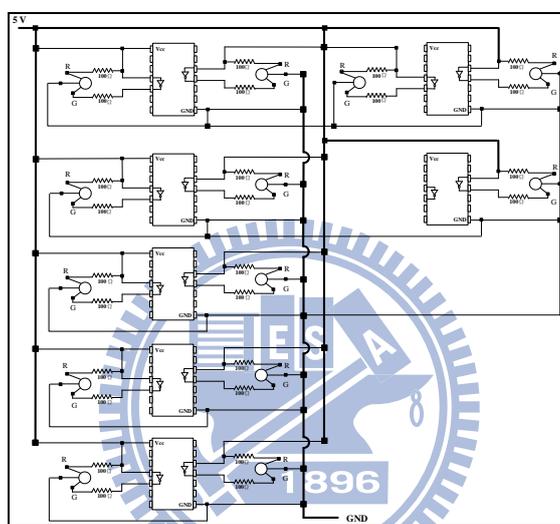


圖 A-43 系統異常狀態偵測 LED 電路設計

WK2008 系統利用雙色 LED 顯示系統狀態，無觸發狀態時，LED 呈現綠色；而當對應之狀態觸發時，則呈現紅色。而對應之狀態則是利用 PCI-1739U(Device01)的輸出埠做為訊號輸出，輸出埠與對應狀態對應如表 A-15 所示。

Precaution State		Emergency State	
Trigger State	Port	Trigger State	Port
T.C.&T.C.(Ref) $|\Delta T| > 4^{\circ}\text{C}$	PA00	System Power Glitch	PA06
Temp. \uparrow Set&Read $|\Delta T| > 2^{\circ}\text{C}$	PA01	Reactor Temp. $> 1250^{\circ}\text{C}$	PA07
Temp. \downarrow Set&Read $|\Delta T| > 2^{\circ}\text{C}$	PA02	Reactor press. $\Delta P > 50 \text{ mbar/s}$	PB00
Reactor pressure $> 1090 \text{ mbar}$	PA03	Temp. \uparrow Thermocouple open circuit	PB01
Reactor temperature $> 1200^{\circ}\text{C}$	PA04	Temp. \downarrow Thermocouple open circuit	PB02
Sample unload state check	PA05	Pneumatic N_2 pressure $< 4 \text{ bar}$	PB04
Reactor keeps saturated pressure	PB03		

表 A-15 系統異常狀態偵測與其 PCI-1739U(Device01)輸出埠對應表
LED 面板設計如圖 A-44 所示，邏輯 IC 硬體規格請參閱附錄 G G-G。

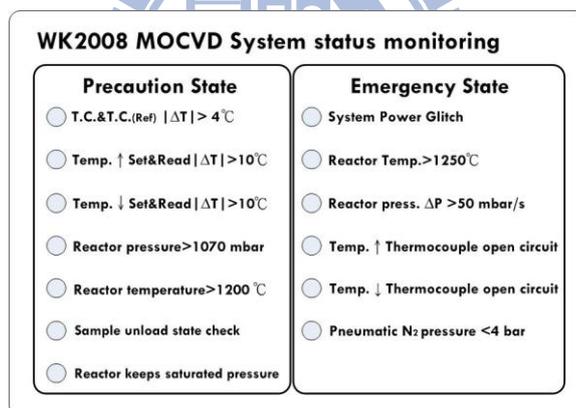


圖 A-44 系統異常狀態偵測 LED 面板

A-7-2 【WK2008 PCI-1739U(Device01) I/O 通訊埠配置】

表 A-16 為 WK2008 控制系統中，48 埠數位輸入/輸出(D I/O)通訊卡(硬體編號為：01，Device01)的通訊埠功能配置表，系統中只使用埠 0~2(port0~2)，共 24 個通訊埠，其中埠編號 2(port 2)中 PC04~PC07 這 4 個位元定義為訊號輸入(Input)，其餘皆為輸出。

Advantech PCI-1739U(Device01)數位輸入/輸出埠配置表		
埠編號	屬性	對應功能
PC07	Input	【Pneumatic N ₂ pressure < 4bar】 detection
PC06	Input	Reserved
PC05	Input	Reserved
PC04	Input	Reserved
PC03	Output	Reserved
PC02	Output	Reserved
PC01	Output	Reserved
PC00	Output	Pump N ₂ control , EM48
PB07	Output	DOR N ₂ , EM53
PB06	Output	DOR Vac , EM52
PB05	Output	Pump ON/OFF control
PB04	Output	【Pneumatic N ₂ pressure < 4 bar】 state trigger
PB03	Output	【Reactor keeps saturated pressure】 state trigger
PB02	Output	【Temp. ↓ Thermocouple open circuit】 state trigger
PB01	Output	【Temp. ↑ Thermocouple open circuit】 state trigger
PB00	Output	【Reactor press. ΔP >50 mbar/s】 state trigger
PA07	Output	【Reactor Temp.>1250°C】 state trigger
PA06	Output	【System Power Glitch】 state trigger
PA05	Output	【Sample unload state check】 state trigger
PA04	Output	【Reactor temperature>1200°C】 state trigger
PA03	Output	【Reactor pressure>1090 mbar】 state trigger
PA02	Output	【Temp. ↓ Set&Read |ΔT|> 2°C】 state trigger
PA01	Output	【Temp. ↑ Set&Read |ΔT|> 2°C】 state trigger
PA00	Output	【T.C.&T.C.(Ref) |ΔT|> 4°C】 state trigger

表 A-16 WK2008 控制系統 PCI-1739U(Device01)數位輸出/輸入埠功能對應表

A-8 WK2008 手套傳輸箱控制設計

A-8-1 【WK2008 手套傳輸箱控制設計】

圖 A-45 為 WK2008 系統中連結至手套箱的管路示意圖。其中，圓圈為控制按鍵，亦代表常閉型(N.C.)氣動閥；當按下該按鍵意即該氣動閥開啟，按鍵電磁迴路接法如圖 A-46(a)~(c)所示。

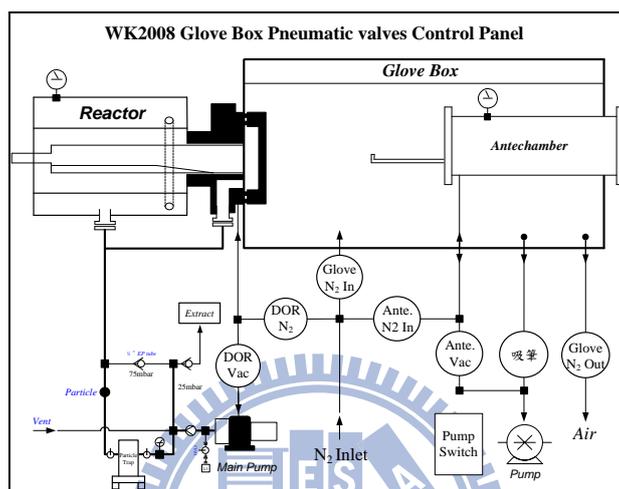


圖 A-45 WK2008 磊晶系統手套箱電磁控制電路面板

手套箱控制電路設計上為當使用者按下按鍵時，該迴路的氣動閥開啟。其迴路主要可以分為連結至氮氣源端(N_2 inlet)，及連接至泵浦端(Pump)。個別控制按鍵透過電磁閥控制其相對應的常閉型氣動閥，而連接在管路中的氣動閥個別有其特定功能，可分為進氣及抽氣功能；其中 N_2 In、Glove N_2 In、Ante. N_2 In 這 3 個按鍵所控制之氣動閥即為進氣功能，末端連結至 N_2 Inlet 端；而 Vac、Ante. Vac、吸筆這 3 個按鍵所控制之氣動閥即為抽氣功能，末端連結至泵浦端；而 Glove N_2 out 該按鍵所控制之氣動閥功能為將手套箱中多餘之氮氣排至大氣中。手套箱中恆定為正壓(約大於室壓 4 mbar)，Glove N_2 In 及 Glove N_2 Out 由手套箱中的壓力偵測器(詳見附錄 G G-K)所控制，使手套箱內的壓力維持在一定範圍內。Ante. N_2 In 及 Ante. Vac 這 2 個按鍵所連結之氣動閥目的為控制 Antechamber 內的氣體充抽，為避免外界大氣混入手套箱內，Antechamber 一旦開啟後，要打開連結至手套箱內部的閥門前，需做 5 次 的氮氣充抽(由讀取 Antechamber 內的負壓型壓

力錶頭顯示壓力值)，以稀釋 Antechamber 內的大氣。

N₂ In 及 Vac 這 2 個按鍵所控制的氣動閥分別為 DOR N₂(N.C.)及 DOR Vac(N.C.)。在 WK2008 磊晶系統的反應腔末端閥門(連結至手套箱)，在閥門本體內有雙 O 型環(Double O-rings, DOR)的設計，主要目的為利用真空泵浦將雙 O 型環間隙抽至真空，利用壓力差以達到閥門密封效果，以防手套箱氣體倒灌至反應腔體中。Vac 所控制之氣動閥連結至系統真空泵浦 (Vac 按鍵一般使用為當真空泵浦開啟時按下)，而 N₂ In 所控制之氣動閥則連結至外部氮氣源，如要破除雙 O 型環間隙的真空狀態，按下該按鍵即可。在 N₂ In 的按鍵的電磁控制迴路上，外加了系統狀態判定；當系統控制程式送出樣品取出狀態確認(Sample Unload state Check)時(此時程式面板上 Sample Unload state Check 狀態顯示為綠燈)，此時按下 N₂ In 按鍵，氣動閥才有動作(開啟)。

註：控制程式樣品取出狀態(Sample Unload state Check)判定如下：

1. 氣體傳輸管路內載流氣體全為氮氣。
2. 系統 Epifold 端全部切換至 Vent。
3. 系統內所有 III 族、V 族分子源關閉。
4. 腔體壓力大於 1000mbar。
5. 所有溫控器溫度讀取值皆低於 100℃。

A-8-2 【WK2008 手套傳輸箱控制按鍵電磁迴路接法】

WK2008 手套傳輸箱控制按鍵電磁迴路可分為交流 110V 及直流 24V 供電等兩種電磁迴路，其中除了 DOR N₂ 及 DOR Vac 這 2 個電磁迴路為直流 24V 以外，其餘電磁控制迴路皆為交流 110V，完整的電路接法如圖 A-46(a)~(c)所示。

註：控制按鍵功能為按下開關，3-4 導通，1-2 斷路；反之 1-2 導通，3-4 斷路。

圖 A-46(c)之 DOR N₂ 電磁控制迴路中串聯直流固態繼電器(D.C. SSR)輸出端，該繼電器輸入端為系統偵測狀態(Sample unload state check)的判定輸出；當 PCI-1739U(Device01)的 PB07 位元邏輯輸出為真(Logic 1)時，SSR

輸出端導通；反之 SSR 輸出端斷路，按鍵無作用，且氣動閥維持常閉狀態。

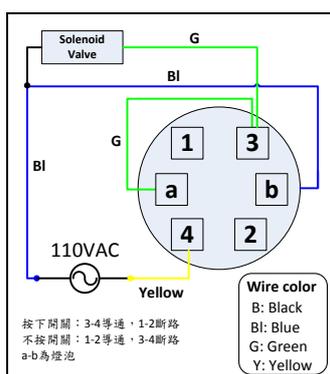


圖 A-46(a) Glove In、Ante.N₂ In、Ante.Vac、吸筆、GloveN₂ Out 按鍵電路接法

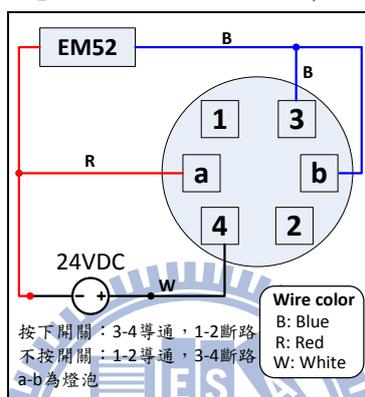


圖 A-46(b) DOR Vac 按鍵電路接法

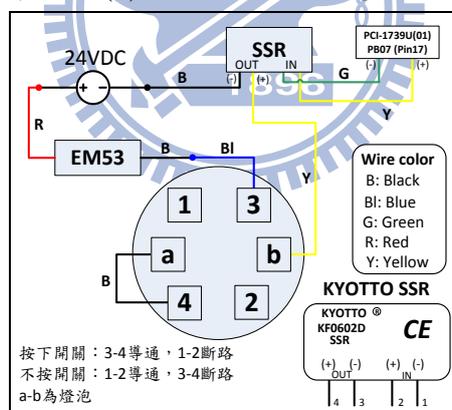


圖 A-46(c) DOR N₂ 按鍵電路接法

A-9 WK2008 腔體及 RF 冷卻系統介紹

WK2008 磊晶系統設計有循環水系統，用以冷卻反應腔體及 RF 高週波加熱系統。在腔體冷卻上分為上、下蓋板冷卻、腔體外壁冷卻及 RF 加熱線圈進反應腔體之法蘭接頭端(RF Coil Flanges)冷卻(內部為 O 型環封真空)；RF 加熱系統冷卻則可分為諧振調頻器(Tuner)冷卻、加熱線圈(Coil)冷卻，及高週波電源供應器(RF power supply)冷卻。腔體及上、下 RF 加熱系統各

自有其獨立之循環冷卻水。

A-9-1 【RF 加熱系統循環冷卻水迴路】

RF 加熱系統之循環冷卻水路為一封閉迴路，藉由冷卻風扇機外加散熱銅板以達到降低循環水之溫度。

圖 A-47 為 WK2008 系統中上加熱系統冷卻水管路接法，其中 RF 高週波電源供應器(RF Power Supply)冷卻水接口為 1 進 1 出，諧振調頻器(Tuner)冷卻水接口為 1 進 2 出，Tuner 上的環型無氧紅銅環(Circular Oxygen-free Copper coil)冷卻水接口為 1 進 1 出；其中三通接頭口徑皆為 12mm Swagelok 接頭，材質為不銹鋼(Stainless steel 316L)，連接水管規格為 12×8mm(外徑 12mm；內徑 8mm)，材質為 PU(聚氨酯，Poly Urethane)。

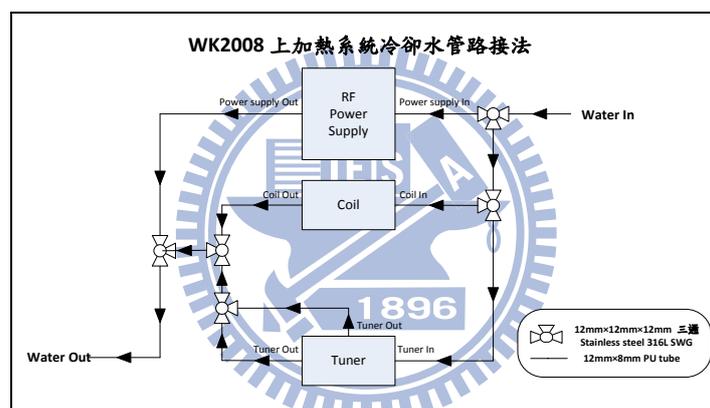


圖 A-47 WK2008 上加熱系統冷卻水管路接法

圖 A-48 為 WK2008 系統中下加熱系統冷卻水管路接法，其中 RF 高週波電源供應器(RF Power Supply)冷卻水接口為 1 進 1 出，諧振調頻器(Tuner)冷卻水接口為 1 進 2 出，Tuner 上的環型無氧紅銅環冷卻水接口為 1 進 1 出；其中三通接頭口徑皆為 12mm Swagelok 接頭，材質為不銹鋼(Stainless steel 316L)，連接水管規格為 12×8mm(外徑 12mm;內徑 8mm)，材質為 PU(聚氨酯，Poly Urethane)。

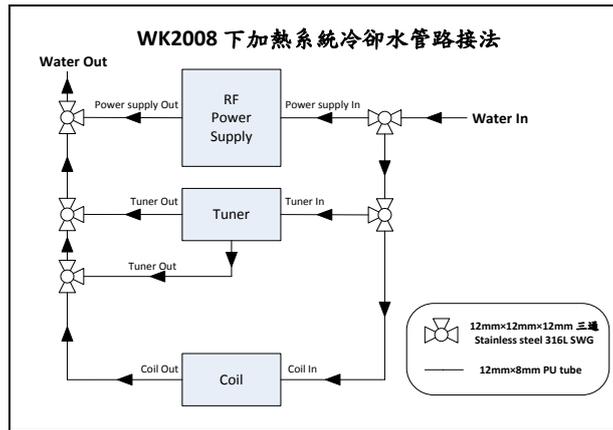


圖 A-48 WK2008 下加熱系統冷卻水管路接法

A-9-2 【反應腔腔體外壁(Reactor wall)及上蓋板冷卻水迴路】

WK2008 反應腔為冷壁式(Cold wall)設計，而腔體之循環冷卻水路為開放迴路，為 2 進 2 出；在腔體冷卻上分為上、下蓋板冷卻、腔體外壁冷卻及 RF 加熱線圈進反應腔體之法蘭接頭端(RF Coil Flanges)冷卻。外腔體壁及上蓋板冷卻為同一循環水迴路，循環水路進水端(Water In)由腔體側壁(Side wall)下方進入，在腔體上有 2 個出水端，一為在腔體左上方，其出水端連接至上蓋板水路進水端(即圖 A-49 彎曲線所示)；另一出水端位於靠近腔體內襯層(Liner)的方形不銹鋼外壁(連結至手套箱端)，該出水端和上蓋板出水端經由三通閥連接至循環水路出水端(Water out)。

註：腔體外壁與 Liner 方形不銹鋼外壁(連結至手套箱端)循環水路為通路，如圖 A-49 中橫虛線(-----)所示。

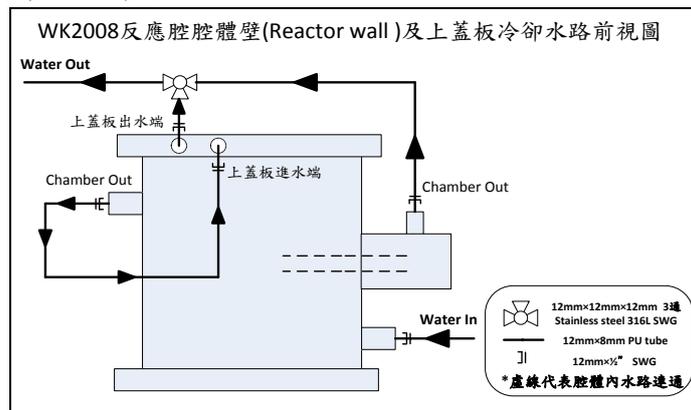


圖 A-49 WK2008 反應腔外腔體壁(Reactor wall)及上蓋板冷卻水管路接法

A-9-3 【RF 加熱線圈法蘭接頭(RF Coil Flange)及下蓋板冷卻水迴路】

RF 加熱線圈法蘭接頭(RF Coil Flanges)及下蓋板冷卻水為同一迴路(開放水路)，冷卻水由下蓋板之 RF 加熱線圈法蘭接頭的冷卻外管進水端進入，其出水端連接至下蓋板之進水端，而下蓋板之出水端連接至上蓋板的 RF 加熱線圈法蘭接頭的冷卻外管進水端，最後其出水端連接至循環水路出水端，水路走法如圖 A-50 所示。

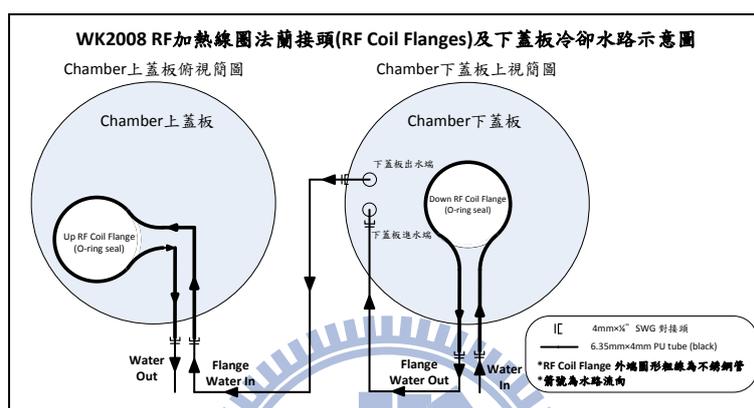


圖 A-50 RF 加熱線圈法蘭接頭(RF Coil Flanges)端及下蓋板冷卻水路示意圖

A-10 鈀金屬膜(Palladium cell)氫氣純化器加熱系統

一般 MOCVD 系統中所利用的氫氣，在進入系統管路前需經過純化過程(H₂ Purification process)，以確保氫氣的純淨度。

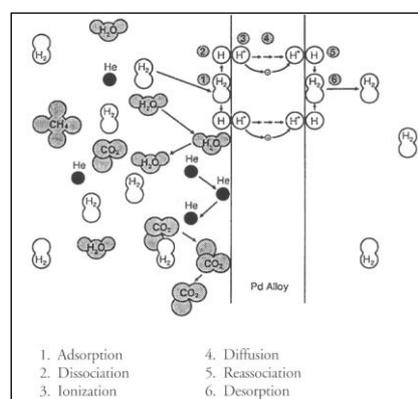
A-10-1 【鈀金屬特性】

1863年Deville和Troost在實驗中發現過渡金屬鐵和鉑有吸氫的特性，這是第一次發現氫氣會有滲透過渡金屬的現象，之後Graham便進行類似的實驗，發現所有的過渡金屬中，鈀金屬(Palladium)對氫氣的溶解度最佳。換言之當氫氣通量很多時，經由滲透的方式穿過鈀金屬，可發現氫氣滲透量在鈀金屬上是優於其他過渡金屬。

鈀是一種相當特殊的金屬，在室溫(300K)時，鈀金屬有非常好的吸氫能力，可以吸收比自身大900倍體積的H₂。

A-10-2 【鈀膜(Palladium membrane) 氫氣純化原理】

鈀或鈀合金薄膜對氫氣之所以具有高度選擇率，主要是因為氫氣在鈀金屬膜中的傳送機制所造成。其進行步驟如圖A-51所示，整理如下：氫氣於高壓側(圖左側)與鈀膜表面接觸後，氫分子會產生可逆解離的化學吸附(Adsorption)及解離(Dissociation)反應而形成氫原子，離子化(Ionization)氫原子會溶解進入鈀膜晶格(Lattice)中，而因為兩側濃度差造成氫原子擴散(Diffusion)至鈀膜的低壓側(圖右側)，氫原子最後再結合(Re-association)成氫氣分子脫附(Desorption)於鈀膜表面，反應過程如圖A-51中編號所示。



圖A-51 氫氣分子滲透鈀膜(Palladium membrane)之傳輸反應

氫原子在鈀膜中的擴散率和鈀膜兩端壓力差、鈀膜厚度，及膜操作溫度有關，當操作溫度高於300°C時，氫氣傳輸速率主要受氫原子在鈀膜的擴散機制所限制，而小於300°C穿透速率主要受氫分子的吸附及脫附所主導，由於鈀金屬會有相轉變(Phase transition)^{註1}，所以必須謹慎的選擇操作溫度；另一方面所使用的載體為不銹鋼管，當操作溫度高於700°C時，會因鈀金屬與不銹鋼之間的擴散作用(Inter-metallic diffusion)，進而間接破壞鈀金屬的晶格結構，致使鈀膜失去對氫氣的滲透選擇性。

註1：當氫與鈀金屬接觸時，氫分子會分解為氫原子而吸附在鈀金屬的表面上，接著氫原子藉由擴散進入鈀晶格，形成氫化鈀(palladium hydride)的固態溶液，而在不同的溫度及氫氣分壓下，氫化鈀固態溶液會形成兩種不同的晶相(Phase)，約在300°C時，鈀金屬會發生相變化；當相變化發生時，因大量的氫原子進入鈀晶格中填滿八面體的空隙位置，會使鈀晶格膨脹，因此在低於300°C時，鈀

晶格會造成不連續的晶格膨脹與收縮，導致鈀膜破裂，此即為氫脆化現象。

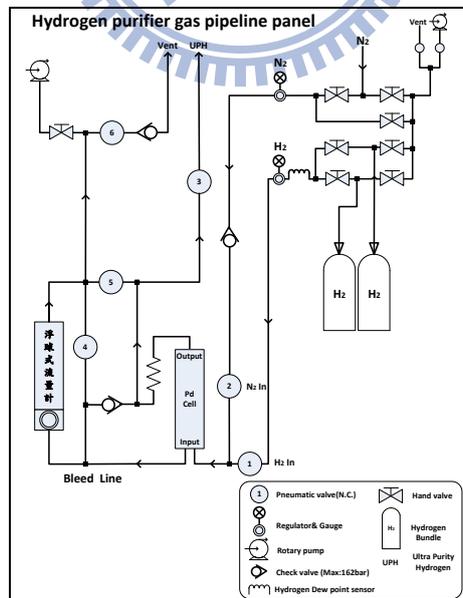
A-10-3 【氫氣純化器管路設計】

圖A-52為氫氣純化器管路設計圖，Pd cell即為鈀膜氫氣純化器，1、2號氣動閥控制氮氣/氫氣的切換，3號氣動閥控制純化後的氫氣(UPH, PH₂)是否進入系統中，6號氣動閥則提供Bleed管路排至Vent端的開關控制，4、5號氣動閥則提供當管路外接泵浦時，通往Pd cell進出口端的開關控制；此外管路上所有的氣動閥皆為常閉型(N.C.)。

純化器進口端可供氮氣或氫氣切換進入純化器中，而當鈀膜降溫時，需切換成氮氣進純化器，有2個主要目的：1為防止鈀膜降溫時，通入氫氣造成鈀膜氫脆化，導致鈀膜破裂；2為通入氮氣可防止水氣殘留，及帶走殘留在鈀膜上的雜質。

在氫氣純化器設計上，為避免未能滲透過鈀膜的雜質聚積於進口端，進而影響鈀膜純化效率，大約有5%的輸入氣體排至Vent端(排至大氣中)，管路上設計Bleed浮球式流量計即為控制Pd cell進口端排至Vent的氣體量。

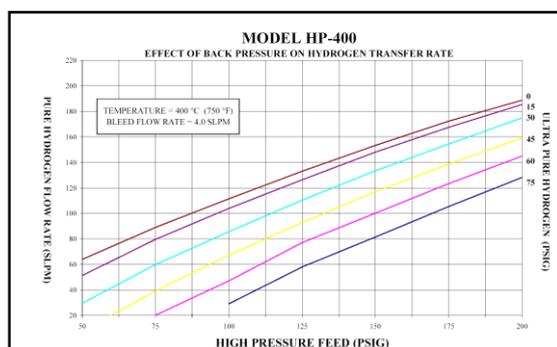
(註：Bleed流量計全流量約為315sccm。)



圖A-52 氫氣純化器管路設計圖

註1:一般氫氣進口端壓力設定為100psi，純化後氫氣壓力(即進系統之氫氣壓力)設定為45psi，所以鈀膜進出口端壓差為55psi，圖A-53顯示當進口端壓力為

100psi、出口端壓力為45psi、鈹膜溫度為400°C、Bleed流量為4SLM時，該Pd cell(HP-400)最大可提供約65SLM的氫氣量。



圖A-53 氫氣進出口端壓力差與Pd cell最大可提供氫氣流量對應圖

註2：氣動閥控制主要分為下列4種模式：

1. 正常H₂純化且通入系統：氣動閥在該模式下設定為1、3、5開啟，2、4、6關閉。經純化後的高純度氫氣(UPH)即通入系統。
2. 正常H₂純化但不通入系統：氣動閥在該模式下設定為1、5、6開啟，2、3、4關閉，經純化後的高純度氫氣(UPH)經由逆止閥通往Vent端。
3. N₂ purge：氣動閥1、3、4、5關閉，2、6開啟；氫氣經由浮球式流量計決定流量後，通往Vent端。
4. 外接泵浦：氣動閥4、5開啟，1、2、3、6關閉。

A-10-4 【氫氣純化器控制電路設計】

圖A-54為系統氫氣純化器控制電路設計圖，該電路主要藉由溫控器輸出控制氫氣純化器加熱系統迴路，藉以控制鈹膜溫度。在電路設計上有2個主要考量，其1為當溫度偏差過大時，為避免氫氣持續進入Pd cell中進而造成鈹膜破裂，需緊急阻止氫氣進入純化器內；2為限制鈹膜純化器可加熱的上限溫度，避免過高溫度破壞晶格結構，詳細電路設計如下所述。

OMRON溫控器提供1組直流輸出(DC output, 12V/21mA)，2組警告輸出(Alarm Output, Switch)，而鈹膜加熱器為開關控制，基本上若給予220VAC電源鈹膜即加熱，若220VAC電源斷路鈹膜不加熱；該直流輸出訊號藉由直流控交流的固態繼電器^{註1}(SSR, DC-AC)來控制純化器的220VAC電源迴路開關，進而達到鈹膜溫度控制；而兩組警告輸出(Alarm)在溫控器內部為

開關控制，當警告狀態觸發時，連接至警告輸出迴路導通，反之則迴路斷路。

OMRON E5CN溫控器的2組警告輸出設定如下：

ALM1(Absolute value lower limit)：當 $PV < 400^{\circ}\text{C}$ ，ALM1狀態觸發。

ALM2(Derivation upper/lower range)：當 $SV - PV \leq 35$ 、 $PV - SV \leq 40^{\text{註2}}$ ，ALM2狀態設定為距設定溫度上限區間為 40°C ，下限區間為 35°C ，該狀態觸發；如溫度差值在該上下限區間內，ALM2狀態觸發。

註1：固態繼電器(Solid State Relay)動作機制如圖A-54左方框說明顯示。

註2：PV, Process value，目前量測溫度；SV, Set point value，設定溫度，溫控器溫度設定為 350°C 。

【控制電路作動說明】

控制電路如圖A-54所示，其中接線編號附於線旁，圓圈內數字為繼電器接腳編號，圖A-54左側為說明項，Switch為控制220VAC輸入電源開關。

溫控器ALM1，ALM2輸出個別連接至獨立迴路，ALM1輸出主要目的為控制圖A-54中型號為KUMP繼電器(Relay)的A-B接腳 (220VAC迴路)導通與否^{註1}，當A-B接點端電壓為220VAC(ALM1觸發， $PV < 400^{\circ}\text{C}$)時，由於該繼電器的6、9號接點短路，220VAC的1號接點此時經由5號線與型號為SSR25-DA固態繼電器的2號輸出接點短路^{註2}，而當SSR25-DA輸入端端電壓為12VDC時(由溫控器Output1輸出)，其SSR交流輸出迴路(220VAC)導通，Pd cell控制端即與220VAC電源形成封閉迴路^{註3}，鈦膜加熱器即開始加熱鈦膜；反之若溫控器ALM1未觸發($PV > 400^{\circ}\text{C}$)，SSR輸出迴路斷路(繼電器6號接點開路)，縱使溫控器有輸出(Output 1)，Pd cell控制迴路未接到220VAC電源(1號端點)，鈦膜不加熱，此時可避免鈦膜溫度過高($PV > 400^{\circ}\text{C}$)進而破壞晶格結構。

ALM2設計目的為當溫控器溫度偏差過大(超過設定溫度之上下限區間，上限 40°C 、下限 35°C)時，強制斷絕氫氣進入純化器中。電路設計即利用交流控交流SSR(AC-AC，型號為SSR25-AAH)來控制氣動閥電磁控制電路的

110VAC總電源開關。當ALM2觸發時(溫度差值在上下限區間內), *FORTEK* SSR輸入迴路與220VAC電源導通(SSR輸入端3號腳已和220VAC的2號腳短路), *FORTEK* SSR輸出迴路短路, 則電磁控制電路的110VAC主電源迴路導通, 氣動閥受控; 反之ALM2狀態未觸發時(溫度差值大於上下限區間), *FORTEK* SSR輸出迴路斷路, 電磁控制電路的110VAC主電源迴路斷路, 電磁控制電路改由UPS供電, 此時強制切換氫氣進入純化器(此時管路中1、3、4、5號氣動閥關閉, 2、6號氣動閥開啟, 利用N₂ purge Pd cell的進口端, 氫氣量可由浮球式流量計調整); 待UPS^{註4}供電完畢後, 所有氣動閥關閉。

註1: 圖A-54中紅線已連接至220VAC電源的2號接腳, 故只要A腳位連結至220VAC的1號腳位, 該繼電器(*KUMP*)的A-B腳位端電壓為220VAC, 繼電器即動作; 而A腳位連接至溫控器(*E5CN*)的ALM1輸出, 又溫控器8號腳位已和220VAC電源的1號端點接通, 故當ALM1觸發時(*E5CN* 7,8腳位短路), 此時即可將220VAC電源1號端點短路至*KUMP*繼電器的1號腳位, 並藉由繼電器輸出迴路設計, 即可供給鈹膜加熱器220VAC交流電源, 完成加熱。

註2: 220VAC分為1號及2號接點 , Pd cell電源另一端(圖A-54紅線)接至220VAC的2號接點。

註3: 在圖A-54中, 氫氣純化器(Pd H₂ Purifier)共有4條電源接線, 分別為紅線、白線、黑線、綠線, 共4條; 黑線及白線為純化器220VAC電源線, 其中白線接至220VAC的2號端點, 黑線則透過盤面開關(Switch)接至220VAC的1號端點, 所以Switch也為氫氣純化器的電源開關; 而紅線及白線則接至氫氣純化器的加熱控制迴路, 透過SSR控制220VAC控制迴路開關來決定升/降溫, 綠線則為地線。

註4: 電磁控制電路中設計UPS目的為當控制電路110VAC總電源斷電時, 能有緩衝的時間利用氫氣將氫氣純化器中的殘餘氫氣移除, 以避免鈹膜在降溫過程中, 殘餘氫氣造成鈹膜因氫脆現象而破裂。

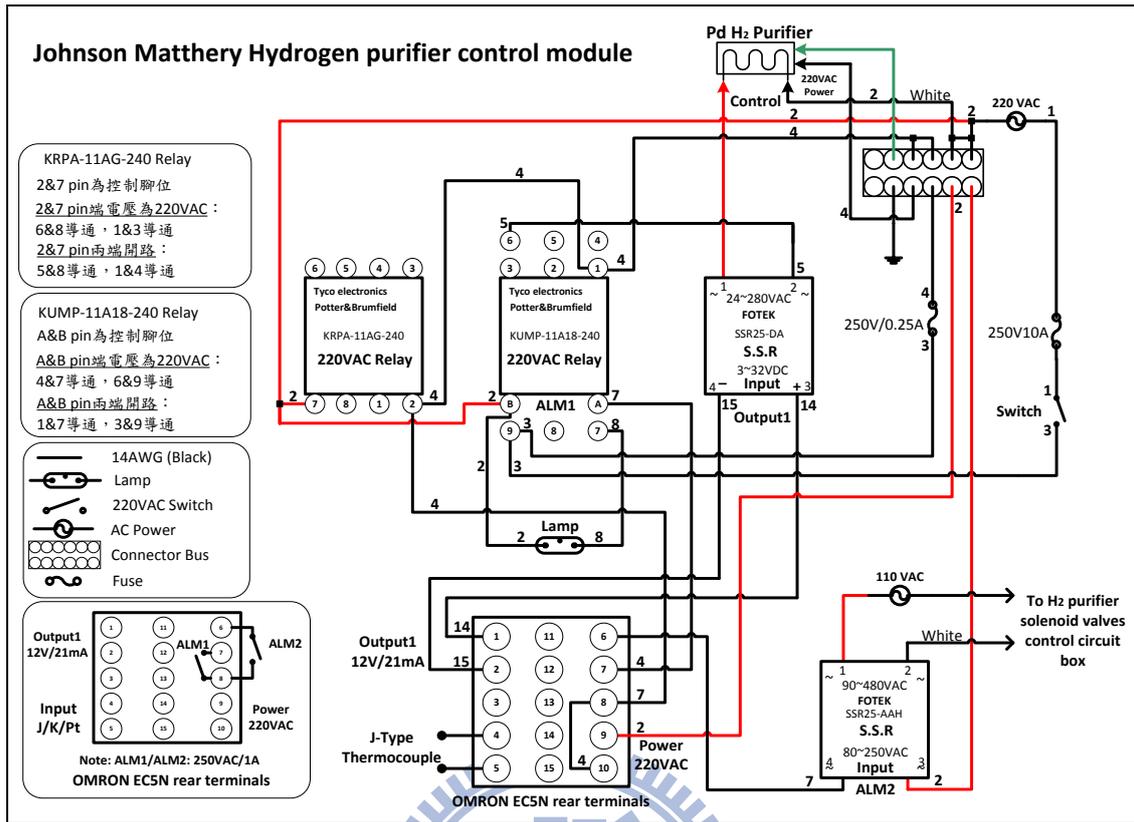


圖 A-54 Johnson Matthey 氫氣純化器 (Pd cell) 控制電路設計

【参考文献】

- [1]. Akinori Koukitu, Naoyuki Takahashi, Tetsuya Taki and Hisashi Seki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, pp. **L673-L675** (1996).
- [2]. Akinori Koukitu, Tetsuya Taki, Naoyuki Takahashi, Hisashi Seki, *J. Cryst. Growth* **197**, **99** (1999).
- [3]. Akinori Koukitu ", Naoyuki Takahashi, Tetsuya Taki, Hisashi Seki, *J. Cryst. Growth* **197**, **306** (1999).
- [4]. Akinori Koukitu, Hisashi Seki, *J. Cryst. Growth* **189**, **13** (1998).
- [5]. Akinori Koukitu, Hisashi Seki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, pp. **L1638-L1640** (1996).
- [6]. Haruo Sunakawa, A. Atsushi Yamaguchi, Akitaka Kimura and Akira Usui, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, pp. **L1395-L1397** (1996).
- [7]. E. L. Piner, M. K. Behbehani, N. A. El-Masry, F. G. McIntosh, J. C. Roberts, K. S. Boutros, and S. M. Bedair, *Appl. Phys. Lett.* **70**, **461** (1997).
- [8]. F. Scholz, V. Hairle, F. Steuber, H. Bolay, A. Dornen, B. Kaufmann, V. Syganow, and A. Hangleiter, *J. Cryst. Growth* **170**, **321** (1997).
- [9]. Matteo Bosi and Roberto Fornari, *J. Cryst. Growth* **265**, **434** (2004).
- [10]. S. Suihkonen, T. Lang, O. Svensk, J. Sormunen, P.T. Torma, M. Sopanen, H. Lipsanen, M.A. Odnoblyudov, and V.E. Bougrov, *J. Cryst. Growth* **300**, **324** (2007).
- [11]. Yong Suk Cho, Hilde Hardtdegen, Nicoleta Kaluza, Roger Steins, Gero Heidelberger, Hans Luth, *J. Cryst. Growth* **307**, **6** (2007).
- [12]. P. FINI, X. Wu, E. J. TARSA, Y. GOLAN, V. SRIKANT, S. KELLER, S. P. DENBAARS and J. S. SPECK, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 37, pp. 4460-4466(1998).
- [13]. H.X. Wang, Y. Amijima, Y. Ishihama, S. Sakai, *J. Cryst. Growth* **233**, **681** (2001).
- [14]. B. Mitrovic, A. Gurary, L. Kadinski, *J. Cryst. Growth* **287**, **656** (2006).

附錄B WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式設計

本章節主要為描述WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式設計。一開始先對WK2008 MOCVD磊晶程式設計特點及考量做分項介紹，再來則針對WK2008控制系統前置面板顯示介面以及WK2008菜單編輯程式(Recipe compile program)所提供的編譯功能介紹、控制指令編寫方法等做說明。磊晶控制程式主要設計分為主程式、安全模式程式、系統異常狀態偵測程式等3大項，其中主程式又可分為菜單控制(Recipe characters control)及系統潔淨(System purge)設定，而主程式中菜單控制及潔淨程式則利用使用者編輯的菜單指令字元控制其程式狀態切換；其中程式架構內亦設計了區域變數(Local variable)型態的中斷旗標布林(Interruption flag boolean)真偽判定，以作為主程式與安全模式的程式主控權轉移，文章中亦詳細說明主程式與安全模式中的硬體設定及對應之程式設計；此外考量到系統可能發生的緊急狀況，依據個別硬體特性及個別狀況下的最佳系統處理，設計出符合系統需求之安全模式程式，以確保人員安全及降低系統傷害；系統異常狀態偵測程式設計上為持續偵測各項系統異常狀態，以當作安全模式程式的觸發控制訊號，即為主程式與安全模式兩者主控權轉移的中斷旗標；此外控制程式有多項附屬設計，其中包含提供時間資訊、MO分子源消耗計算、系統供電狀態偵測、硬體輸出狀態監測記錄、.txt文字檔輸出等；提供使用者完整的磊晶程序資訊。本章節安排為著重介紹菜單編譯(Editing&compiling)方法、程式面板資訊解讀、MOCVD磊晶程式設計理念、時序控制整合、安全模式分類考量等項；該內容皆不涉及LabVIEW程式設計語法，方便使用者概要性地了解程式設計重點。此外本章最後一節附錄提供完整的軟硬體介面控制程式設計細節和各式觸發狀態設計、建議排除方法、系統預設值等列表，進階使用者若有編修程式或修改偵測電路等需求可逕行查閱。

B-1 LabVIEW平台概述

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)是由National Instrument公司，於1986年所發展出一種繪圖程式語言，又稱為G·LabVIEW。在程式控制方面則是以圖形方式編輯程式，在程式結構部分，又可稱為虛擬儀表(Virtual Instrument, VI)的儀器控制軟體，而LabVIEW平台可完全整合各式通訊介面控制的系統平台，例如：GPIB、VXI、PXI、RS-232、RS-485等，以及支援資料擷取(Data Acquisition, DAQ)與影像擷取(Image Acquisition)的功能。

LabVIEW平台提供數種系統整合功能，包括建立系統資料庫與資料的蒐集、分析、顯示、以及儲存等功能。在程式發展方面，程式編輯者可藉由一些小程式去體驗使用LabVIEW的方便性，而LabVIEW所使用的專有名詞，及一些圖示符號都是一般科學家和工程師所熟悉，而不像C、C++等程式語言，必須透過文字語言敘述程式動作。不過LabVIEW也相對地保留一些傳統程式設計工具，提供編輯者善加利用；舉例來說，使用者可以在LabVIEW程式中，任何位置加入中斷點(Break-point)，做暫停程式的執行，或是設定以單步執行程式的功能。使程式在執行時，有如被賦予生命般更加靈巧，另一特點便是自動偵錯(Self-debug)功能，讓程式編輯者更容易設計程式，在LabVIEW程式的真實世界裡，從簡單的系統應用到複雜的程式執行，皆可利用圖控編輯方式來完成它。

不論LabVIEW帶給程式編輯者的方便性如何，程式最重要的部份是在人機介面的設計，是否可以做到真正虛擬儀表功能，而且更方便地使用，這才是程式設計的最終目的。所以說，前置面板是程式的靈魂核心。

B-2 WK2008 MOCVD System LabVIEW軟體控制簡介

WK2008 MOCVD 磊晶製程控制中我們利用LabVIEW圖控平台來撰寫程式，而在WK2008磊晶控制系統的軟體設計中，最大特點即是人機界面的設計，它是使用者與儀器之間最直接的接觸，因而親和性(Friendly)是程式設計上最大考量。在程式前置面板設計上我們以簡易的管路圖搭配對應不同狀態的色彩呈現，不但視覺上美觀，使用者亦能直接由前置面板上監控目前各項儀器及系統的即時狀況。

在MOCVD LabVIEW磊晶程式設計上主要有3大設計考量，分為精確時間控制、各項硬體控制整合、系統異常狀態偵測；下文將分項詳述之。

【精確時間控制】

在MOCVD磊晶控制程式設計上，其主要功能為整合各項硬體的數值讀寫，由於與硬體之間有大量的資料傳輸且磊晶程序需求精確時間控制及快速硬體反應，故程式在設計上需仔細評估時間精確度問題，而在MOCVD系統中步驟執行時間是以秒作為其最小單位，且步驟時間設定最小為1秒，在要求硬體快速反應的情形下，LabVIEW程式必須限定所有硬體讀寫需以毫秒(ms)作為其時間單位。而在WK2008 MOCVD磊晶系統中所監控的硬體數目繁多，包含18台數位式氣體流量計、6台數位式氣體壓力控制器、3台腔體溫度控制器、1台腔體壓力控制器、68個數位I/O埠(Digital I/O ports)、1台不斷電系統(UPS)等，詳細介面配置如圖A-24所示。由於數值傳輸資料量龐大，為達到精確時間控制及資料平行序列傳輸(Parallel sequential transmission)，我們使用4張8埠(共32個獨立通訊埠)RS-232平行序列通訊卡並利用其獨立通訊埠資料平行處理方式(Parellel data flow bus)，來解決單一纜線串列(Serial)所造成的整體通訊時間延遲，搭配程式撰寫技巧，可達到系統中所有氣體流量計、MKS腔體壓力控制器、Bronkhorst氣體壓力控制器(有機金屬分子源管路壓力控制器,簡稱MO分子源管路壓力控制器)等所

有硬體能同時在0.1秒內完成數值寫入，以達到快速反應要求；而溫控器由於有其自行獨立運作之時脈，系統仍可在0.145秒內完成溫控器單一指令寫入動作(一般溫度變化約需寫入7道指令，共耗時1秒)^{註1}。WK2008磊晶系統利用2張48埠數位I/O埠通訊卡來同時完成系統中68個數位I/O埠的邏輯0/1訊號輸入/輸出動作(#67 Out, #1In)，此外程式對於這67個數位輸出埠僅有邏輯(0/1)寫入動作，並無任何後續讀取動作，詳細配置請參閱A-3節內容。

除了上述各項硬體數值讀寫時間控制外，由於磊晶程式是以每次菜單步驟設定時間(秒)來作時序控制，程式任何動作皆不可影響該時序(Real time)運作；由於程式因應每次步驟對硬體讀寫的基本時間設計為限定寫入動作在每次步驟開始執行的0.1秒內完成(溫控器除外)，而後剩餘時間則依照各項硬體讀值所耗時間劃分程式迴圈讀取次數(N_r)^{註2}，每次皆然；此外為避免步驟銜接時，迴圈尚在執行讀值動作進而造成延遲；程式利用資料清空技巧，在步驟秒數倒數結束前1秒強迫中止所有迴圈讀值動作，以達到步驟銜接無時間差和菜單執行時間無延遲。

註1：由於溫度變化情況下溫控器寫入動作需耗時1秒，若需要溫控器執行升/降溫動作，菜單步驟執行時間需設定大於1秒以避免步驟銜接產生時間差。若前後步驟設定溫度相同(穩定溫度)，其步驟時間設定值最小為1秒。

註2：WK2008系統中各式硬體單次讀取時間設計不盡相同，如表B-1所列。

WK2008磊晶控制程式各式硬體數值讀寫時間規劃表				
		Write (sec)	Read at once (sec)	For loop "N" Calculation*
MFC	Ordinary"o"	0.1	0.5	$N_o = \left\lfloor \frac{t-0.4}{0.5} \right\rfloor$
	Ramping"r"	0.02	0.5	$N_r = \left\lfloor \frac{t}{0.5} \right\rfloor$
MO Source P.C. (Bronkhorst)		0.1	0.5	$N_{III} = \left\lfloor \frac{t-0.1}{0.5} \right\rfloor$
MKS		0.1	0.3	$N_p = \left\lfloor \frac{t-0.1}{0.3} \right\rfloor$
Eurotherm		0.145**	0.12	***

表B-1 WK2008磊晶控制程式各式硬體數值讀寫時間規劃表

* t：菜單該次(列)步驟設定秒數。

**Eurotherm指令控制較繁複，其寫入時間代表寫入單一指令所需耗時。

***Eurotherm溫控器For迴圈讀值次數詳細計算請參閱附錄VIIA2-6。

註3：WK2008控制系統共有4張8埠RS-232的平行序列傳輸介面卡，故共有32個提供平行傳輸的RS-232通訊埠，各式硬體有其對應的獨立通訊埠。而系統工業電腦內建2個RS-232序列通訊埠(Com1、Com2，非平行序列)則個別連接至UPS與參考溫控器(Temp. Ref)等無嚴格時間要求的硬體資料讀取用。

【各項硬體控制整合】

LabVIEW磊晶程式最主要的功能為整合磊晶系統中的各項硬體控制，亦即整合各項硬體數值讀寫。在『精確時間控制』內容中提到系統中所需控制的硬體種類及數目，而WK2008 MOCVD磊晶系統介面整合再將硬體控制區分為：腔體溫度控制、腔體壓力控制、MO分子源管路壓力控制、氣體流量控制、氣體傳輸管路之氣動閥邏輯狀態設定、真空系統管路之氣動閥邏輯狀態設定、110VAC(1 ϕ)供電狀況監控、步驟執行時序等控制項。各項硬體控制項皆由為獨立子程式型態整合於程式架構內，程式亦根據各式硬體特定指令碼(Source code)配合RS-232通訊協定作數值讀寫動作。在各項子程式編程上，其中腔體溫度控制最為繁複，本章將有大篇幅的詳細穩定溫度控制介紹；而氣動閥邏輯狀態設定主要是將使用者所填入之菜單字元依A-4-2小節內所提及的控制邏輯個別寫入相對應的邏輯布林真偽判定式中。由於系統中各項硬體皆為數位式介面(RS-232)，故程式在控制上僅需依其硬體數位通訊規範下達相對應的指令即可作數值讀寫，在使用上可免去類比/數位訊號轉換、數值轉換解析度等問題，大大減低了程式設計的困難度。而在程式設計上，我們即利用『獨立程式區塊』和『子程式』設計技巧並依照上述各式硬體來作控制項畫分，以達到各項硬體資料讀寫平行整合，避免時間延遲和獲得硬體讀寫時脈同步化(Clock synchronization)。

LabVIEW控制程式亦在前置面板上設計了因應系統緊急狀況的強制中斷製程(Abort Process)按鍵、節流閥強制關閉/控制按鍵、跳電倒數計時器("Power Glitch" timer reset)重置按鍵、真空泵浦開關控制按鍵等供使用者應變各項系統突發狀況，各式按鍵有其特定使用時機，後續文章將分類詳述各項硬體及控制按鍵的程式設計概念。

【系統異常狀態偵測】

LabVIEW控制程式亦設計有各項系統異常狀態監測，異常狀態依其嚴重性分成早期警示(Early warning)、異常預警(Precaution state)及緊急狀態(Emergency state)等3大項系統狀況監控，系統早期警示包含溫度偏差、流量偏差等，系統異常預警包含腔體溫度/壓力過高、跳電等，系統緊急狀態則包含腔體壓力快速上升、腔體溫度大於上限值(1250°C)、熱電偶斷路、氣動閥N₂供氣源壓力不足等。若為早期警示、異常預警等狀況，程式將於前置面板上以燈號轉換顯示之；若為緊急狀態，控制程式將強制中斷製程程序以確保人員及系統安全，各式磊晶系統突發狀況的硬體應對設定考量和程式架構設計理念等，本章後續將分項詳細介紹。此外為方便使用者詳細記錄整體製程程序中系統中各式硬體的即時輸出狀況，LabVIEW控制程式亦設計了系統硬體狀態監測紀錄輸出(.txt)文字檔，以利使用者查閱。

本章在內容編排上將先介紹(B-3)程式前置面板設計，包含顯示和控制介面等；後續再說明菜單編譯程式的撰寫和使用方式(B-4)，包含指令編譯器設計、指令編碼方式、除錯功能設計等內容，作為使用者編輯菜單參考；並將菜單使用者編譯介面、特定格式(.txt)的指令字元/數值編譯檔(Compiled file)輸出，與程式讀取編譯檔方式等關係做完整陳述。

在介紹完前置面板與菜單功能後，後續內容將完整敘述控制程式的整體架構(B-5)，包含指令字元/數值編譯檔陣列編碼(Array indexing)、主程式、系統異常狀態偵測程式等主要架構、區域變數設計概念等；以期讀者能瞭

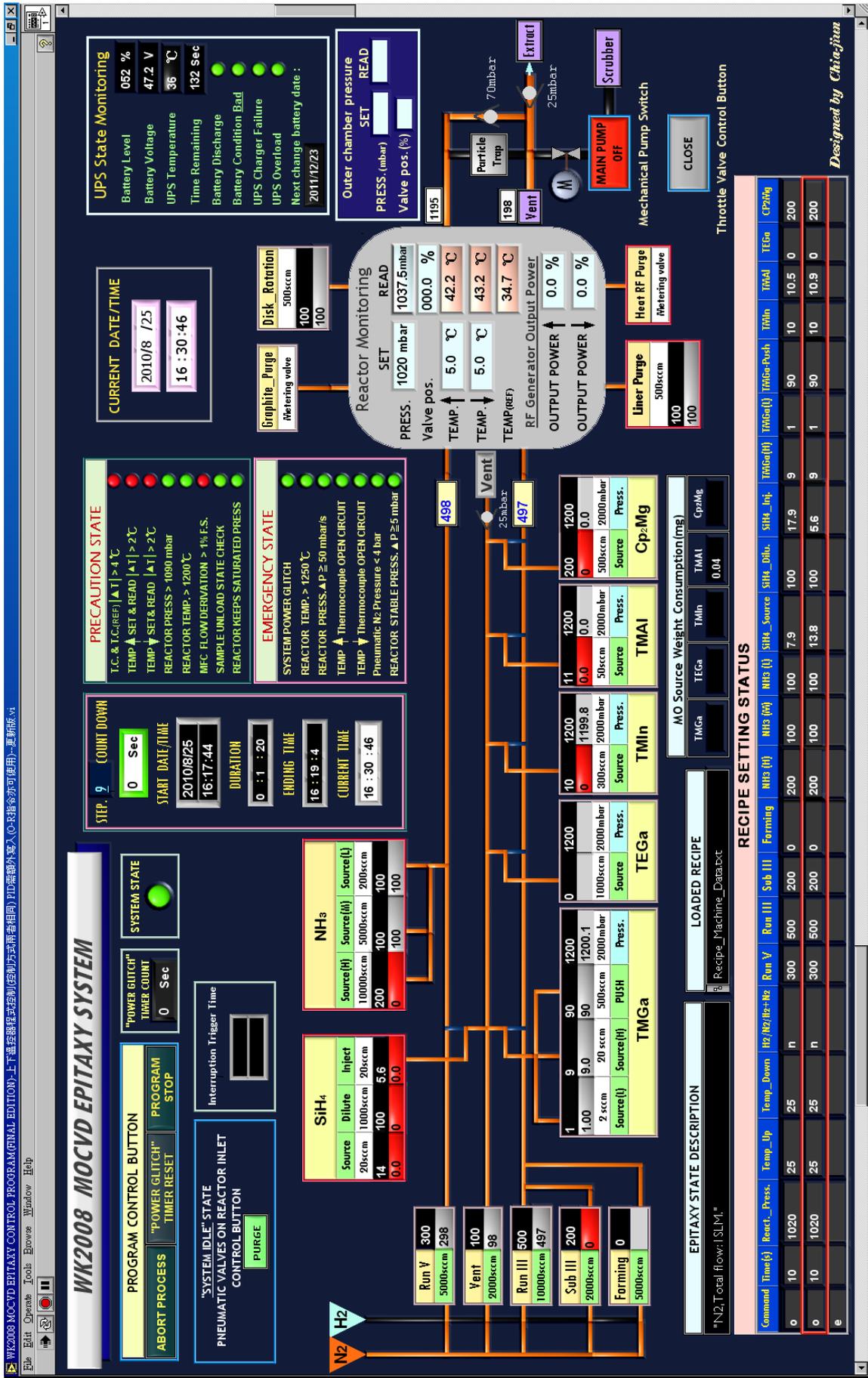
解程式設計整體架構，而系統潔淨和安全模式等程式設計架構則分述於B-6、B-7小節中。而針對主程式迴圈中，內部獨立硬體傳輸介面之指令控制、寫法等設計細節，由於內容過於繁複且涉及程式設計技巧，為求文章簡潔明瞭，則將之置於B-8小節附錄中分項介紹。

B-3 WK2008 MOCVD磊晶系統LabVIEW程式前置面板

在開始敘述程式設計架構前，本章將先由前置面板介紹開始，由於前置面板為使用者直接接觸介面，先行介紹前置面板顯示資訊/控制按鍵功能將有助於使用者快速瞭解LabVIEW磊晶程式的基本操作。

為了讓使用者方便監控系統狀態，前置面板設計成簡易的管路圖型式，而各式硬體讀值視窗依其屬性分類置放，使用者在電腦螢幕上即可同步監控系統各項狀態，包含時間資訊、硬體回傳值、載流氣體種類、管路內氣體流向分布、分子源開關狀態、腔體狀態等資訊；而前置面板上亦搭配磊晶程序的各項要求設計多項控制按鍵，方便使用者作系統狀態切換、氣動閥開關、節流閥開關等操作；詳細按鍵操作時機、設計邏輯等內容將於後續小節中陳述。

圖B-1為控制程式前置面板，其介面主要分為顯示及控制介面等2大項，詳見下文中分類項說明。



圖B-1 WK2008 MOCVD磊晶系統LabVIEW控制程式前置面板設計

B-3-1 【顯示介面】

LabVIEW磊晶程式的前置面板顯示介面分為下列5大資訊顯示項：

6. 氣體傳輸管路中相關資訊。
7. 反應腔資訊。
8. 系統狀態。
9. 菜單資訊。
10. 其他顯示項。

【氣體傳輸管路中相關資訊】

氣體傳輸管路中相關資訊包括管路內載流氣體種類、分子源開關等布林燈號顯示和氣體傳輸管路中硬體資訊等2大項；詳見下文分項介紹。

➤ 管路內載流氣體種類、分子源開關等布林燈號顯示

在氣體管路狀態顯示中，程式利用其布林真偽值的顏色切換，代表其管路個別狀態，以下為顏色說明：

橘色：代表載流氣體為氮氣(N_2)，橘色路徑即為氮氣走向。

淡藍色：代表載流氣體為氫氣(H_2)，淡藍色路徑為氫氣走向。

黑色：代表管路中無氣流流入，亦即切斷氣體。

黃色：代表有帶出該分子源(字元"s")，黃色顯示路徑代表分子源走向。

深藍色：代表MO分子源管路Epifold端的流向切換(字元"v/r")，而該顏色代表該段管路無氣體流經，如深藍色連接至vent端，代表指令字元為(r)；如深藍色連接至reactor端，代表指令字元為(v)。

亮紅色：菜單該列步驟指令字元/設定值顯示視窗中，在III族(MO分子)、V族、 SiH_4 分子源部份皆內嵌有紅色顯示布林，其代表是否有帶出(開啟)該項分子源(字元"s")；如在該欄位(目前執行步驟列,紅框中)分子源流量設定值部分出現紅色燈號亮起即顯示有開啟(帶出)該分子進入氣體管路中。

➤ 氣體傳輸管路中硬體資訊

氣體傳輸管路中硬體資訊分為流量計和MO分子源管路壓力控制器等2項硬體設定/讀取值，如下分類所述。

流量計資訊項

前置面板上依個別流量計代稱有其流量設定/讀取值顯示區塊，其中黑底白字為設定值，白底黑字為讀取值；而整合項中亦有該流量計滿刻度流量註解方便使用者參考。此外，在氣體管路連結至反應腔端有進腔體總流量動態顯示設計(V族與III族管路進口端個別顯示)，便於使用者瞭解III、V族管路端之總流量是否維持等量平衡。

MO分子源管路壓力控制器資訊項

MO分子源整合項中除了流量計顯示外，尚包含MO分子源管路壓力設定/讀取顯示項供使用者監控管路內部上游壓力值。

【反應腔體狀態資訊】

反應腔體狀態資訊包含石英內襯層(Quartz liner)外層壓力、節流閥開口度等MKS腔體壓力控制系統資訊，以及腔體上、下RF加熱系統(Eurotherm 818P)之溫度設定與讀取值、RF輸出功率等動態資訊顯示。

【系統狀態】

系統狀態顯示包含各式預設狀態偵測，共分為異常預警(Precaution)和緊急狀態(Emergency)等2大類，分類項中有個別觸發狀態說明。而個別狀態列右方有其對應的布林狀態指示燈。若為特定異常預警狀態觸發，在前置面板上僅會在特定狀態旁持續亮起紅色布林燈號顯示；而若緊急狀態觸發，在特定狀態旁則是以紅色燈號交替閃爍以提高警示度，設計略有不同。

【菜單資訊】

菜單資訊分為菜單執行列字元資訊和步驟註解、菜單檔名資訊等2大項，詳見下文敘述。

➤ 菜單執行列字元資訊

菜單執行列字元資訊包含菜單該列(目前執行,紅框包覆)、上一列、下一列步驟指令字元/設定值顯示,方便使用者瞭解目前菜單中各式設定項。在該顯示項中僅顯示較易於變化的設定值,如流量、腔體溫度、腔體壓力等;而MO分子源管路壓力設定值則未顯示。

➤ 步驟註解、菜單檔名資訊

步驟註解顯示項提供使用者於菜單中所輸入的對於該執行列之簡易註記,例如: Thermal cleaning at 1180°C, InGaN layer Growth...等;而菜單檔名資訊僅為顯示目前輸入的菜單檔名。

【其他顯示項】

其他顯示項包含UPS狀態資訊、MO分子消耗量計算和各項時間資訊等3大項,如下文分項介紹。

➤ UPS狀態資訊

UPS狀態資訊包含UPS硬體各項狀態顯示,其中包含電池電位百分比、電池電壓、UPS內部感測溫度、跳電供電時間評估等各項供電資訊。

➤ MO分子消耗量計算

前置面板亦提供MO分子源消耗量計算顯示,消耗量是依每一菜單步驟列消耗計算(附錄F中式F-1),並採用累加方式提供使用者紀錄該次磊晶程序的MO分子總消耗量,其消耗量單位為毫克(mg)。

注意:該消耗量於程式開啟時會自動歸零,並未提供上次磊晶程序的消耗量累加計算。

➤ 各項時間資訊

系統中各項時間顯示資訊包含目前系統時間/日期顯示、菜單該次步驟(Step No.)及該步驟列時間倒數顯示(Counting down)、菜單載入時間、磊晶程序執行時間、磊晶程序預計結束時間等時間資訊顯示。

B-3-2 【控制按鍵】

前置面板控制按鍵分為下列6項動態控制按鍵；而如圖B-1所示，控制按鍵為矩形藍框所包覆的圖像，其中1~3項整合至圖B-1左上方的Program control button方框內。

7. 強制中斷主程式(Abort Process)。
8. 跳電計時器重置("Power Glitch" Timer Reset)。
9. 程式停止(Program stop)。
10. 腔體潔淨(Purge)或保壓切換鍵。
11. 節流閥動作切換鍵(Throttle valve control button)。
12. 真空泵浦開關(Main Pump switch)。

【強制中斷主程式(Abort Process)】

強制中斷主程式(Abort Process)按鍵主要功能為提供使用者中斷"一般磊晶程序"用，若發生突發緊急事件(非預設的緊急狀態)，當使用者按下前置面板上Program Control button中的"*Abort Process*"按鍵，磊晶程式即強制載入預設的安全模式中，以避免危及人員安全及降低系統損害。

【跳電計時器重置("Power Glitch" Timer Reset)】

若發生跳電，程式經UPS硬體跳電狀態確認後，即會啟動跳電倒數計時機制，如此設計主要為避免程式因瞬間跳電而造成誤動作。若發生短暫跳電，經使用者判定不影響系統運作後，可按下該按鍵將計時器清除，不過若使用者在秒數倒數完畢後仍未清除，程式會自行載入安全模式。

【程式停止(Program stop)】

程式停止按鍵提供使用者中止程式運作，該按鍵配置於前置面板上"Program Control button"中。

【腔體潔淨(Purge)或保壓切換鍵】

WK2008 MOCVD磊晶系統中於系統潔淨狀態下(System purge)設計有腔

體潔淨(Purge)或腔體保壓等2種狀態供使用者選擇，一般預設狀態為腔體潔淨，而潔淨狀態亦即持續通入氣體並保持腔體內部氣體流動，以避免外部氣體逆流間接造成腔體汙染。腔體保壓狀態亦即不持續通入氣體進腔體，僅讓腔體維持在一定壓力範圍內，系統預設值為大於1030mbar。該按鍵僅於系統潔淨狀態下才能有效動作，該按鍵即提供腔體潔淨與保壓狀態切換，主要為控制氣體傳輸管路連結至反應腔之間的氣動閥開關邏輯(Pneumatic valves on reactor inlet)；詳細氣動閥控制邏輯請參閱B-6-2【系統潔淨區段(System purge segment)】的表B-3內容。

【節流閥動作切換鍵(Throttle valve control button)】

WK2008 MOCVD磊晶系統中MKS節流閥因應不同系統狀況有其控制邏輯，而該按鍵即提供使用者在某些預設狀態下操作節流閥開關用，詳細操控邏輯請參閱B-7-2小節註2內容；而該按鍵僅提供節流閥可控制(Controllable)和關閉(Close)等2種狀態。

【真空泵浦開關(Main pump switch)】

真空泵浦開關(Switch)按鍵主要為控制真空系統中的220VAC(1 ϕ)真空泵浦電源(ON/OFF)，相同地，該按鍵也有其控制邏輯，並不可以隨意作開關動作，詳細邏輯請參閱B-8附錄中的表B-A1內容。

B-4 菜單編譯程式(Recipe compile program)

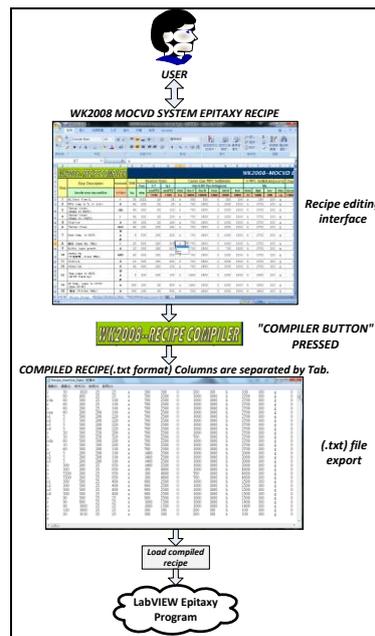
WK2008 MOCVD磊晶系統的菜單編譯程式(WK2008 MOCVD System Epitaxy Recipe Program.xls)，為利用Microsoft Office Excel和搭配嵌入式巨集(Embedded Macro command)指令來撰寫，其中巨集指令是以Visual Basic組合語言指令(Assembly)編寫，該巨集可作數值格式編譯(Compile)、數值/格式除錯(Debug)，並將Excel中編輯參數轉換成控制程式所能讀取的以Tab分行之陣列式排列的(.txt)檔案格式(File format transfer)，並儲存至指定資料夾中。

菜單編譯程式利用 Excel 中資料驗證檢查 (Verify) 及下拉式選單 (Pull-down List) 功能，並藉由巨集中迴圈函數的重複執行輸出，可使編輯指令排程簡單化，無需重覆編輯相同設定之步驟；且 Visual Basic 巨集指令可將輸出檔案 (Tab 分行之 .txt 文字檔) 存至指定的資料夾中 (Assigned Destination)，諸多設計皆可提高使用者在編輯菜單的方便性。

在說明菜單編輯細節之前，先介紹 Excel 菜單與 LabVIEW 程式之間關係，俾使使用者有初步的整體架構概念。

【菜單編輯面板/(.txt)文字檔/LabVIEW程式之間關係】

圖B-2以圖示說明菜單編輯流程。EXCEL為使用者編輯菜單介面，首先使用者在EXCEL格式下完成相關菜單字元/數值編輯，例如流量、溫度等數值設定；和分子源開關(s/g)、Epifold走向切換(v/r)等字元設定，經確認無誤和通過EXCEL字元檢查後，使用者可按下"RECIPE COMPILER"按鍵，即可輸出可供LabVIEW控制程式讀取的以Tab分行之(.txt)菜單格式。之後使用者可再將編譯完成的(.txt)格式菜單匯入LabVIEW程式中，待LabVIEW程式完成陣列編碼後(Array Indexing)，旋即逐列(Row by row)將各欄位(Column)內的數值/字元寫入相對應的硬體和布林判定式中。



圖B-2 使用者與菜單編譯介面、編譯過(.txt)菜單、與LabVIEW程式之間關係

B-4-1 【菜單編輯面板】

圖B-3為菜單編輯面板。

Step	Step Description	Command	TIME	Reactor State			Carrier Gas MFC Set&State					V MFC Set&State (scm)			Dop		
				Press	Tc ↑ Level(°C)	Tg ↓ Level(°C)	State	Run V	Run III	Farm	Sub III	Vent	State	High		Low	State	Source
1	H2 Total flow:1L	r	30	1020	25	25	n	300	300	0	200	100	h	100	100	g	0
2	MFCs ramp to 7L in total	o	60	800	25	25	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
3	Thermal Clean, (Ramps to 500°C)	rds	60	500	25	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
4	Thermal Clean, (Ramps to 1150°C)	r	60	200	25	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
5	Stabilize	o	60	200	25	160	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
6	Thermal Clean	ous	60	200	200	160	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
7	Down temp. to 520°C	o	5	500	200	220	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
8	穩定 (Open NH ₃ TMGs)	r	20	500	250	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
9	Buffer layer growth	o	10	500	250	520	n	700	2500	0	700	1000	h	2700	100	g	0
10	Annealing (升溫時間, Close TMGs)	ods	60	500	300	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
11	Stabilize	o	10	500	300	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
12	Annealing	o	60	500	200	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0
13	Temp. ramps to 850°C (UP-RF Stand by)	o	5	200	200	100	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0
14	UP Temp. ramps to 1010°C (Open UP-RF)	o	300	200	25	850	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0
15	穩定 (Pre-Run TMGs)	o	300	200	25	850	n	100	4000	0	1000	1000	h	4800	100	g	0

圖B-3 菜單編輯程式面板部分擷圖

Step	Step Description	Command	Step Description	Eurotherm 818P PID CONTROL											
				Tc ↑						Tg					
	Describe every step condition	o/r/l/p/e	Describe every step condition.	P(s)	I(s)	D(s)	Ctl	Cbh	Cr	Cc(s)	P(s)	I(s)	D(s)	Ctl	
1	H2 Total flow:1L	r	H2 Total flow:1L.												
2	MFCs ramp to 7L in total	o	MFCs ramp to 7L in total.												
3	Thermal Clean, (Ramps to 500°C)	rds	Thermal Clean, (Ramps to 500°C)	11.5	12.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
4	Thermal Clean, (Ramps to 1150°C)	r	Thermal Clean, (Ramps to 1150°C)	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
5	Stabilize	o	Stabilize.												
6	Thermal Clean	ous	Thermal Cleaning at 1150°C.	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
7	Down temp. to 520°C	o	Temp. ramps down to 520°C	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
8	穩定 (Open NH ₃ TMGs)	r	Stabilize, (Open NH ₃ TMGs)												
9	Buffer layer growth	o	Gas Buffer layer growth.(520°C)												
10	Annealing (升溫時間, Close TMGs)	ods	Annealing(Ramps to 1180°C,Close TMGs)	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
11	Stabilize	o	Stabilize.	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
12	Annealing	o	Annealing.(1180°C)												
13	Temp. ramps to 850°C (UP-RF Stand by)	o	Temp.ramps to 850°C (UP-RF Stand by)												
14	UP Temp. ramps to 1010°C (Open UP-RF)	o	UP Temp. ramps to 1010°C (Open UP-RF)	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	
15	穩定 (Pre-Run TMGs)	o	穩定 (Pre-Run TMGs)	1.5	2.3	5.6	9.8	70.8	10	1.8	3.6	22	3.7	60.	

圖B-3 菜單編輯程式面板部分擷圖(續)

菜單編輯面板設計原則為每一橫列代表單一步驟，而每一縱列則代表特定硬體在每一步驟的設定數值或布林邏輯判定字元。菜單在編排設計上將各項硬體設定/控制參數、指令等分門別類，主要可分為菜單步驟(列)指令 (Command, Column D)、個別步驟(列)秒數(Column E)、腔體狀態(Reactor

state，腔體狀態列中包含上、下溫控器溫度設定、腔體壓力設定等(*Column F~H*)、載流氣體狀態(Carrier Gas MFCs Set&State，該狀態列除了載流氣體、Vent流量計流量設定外，亦包含h/n/H(h+n)/N(h+n)等字元參數，*Column I~N*)、V族流量計(V MFCs Set&State, *Column O~R*)、摻雜源流量計(Dopant source MFCs Set&State, *Column S~Z*)、III族流量計(III MFCs Set&State, *Column AA~AO*)、V族高流量計(NH₃ (High), *Column AP~AQ*)、進腔體流量計(Chamber MFCs Set, *Column AR~AS*)、MO分子源及SiH₄等上游管路壓力值(MO Sources Pressure Set, *Column AT~AX*)等各項硬體流量/壓力設定。

在各項分子源狀態列設定中除了流量數值設定外，亦包括是否開啟分子源(字元s/g)、Epifold端流向設定(字元v/r)、大小流量計選擇(字元h/l)等特殊字元；相關指令字元意義請參閱A-3小節內容。上述這些非數值的設定參數，亦即(s/g、v/r、h/n/H(h+n)/N(h+n)、h/l)等指令為『下拉式選單』設計，使用者可根據該步驟列的需求選取指令即可，若使用者鍵入非選單中所列的特定字元，程式即會出現警告視窗要求更正。菜單最後一欄(*Column AY*)中附上簡易步驟狀態描述供使用者註記，該列內容會於LabVIEW磊晶程式前置面板上"State description"欄位(圖B-1)內顯示；菜單中在每一硬體(溫控器、壓力控制器、流量計)代號下方的橘色方框中顯示之數值，代表為該項硬體可供設定的流量或壓力上限值，且需注意各式流量計的流量最佳控制範圍，約為2~98%F.S.，若設定值超出該範圍可能發生流量控制不穩現象^{註1}。此外，若使用者輸入不符規範的流量值^{註2}或溫度、壓力值等，程式將會出現錯誤視窗(內有錯誤說明項)要求使用者重新輸入格式正確的數值為止；如此設計皆避免菜單匯入磊晶程式後發生數值寫入異常。

註1：SIC，Bronkhorst--可設定精度(Accuracy)為1%F.S.。

啟成流量計可供設定之區間為(2~98 %F.S.)；Bronkhorst流量計(TMGa(L))可供設定的區間為(0.5~100%F.S.)。

註2：不符規範數值格式通常有輸入大於滿刻度、錯誤字元，或者輸入高於最小

刻度之數值；如該流量計最小刻度為0.1sccm，使用者卻輸入xxx.01sccm等錯誤數值。

【菜單步驟列指令(Command, Column D)】

菜單中第1步驟列為步驟控制指令(Step Command)，其也為下拉式選單設計。指令為複合式設計，亦即指令字元與多項硬體控制有關，有(o/r/ous/rus/ods/rds/l/p/e)共9項，相關字元意義整理如下。

- o/r：與流量計流量響應模式有關。
- l/p：與巨集中重複迴圈函數控制有關，詳見【重複迴圈設計】內容。
- s：指令中若含有"s"字元代表將溫控器的升/降溫率(Ramping rate)指令設定為Step，亦即要求溫控器以最快速率到達該列所設定溫度^註。
- u：u字元代表上(↑)溫控器，配合"s"即為上溫控器執行快速升/降溫。
- d：d字元代表下(↓)溫控器，配合"s"即為下溫控器執行快速升/降溫。
- e："e, End"，代表磊晶菜單控制終止，載入系統潔淨區段設定。

註：要求最快速率升/降溫，設定方法為將溫控器的升/降溫速率(Ramping rate, Pr)設定為Step，詳細Eurotherm 818P溫控器之(Ramping rate, Pr)參數意義請參閱附錄C 表C-3 Eurotherm 818P "Pr"參數設定。此外，快速升降溫動作須配合特定PID參數寫入，請參閱【溫控器PID控制項】。

WK2008磊晶菜單控制指令整理如表B-2所列：

WK2008磊晶菜單步驟(列)控制指令說明	
控制指令	意涵
o	流量計"o"指令，即要求系統中 <u>所有</u> 流量計以最快速率到達該列所個別設定的流量。
r	流量計"r"指令，要求系統中 <u>所有</u> 流量計由上一列的設定值，在該列菜單指定時間內，到達該列所個別設定的流量值。
ous	該複合指令代表流量計"o"指令，和要求上(↑)溫控器以最快速率到達該列設定溫度值。 注意：選擇該指令需給定上(↑)溫控器(Tc)特定PID演算參數。
ods	該複合指令代表流量計"o"指令，和要求下(↓)溫控器以最快速率到達該列設定溫度值。 注意：選擇該指令需給定下(↓)溫控器(Tg)特定PID演算參數。
rus	該複合指令代表流量計"r"指令，和要求上(↑)溫控器以最快速率到達該列設定溫度值。 注意：選擇該指令需給定上(↑)溫控器(Tc)特定PID演算參數。

rds	該複合指令代表流量計"r"指令，和要求下(↓)溫控器以最快速率到達該列設定溫度值。 注意：選擇該指令需給定下(↓)溫控器(Tg)特定PID演算參數。
l/p	Loop，重複迴圈控制字元。
e	End，菜單字元控制終止，載入系統潔淨程式設定。

表B-2 WK2008磊晶菜單步驟(列)控制指令說明

【溫控器PID控制項】

如圖B-3(續)所示，菜單最後一部分(*Column AZ~BM*)為"Eurotherm 818P PID Control"，這部分主要為溫控器的PID值設定，在附錄C文章裡(C-3節 溫控器PID控制簡介)提到，若要執行特殊升/降溫程序，如成長二維量子井結構時，使用者需自行手動調整溫控器以獲得特殊相關P/I/D控制參數(包含P/I/D/Cbh/Cbl/Cc/Cr共7項數值)，並將該數值紀錄下來透過磊晶菜單配合含有"s"字元的控制指令來做輸入(例:ods,rus...等)，**需注意若該步驟指令含有"s"字元除了須針對特定溫控器寫入該次步驟所需的P/I/D數值外，下一步驟需再次覆寫入正常升降溫程序P/I/D值**，該步驟對於穩定溫度控制至為重要；此外，若指令不含"s"，則不須輸入PID控制參數。由於該段控制較為複雜，使用者必須謹慎研讀附錄C的 C-3小節內容，以確保穩定溫度控制。使用者可參閱本章B-8節附錄 VIIA2-6主程式迴圈中子程式介紹的【溫控程式設計】分項、【相關PID演算參數之菜單輸入細節說明】。

註：菜單指令**並無提供上、下2台溫控器在單一步驟(列)內同時執行升降溫程序**的設計，使用者需特別注意。

【重複迴圈(Loop)設計】

在步驟指令(Step Command)中，l/p字元與巨集中控制重複執行迴圈有關，使用者如需使用重覆迴圈(Loop)，可利用l/p這兩個字元包覆(Enclose)需重覆的指令步驟，並在"l"字元後方加入次數，在菜單執行編譯後即可獲得重覆之菜單指令，而重複之次數即為"l"後方的數值；相同地若未在"l"字元後方輸出次數，菜單會跳出視窗要求使用者輸入^註。

注意："l"及"p"字元為迴圈控制字元，只重複"l"及"p"指令所包覆的步驟列

所寫的各项設定，包含步驟指令(o/r/ous/rds..等)、時間、溫度值、壓力值、及各項流量值、壓力值、s/g、v/r、h/l等字元；而"l"及"p"字元並不為磊晶程式可讀取的字元，該字元僅為提供Visual Basic巨集做重複動作的控制項，使用者需注意"l"及"p"字元後方不可加入參數設定字元。

正確重複步驟指令格式如下，在該例中僅會重複Row N+1、Row N+2內的數值內容共2次：

「Recipe format」：

```
Row N      l2  
Row N+1    r 30 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....  
Row N+2    o 60 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....  
Row N+3    p
```

「Complied .txt file format」：

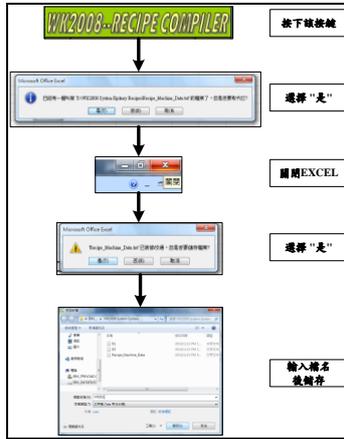
```
Row N      r1 30 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....  
Row N+1    o1 60 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....  
Row N+2    r2 30 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....  
Row N+3    o2 60 1020 25 25 n 300 300 0 200 200 h 100 100 g 0 0 0 v g 0 v g.....
```

註：若要修改已輸入的Loop執行次數，作法為將"l"字元後方的數字刪除，在菜單跳出的視窗中重新輸入執行次數即可。

B-4-2 【菜單編譯/輸出】

菜單編譯器為利用Visual Basic語法搭配EXCEL嵌入式巨集來撰寫，且已將編譯器執行項整合至"WK2008--RECIPE COMPILER"按鍵內，詳細編譯器巨集語法和程式碼說明請參閱附錄G G-K。待菜單編輯完畢後，可按下菜單左上方淺綠色的WK2008菜單編譯器"WK2008--RECIPE COMPILER"按鈕，此時巨集指令開始內部運作(包含執行"l/p"重複迴圈和(.txt)文字檔輸出等)，將符合LabVIEW控制程式讀取的(.txt)檔案輸出至Recipe_Machine_Data分頁，此時會出現是否檔案取代視窗，選取"是"，再關閉Excel程式，會出現是否儲存視窗，選取"是"，再來會跳出"另存新檔"

視窗，輸入檔名後即可將以Tab分行之(.txt)格式的菜單文字檔輸出至指定資料夾中，流程如圖B-4所示。Visual Basic巨集指令將其儲存路徑指定在D:\WK2008 Epitaxy Recipe的資料夾中，其輸出(.txt)菜單文字檔之預設檔名為Recipe_Machine_Data.txt，圖B-5即為(.txt)文字檔。



圖B-4 已編譯過菜單之(.txt)文字檔輸出流程

檔案(F)	編輯(E)	格式(O)	檢視(V)	說明(H)														
r	30	1020	25	25	n	300	300	0	200	100	h	100	100	g	0			
o	60	800	25	25	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
rds	60	500	25	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
r	60	200	25	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o	60	200	25	160	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
ous	60	200	200	160	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o1	5	500	200	220	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o2	5	500	200	220	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o3	5	500	200	220	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o4	5	500	200	220	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
r	20	500	250	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o	10	500	250	520	n	700	2500	0	700	1000	h	2700	100	g	0			
ods	60	500	300	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o	10	500	300	200	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o	60	500	200	100	n	700	2500	0	1000	1000	h	2700	100	g	0			
o1	5	200	200	100	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0			
o2	5	200	200	100	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0			
o3	5	200	200	100	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0			
o	300	200	25	850	n	1400	2500	0	1000	1000	h	2000	100	g	0			
o	300	200	25	850	n	100	4000	0	1000	1000	h	4800	100	g	0			
o	7200	200	25	850	n	100	4000	0	700	1000	h	4800	100	g	0			
o	7200	200	25	850	n	100	4000	0	700	1000	h	4800	100	g	0			
o1	300	500	25	400	n	900	2500	0	1000	1000	h	2500	100	g	0			
o2	300	500	25	400	n	900	2500	0	1000	1000	h	2500	100	g	0			
o3	300	500	25	400	n	900	2500	0	1000	1000	h	2500	100	g	0			
o4	300	500	25	400	n	900	2500	0	1000	1000	h	2500	100	g	0			
o	90	500	25	25	n	900	2500	0	1000	1000	h	2500	100	g	0			
r	90	800	25	25	n	1000	1500	0	1000	1000	h	1400	100	g	0			
o	90	1000	25	25	n	1000	1500	0	1000	1000	h	1400	100	g	0			
r	120	1000	25	25	n	300	300	0	200	100	h	100	100	g	0			
o	20	1010	25	25	n	300	300	0	200	100	h	100	100	g	0			
e																		

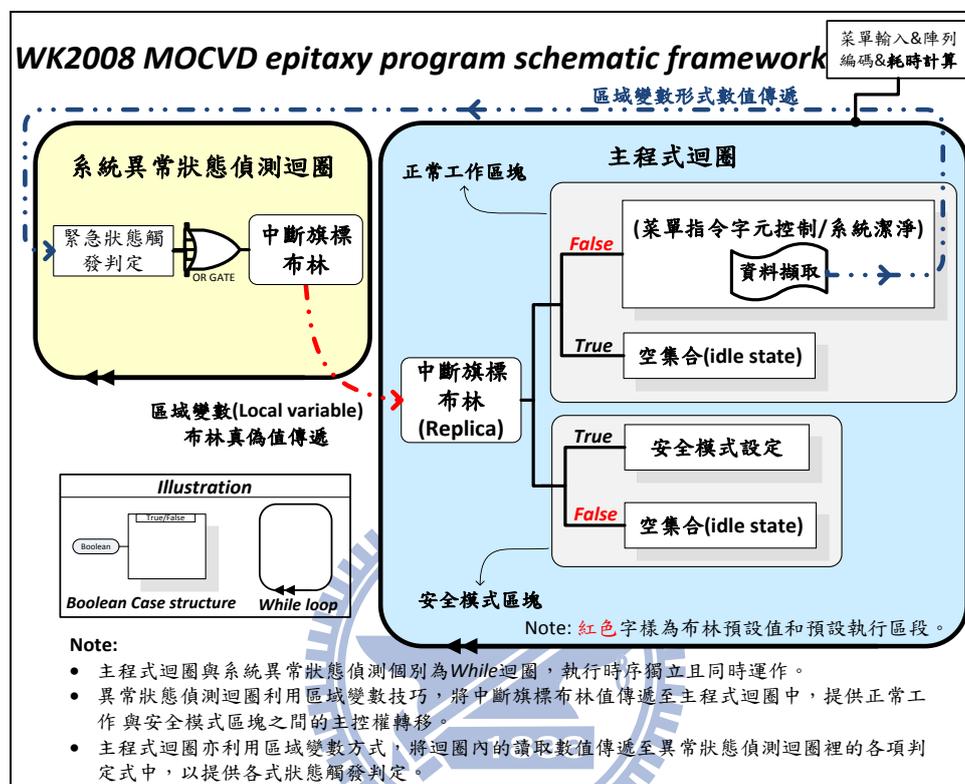
圖B-5 已完成編譯的(.txt)菜單文字檔格式

比照圖B-3與圖B-5即可清楚看出(.txt)文字檔格式僅為將使用者輸入菜單的字元以Tab分行的方式排列，排列方式仍以列代表步驟，欄代表指令和各項硬體設定等字元；第0欄為步驟指令，第1欄為時間...等，皆與菜單編排方式相同。較特別的是重複迴圈部分，在第0欄步驟指令項中，若指令連帶數值代表該步驟列為迴圈輸出，而數值則代表迴圈執行次數，如同【重複迴圈(Loop)設計】文中的例子所述。

B-5 WK2008 MOCVD epitaxy system LabVIEW控制程式架構

B-5-1 【WK2008 MOCVD Epitaxy system LabVIEW控制程式架構】

WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式設計整體架構如圖B-6所示。



圖B-6 WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式整體設計架構圖

如圖B-6所示，磊晶程式主要由2大獨立While迴圈(While Loop)^{註1}所構成，一為系統異常狀態偵測迴圈，另一則為主程式迴圈，兩者執行時序獨立且同時運作。系統異常狀態偵測迴圈類似自主神經系統，獨立於主程式迴圈持續不間斷地做各項預設狀態判定。主程式迴圈內又可分為『正常工作』與『安全模式』等兩大區塊(Block)，這兩者皆由相互獨立的條件架構^{註2}(Case structure)所構成，其控制項皆為中斷旗標布林(Interruption flag boolean)，其功能為提供主程式中正常工作與安全模式區塊之間的主控權轉移。我們利用LabVIEW平台中區域變數(Local Variables)^{註3}概念，將主程式迴圈中正常工作區塊內的特定硬體讀取數值傳遞至異常狀態偵測迴圈，以提供各項異常狀態觸發判定。

而若為緊急狀態觸發，系統異常狀態迴圈內的中斷旗標布林值轉為真，同樣地利用區域變數^{註3}方式，將該布林值傳遞至主程式迴圈中，以提供正常工作與安全模式區塊之間的主控權轉移。

如圖B-6所示，主程式迴圈中『正常工作』與『安全模式』兩大區塊的條件架構為互補設計。中斷旗標布林值若為偽(預設)，正常工作區塊執行(菜單指令字元控制/系統潔淨)區段(Segment)設定，安全模式區塊則為空集合(Empty set)，正常工作區塊擁有所有硬體讀寫主控權；反之，若中斷旗標布林值為真，此時正常工作區塊轉為空集合，主控權由安全模式接手，並進行各式硬體預設值讀寫動作。

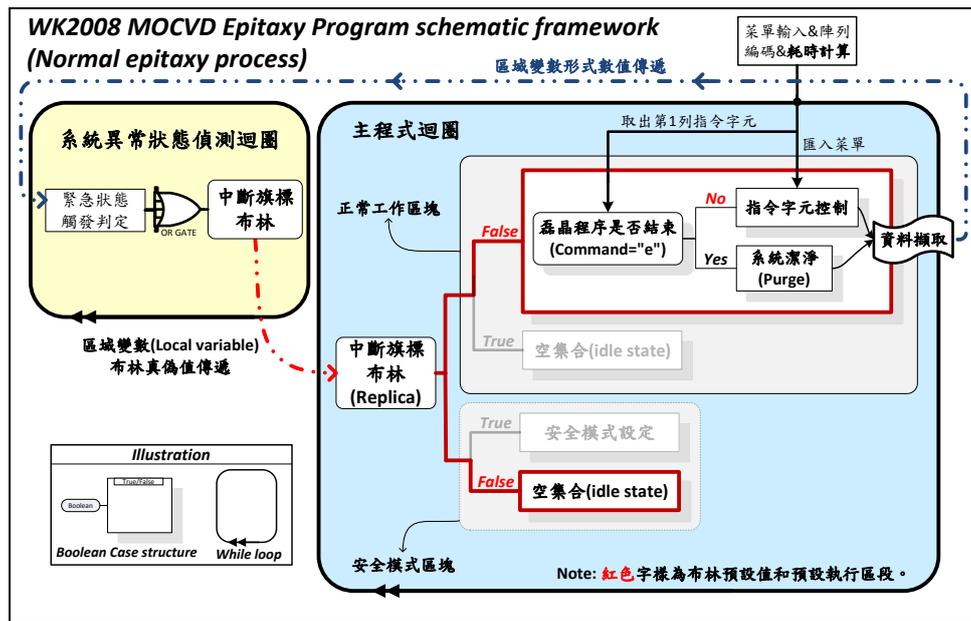
註1：『While迴圈(While loop)』的程式架構為連續執行迴圈，並由一特定控制字元(Command character)決定迴圈動作，即停止或暫停，控制字元為布林真偽值判定。

『For迴圈』特性與While迴圈不同，For迴圈則需指定迴圈執行次數，當執行次數額滿即中止For迴圈執行程序，通常給定For迴圈當次執行時間。

註2：條件架構(Case structure)為根據條件判斷以決定要執行哪一個程式區段(True or false Segments)，控制項為布林真偽值(Boolean true/false value)，當布林值為真，即執行該布林狀態所對應的程式區段動作；反之若布林值為偽，即執行偽布林值所對應的程式區段動作。

註3：區域變數概念即類似為變數複製(Replica)，其型態可為字串、布林、數值等。由於在單一程式迴圈中所宣告的變數個別獨立(Unique)，若要在不同或同一程式迴圈中呼叫同一變數時，則必須對該變數作區域變數設定。變數一經宣告後，區域變數即為其複製品；該變數的值即可藉由區域變數在不同程式迴圈中做傳遞。

【一般磊晶程序(Normal epitaxy process)程式架構】

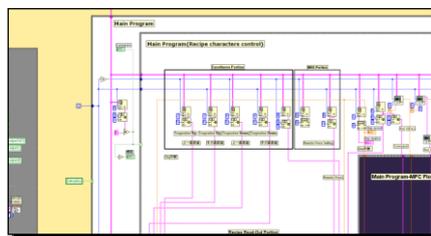


圖B-7 WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式一般磊晶程序設計架構

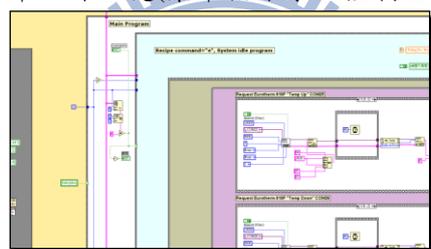
圖B-7為LabVIEW控制程式一般磊晶程序的設計架構圖。一般磊晶程序即定義為中斷旗標布林值為偽；主程式迴圈內的正常工作區塊執行菜單指令字元控制/系統潔淨區段，安全模式區塊執行空集合區段。

在程式開始後，系統異常狀態偵測迴圈立刻執行，而主程式迴圈會等到載入菜單完成陣列編碼^{註4}後才開始執行。如圖B-7，陣列編碼格式的菜單文字檔匯入主程式迴圈內正常工作區塊後，會先經由“菜單該列中第1欄位內控制字元是否為“e”,End”的布林值真偽判定，以決定要載入菜單指令字元控制(*false*)或系統潔淨(*true*)區段(Segment)中，括號內即表示該布林值；若該布林值為偽(*false*)，菜單指令字元控制區段立即逐列(Row by row)執行菜單步驟，當該步驟(列)設定時間執行完畢後，旋即執行下一步驟(列)。而菜單指令控制程式區段在執行每一步驟列時，即在限定的時間內(除溫控器外，其餘皆限定在0.1秒內)將該列中所有欄位的設定資料寫入各別對應硬體中，如溫度設定、壓力設定、流量設定、氣動閥狀態設定等，而後剩餘步驟時間則專做讀值動作(利用For迴圈方式撰寫)，直到該步驟(列)的時間倒數結束為止，以此程序反覆執行；而當逐列依序執行至菜單控制指令字元為

"e"(End)時，菜單指令字元控制區段終止，正常工作區塊則載入系統潔淨區段程式中，執行潔淨狀態預設數值讀寫設定，且時序不受菜單設定所控制。正常工作區塊裡的菜單指令字元控制區段執行時序由菜單內步驟設定秒數所決定，而是否切換至系統潔淨程式區段，則由菜單中控制字元是否為"e"的布林值所決定。圖B-8為主程式中正常工作區塊(菜單指令字元控制區段)的設計擷圖，而圖B-9為主程式中系統潔淨程式區段(菜單第1欄指令字元為"e")的設計擷圖。



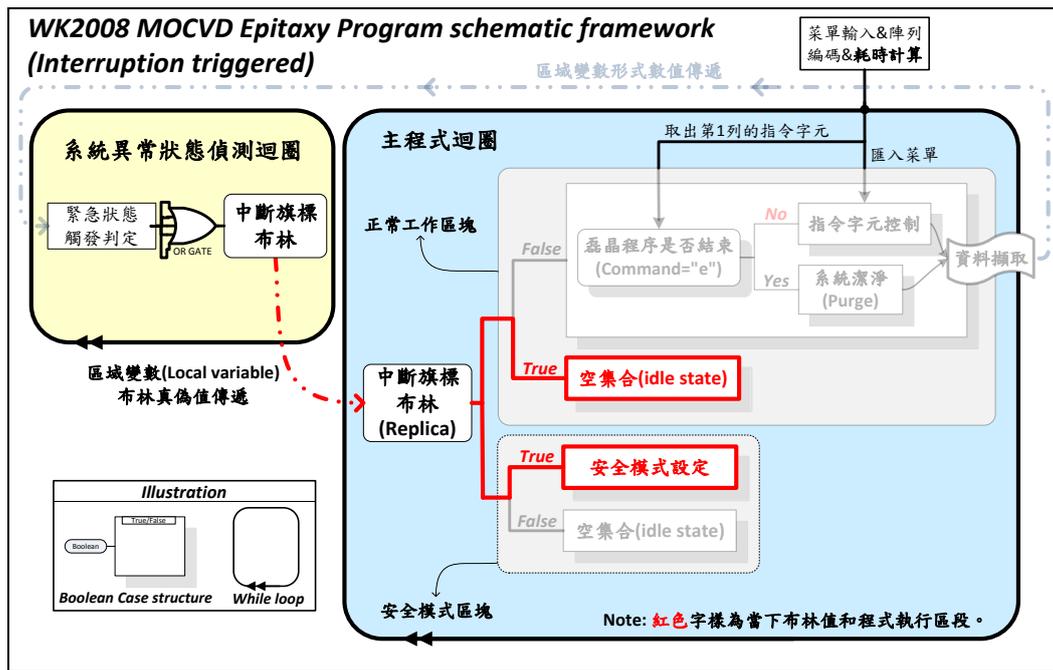
圖B-8 主程式中正常工作區塊(菜單指令字元控制區段)之架構設計擷圖



圖B-9 主程式中系統潔淨程式區段(菜單第1欄指令字元為"e")之架構設計擷圖

註4：磊晶菜單設計為 $m \times n$ 陣列型式的(.txt)文字檔。步驟控制指令、步驟執行時間、各式硬體相關設定等資訊在菜單中為逐行(Column by column)依次排列，菜單步驟順序為逐列(Row by row)定義，即第0列為程式執行步驟1，第1列為程式執行步驟2...以此類推，且該列中的所有欄位(Column)即為上述各項設定資訊，包含步驟執行時間、流量、溫度、壓力設定、溫控程序PID值等資訊。而菜單步驟列中第1欄位內即為控制指令字元(Command character)，該字元包含數種指令，詳細指令說明請參閱表B-2。

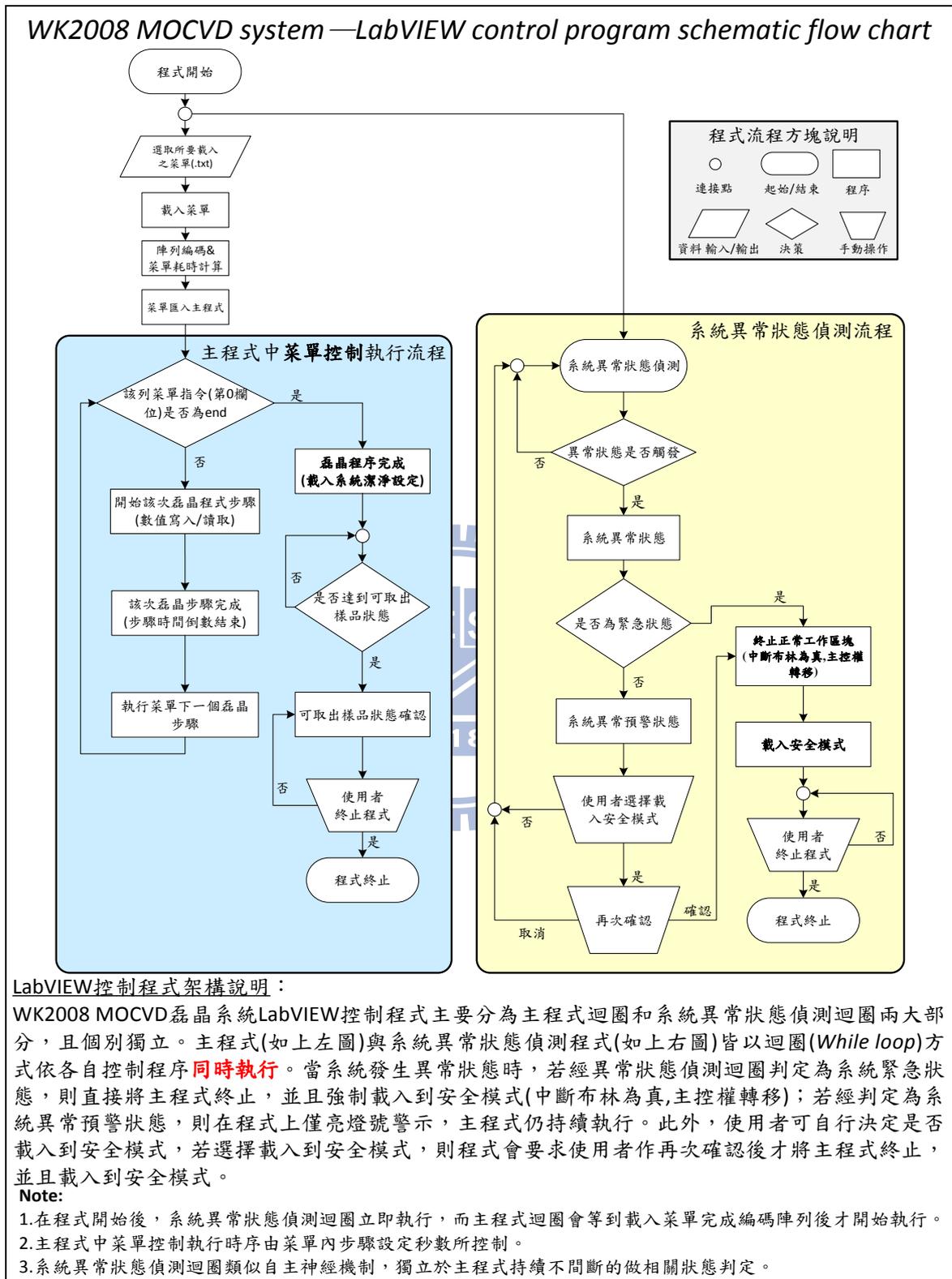
【中斷觸發(Interruption triggered)狀態對應之程式架構】



圖B-10 WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式中斷觸發設計架構

圖B-10為LabVIEW控制程式中斷觸發設計架構圖。如同前文，中斷觸發定義為中斷旗標布林值為真；主程式迴圈內的正常工作區塊執行空集合區段，安全模式區塊執行預設值讀寫區段。如圖B-10所示，當主程式迴圈中正常工作區塊中硬體讀值藉由區域變數傳遞至系統異常狀態偵測迴圈的判定式內，若讀值經由判定符合特定緊急狀態，中斷旗標布林值轉為真，中斷觸發。此時正常工作區塊的條件架構旋即轉為空集合，相對地；安全模式區塊立即由空集合轉為數值讀寫區段，將安全模式預設值寫入個別對應的硬體中，完成狀態切換。安全模式下詳細硬體設定請參閱B-7-2小節內容。

B-5-2 【WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式設計架構流程】



圖B-11 WK2008 MOCVD LabVIEW控制程式架構流程圖

【WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式設計架構流程說明】

WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式架構主要分為2大部份，分為主程式迴圈及系統異常狀態偵測迴圈；主程式迴圈中菜單控制區段受菜單指令字元^{註1}(Command characters)控制，且利用While迴圈架構連續且依序(Sequential)地執行菜單指令，當菜單指令執行至最後步驟時(即菜單控制指令字元為"e")，主程式(正常工作區塊)則載入系統潔淨程式區段While迴圈，並且等待取出樣品狀態確認^{註2}，若使用者未手動將程式中止，控制程式則持續執行系統潔淨程式迴圈，主程式執行流程如圖B-11中左圖所示。系統異常狀態偵測程式也是以While迴圈方式同時執行，其功用為持續監控系統異常狀態，如圖B-11中右圖所示；而當系統狀態發生異常時，異常狀態偵測程式將判定是否為系統緊急狀態(Emergency State)，若為真，則直接將主程式終止，並強制載入安全模式(Safety Mode)以確保人員及系統安全；但若為系統早期警示/異常預警狀態(Early warning/Precaution State)^{註3}，則程式上僅於前置面板上改變相對應狀態的顯示燈號(綠燈轉紅燈)告知使用者，而主程式將持續執行菜單步驟指令，不受影響。此外使用者亦可自行判定系統狀況，決定是否強程式載入安全模式，若選擇手動強制載入安全模式，系統程式會顯示再次確認視窗(Double check dialog window)，需經使用者確認動作後才將正常工作區塊終止，並載入安全模式^{註3}。

註1：詳見B-6-1內容。

註2：取出樣品狀態確認(Sample unload state check)請參閱B-8節附錄表B-A4。

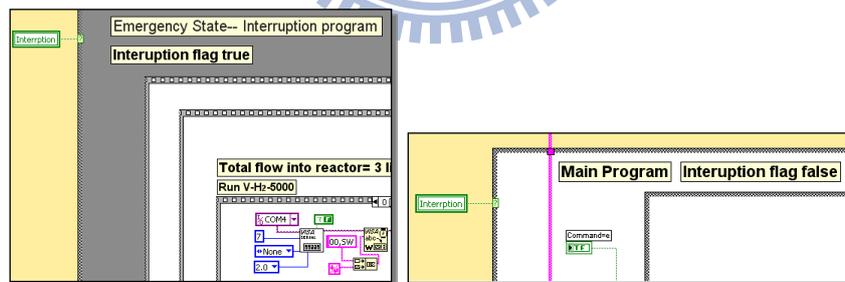
註3：詳細狀態定義請參閱B-7節。

B-5-3 【安全模式中斷旗標布林(Interruption flag Boolean)設計】

由於安全模式程式與正常工作區塊為在主程式架構中獨立的2個條件布林判定結構，為此我們設計了中斷旗標布林(Interruption flag Boolean)以提供正常工作區塊與安全模式程式之間的主控權切換，中斷旗標布林預設值

為偽，此時正常工作區塊擁有主控權，再依其菜單控制字元(Column 0)是否為停止字元"e"來決定載入菜單指令字元控制或者系統潔淨程式區段；一旦緊急狀態或程序停止(Abort process)狀態觸發後，該中斷布林值為真，程式旋即將主控權轉移至安全模式程式，載入安全模式相關設定。而安全模式程式預設為空集合(Empty set, Interruption boolean flag：*False*)，當中斷旗標為真時，即執行安全模式內設定；而正常工作區塊程式之條件結構恰與安全模式相反，當中斷旗標為真時，正常工作區塊為空集合。綜合上述，正常磊晶程序(菜單指令字元控制)的執行程式區段為在中斷旗標布林為偽、且『正常工作區塊』中菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→*False*)條件架構內。

圖B-12(a)顯示當中斷旗標布林狀態為真(True)時執行安全模式程式，此時正常工作區塊程式為空集合；圖B-12(b)為當中斷旗標布林為偽(False)時執行正常工作區塊，而此時安全模式架構為空集合，此外正常工作區塊內還嵌有一布林判定載入菜單指令字元控制或系統潔淨區段中(即菜單控制指令字元是否為"e")。



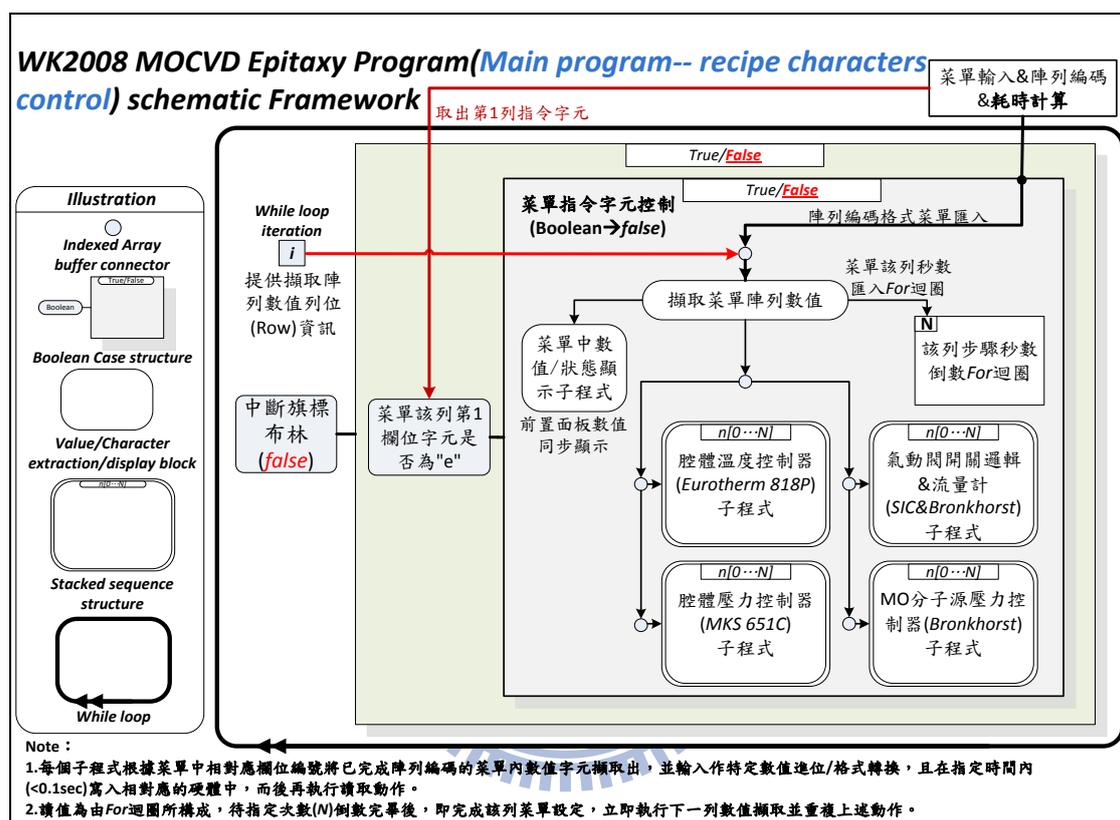
圖B-12(a)中斷旗標布林值為真 圖B-12(b)中斷旗標布林值為偽

在正常工作區塊程式設計中(包含系統潔淨及菜單字元控制)，所有For迴圈裡皆嵌有布林真偽判定的條件結構，其中控制訊號即為中斷旗標布林；當緊急狀態觸發時(Interruption boolean flag：*True*)，For迴圈內對應之程式設定旋即轉為空集合，而For迴圈所剩餘的次數將不再執行任何讀寫動作，待正常工作區塊程式中所有For迴圈(當下為全為空集合)次數執行完畢後(約即時)，立即將程式主控權轉移至安全模式程式。

B-6 主程式迴圈中『菜單指令字元控制』程式區段

本節為針對磊晶程式核心--主程式中正常工作區塊，『菜單指令字元控制區段』程式架構做說明，圖B-14為其設計架構圖。

B-6-1 【菜單字元控制程式設計架構】



圖B-14 WK2008系統磊晶程式--主程式迴圈菜單字元控制部分設計架構圖

圖B-14為菜單字元控制程式區段設計架構。如同前文所提，正常磊晶程序(菜單指令字元控制)的程式執行區段為在中斷旗標布林為偽、且『正常工作區塊』中菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean->False)條件架構內。如圖B-14所示，菜單字元控制區段包含了擷取菜單陣列數值部分、該列步驟秒數倒數For迴圈、菜單各項數值/狀態同步顯示、各式硬體寫入/讀取等7項子程式(Sub-program)，個別獨立且同時地進行。

在菜單字元控制程式區段架構下，根據不同硬體設定共分為4個由堆疊序列(Staked sequence)^{註1}架構所構成的子程式(Sub-Program)，個別子程式有其專責的硬體設定，相互獨立但擁有共同執行時脈(Clock)；其中包含溫

控器(Eurotherm 818P)設定、腔體壓力控制器(MKS 651C)設定、MO分子源上游管路壓力控制器(Bronkhorst)設定、氣動閥狀態設定及流量計設定等；其中氣動閥設定與流量計設定寫在同一堆疊序列架構內，氣動閥狀態程式設定內容為在序列編號0(Frame 0)內，流量計程式設定則在序列編號1(Frame 1)^{註2}中。

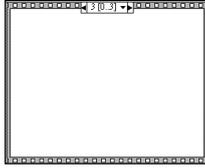
WK2008磊晶系統中LabVIEW程式的起始為先將經由EXCEL編譯程式所編譯過的菜單(Compiled Recipe)匯入，其檔案格式為以Tab分行的(.txt)文字檔。在菜單匯入主程式前，控制程式會先將其格式轉換成陣列編碼(Array indexing)形式(如圖B-14右上方)，即對菜單指令作列位(Row index)及欄位(Column index)編碼，再將(.txt)菜單文字檔匯入主程式中，正常工作區塊、菜單指令字元控制區段內。一旦匯入後，主程式該區段立即由步驟1的第0列開始，逐列(Row by row)依序執行菜單步驟，並將該列中所有欄位的設定值(壓力、溫度、流量等)和氣動閥狀態設定字元(Pneumatic valves ON/OFF state control characters)，根據其欄位編號從菜單中取出，並將該列設定值寫入相對應的硬體或邏輯判斷式中。

在各式硬體設定子程式裡，其根據菜單相對應欄位編號將已完成陣列編碼的菜單內數值字元擷取出，並輸入子程式中作特定數值進位/格式轉換，且在指定時間內(<0.1sec)寫入相對應的硬體內，而後再執行數值讀取動作。讀值為由For迴圈所構成，待迴圈指定次數(N)倒數完畢後，即完成該列菜單設定；此時程式藉由Loop iteration控制項選擇執行菜單下一列數值擷取並重複上述動作，程式設計片段簡圖如圖B-16，Loop iteration控制項說明詳見下文。

註1：每1步驟(列)皆有其時間設定(Column 1)，且每次步驟(列)執行皆有秒數倒數機制，待秒數倒數結束後才開始執行下一列，For讀值迴圈並依照各式硬體讀值耗時來劃分執行次數，詳細介紹請參閱B-2【精確時間控制】內容。

註2：LabVIEW中堆疊序列(Stacked sequence)架構為將程式切割成任意指定數目

的序列小區塊，其序列編號為Frame 0, Frame 1, Frame 2... Frame N，程式執行順序為當執行完序列0即執行序列1...以此類推，直到序列N執行完畢為止，如此可方便程式設計者分段設計程式動作。如圖B-15所示。

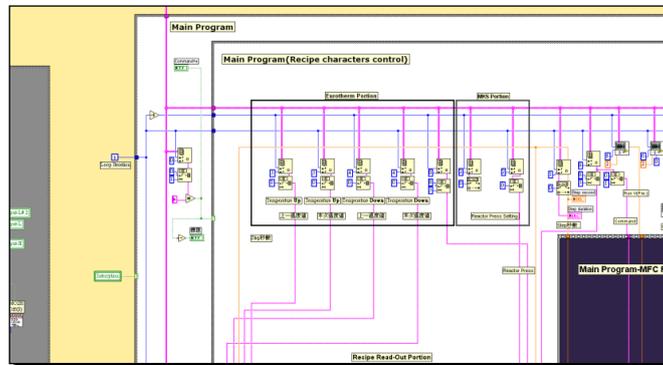


圖B-15 堆疊序列(Stacked sequence)架構

【Loop iteration控制項】

Loop iteration功能為計算目前While迴圈執行次數，每當菜單指令字元控制程式執行完菜單該(列)步驟設定，即所有For讀值迴圈次數倒數終止時，Loop iteration次數即累進(+1)，並將數值(即列編號)匯入擷取菜單陣列數值部分，擷取部分即開始取出菜單(Compiled recipe)下一橫列(Row n+1)內的所有硬體設定值，依特定欄位編號各別匯至獨立的子程式中，並作數值寫/讀動作；如此程序反覆執行至菜單該列第1欄位字元為"e"的布林值為真(Process end)，旋即載入系統潔淨程式區段。簡單來說，藉由Loop iteration控制項擷取菜單陣列數值部分即可獲知何時該擷取下一橫列菜單資訊，Loop iteration控制項即如圖B-16中的『i』和藍線所示。

註：『擷取菜單陣列數值部分』功能是將已完成陣列編碼的菜單暫存，再依照Loop iteration控制項和各式硬體配合的欄位數值，將特定欄位(Cloumn)、列位(Row)內的字元/數值擷取出，再匯入特定的子程式中以供讀寫。



圖B-16 主程式迴圈中菜單字元控制程式區段片段簡圖

【菜單字元控制說明】

在B-5-1小節中曾提及，陣列編碼格式的菜單文字檔匯入主程式迴圈內正常工作區塊後，會先經由“菜單該列中第1欄位內控制字元是否為"e",End”的布林值真偽判定，以決定要載入菜單指令字元控制(*false*)或系統潔淨(*true*)區段(Segment)；若為"e"(*true*)，則載入系統潔淨區段。

在表B-2所列的指令項中，擷取數值部分所取出的菜單第1列字元指令可能為o/r/ous/ods/rus/rds/e等7種，而如表B-2複合指令意涵說明，o/r僅與流量計有關，us/ds字元則與溫控器快速升降溫動作有關。若擷取輸入的字元為不是"e"的其他6種字元，其布林值為偽，程式選擇載入菜單指令字元控制區段；其中流量計設定子程式除了擷取特定欄位的流量設定數值外，亦會連同擷取菜單第1列字元指令用以判定執行o/r設定，詳見B-8節附錄 VIIA2-4內容。相同地，溫控器設定子程式除了擷取特定欄位的溫度設定數值外，亦會連同擷取菜單第1列字元指令用以判定執行us/ds設定，詳見B-8節附錄 VIIA2-6內容。

【主程式迴圈中菜單字元控制區塊各項子程式介紹】

WK2008 MOCVD磊晶系統LabVIEW控制程式的主程式迴圈，正常工作區塊、菜單字元控制區段可在細分為下列8項子程式(Sub-program)：

1. 擷取菜單陣列數值部份。
2. 菜單該次步驟秒數倒數。
3. 氣動閥邏輯狀態設定。
4. 流量計設定(Write/Read)。
5. MO分子源氣體壓力控制器(*Bronkhorst*)設定(Write/Read)。
6. 溫度控制器(*Eurotherm 818P*)設定(Write/Read)。
7. 腔體壓力控制器(*MKS 651C*)設定(Write/Read)。
8. 菜單(Recipe)狀態顯示。

由於各項子程式設計內容繁複，且多為LabVIEW程式設計語法細節，為節省篇幅和方便使用者簡易閱讀，文章將1~8項子程式撰寫詳細設計內容附於B-8節附錄 VIIA-2，若有編寫程式需求再行查閱即可。

B-6-2 【系統潔淨區段(System purge segment)】

如同先前文章所提，在陣列形式的菜單匯入主程式後，在每次步驟列執行前，會先經由判定菜單中第零行(Column 0)的控制指令字元是否為e(End)的條件布林判斷，以決定要載入主程式迴圈中的哪一區段(菜單控制或為系統潔淨設定)；如當第0行的控制指令為"e"時，布林狀態為真，此時控制字元為要求系統進入潔淨狀態，主程式將載入系統潔淨設定。

WK2008 MOCVD磊晶系統於潔淨狀態中，除了載流氣體種類與各式流量計之流量設定不另行更動外，其餘各自硬體在系統潔淨狀態下有其預設值寫入，相關設定由表B-3所列。

WK2008 MOCVD磊晶系統在潔淨狀態下的相關硬體設定		
溫度控制器(Eurotherm 818P)		
系統中硬體名稱	預設值	說明
TEMP. ↑	5°C	重置(reset)硬體溫度設定至SP1值。
TEMP. ↓	5°C	重置(reset)硬體溫度設定至SP1值。
腔體壓力控制器(MKS 651C)		
Reactor pressure controller	關閉節流閥 (253B)	強制節流閥關閉，不受壓力回溯值控制。
MO分子源/SiH ₄ 管路上游壓力控制器(Bronkhorst EL-Press)		
TMGa_Press/ TMin_Press/ Cp ₂ Mg_Press/TEGa	1200mbar	設定TMGa/TMin/Cp ₂ Mg/TEGa壓力值為1200mbar.
SiH ₄ _Press	1800mbar	設定SiH ₄ 壓力值為1800mbar.
氣體傳輸管路之氣動閥狀態設定		
III、V族分子源& 載流氣體源	指令	說明
Carrier Gas	由上一步菜單指令決定	不另加設定，由菜單中e指令的上一列指令(載流氣體項， <u>column 5</u>)所決定。
NH ₃ /SiH ₄	g	不開NH ₃ /SiH ₄ 。
TMGa	g/v	不帶TMGa，排Vent。

TEGa	g/v	不帶TEGa，排Vent。
TMIIn	g/v	不帶TMIIn，排Vent。
TMAI	g/v	不帶TMAI，排Vent。
Cp ₂ Mg	g/v	不帶Cp ₂ Mg，排Vent。
連結至腔體端氣動閥狀態 (未按下前置面板上"SYSTEM IDLE STATE' PNEUMATIC VALVES ON REACTOR INLET CONTROL BUTTON"按鍵的預設狀態)		
氣動閥名稱	開關狀態 (邏輯指令)	說明
Run V-1/Run V-2	On(1)	在系統潔淨狀態下，如使用者未按下前置面板上該按鍵時，系統為Purge狀態；如按下該按鍵，則為腔體保壓狀態，不同狀態下氣動閥開關如左所示。
Run III	On(0)	
Liner Purge	On(1)	
Graphite Purge	On(1)	
Particle	Off(0)	
連結至腔體端氣動閥狀態 (按下前置面板上"SYSTEM IDLE STATE' PNEUMATIC VALVES ON REACTOR INLET CONTROL BUTTON"按鍵，腔體保壓)		
Run V-1/Run V-2	Off(0)	說明
Run III	Off(1)	若腔體壓力小於1030mbar，系統將開啟Run III氣動閥On(0)，反之則關閉Off(1)。
Liner Purge	Off(0)	
Graphite Purge	Off(0)	
Particle	Off(0)	
註：WK2008磊晶系統在系統潔淨狀態下，III、V族管路進腔體總流量為1000sccm，III族與V族總流量各500sccm；Vent端流量暫訂為250sccm。		

表B-3 WK2008系統處於潔淨狀態下對應之硬體設定

B-6-3 【系統潔淨程式設計架構】

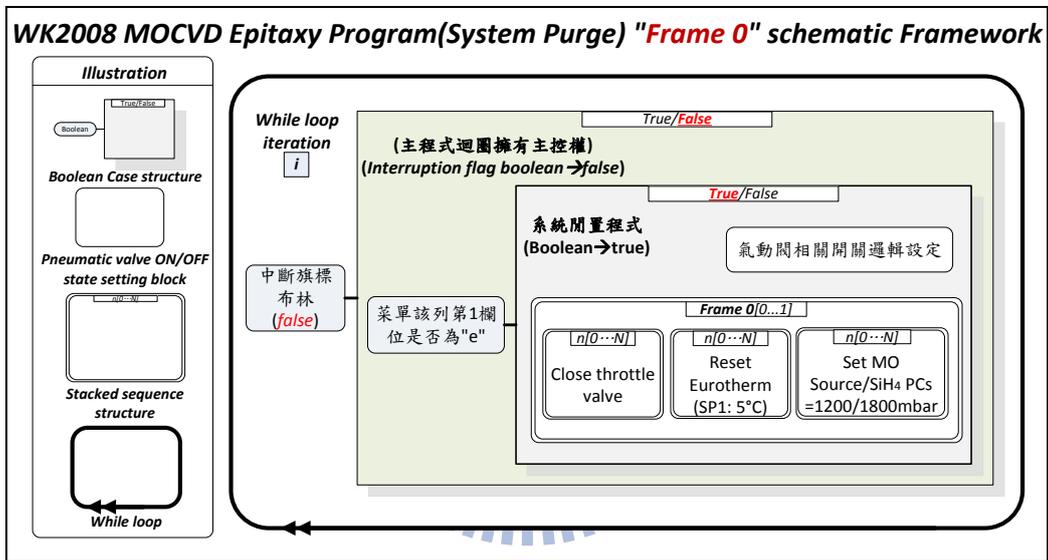
系統潔淨程式設計基本理念為將表B-3所列之系統預設值寫入各別對應的硬體後，即持續做讀取動作。基於上述理念，系統潔淨程式為條件布林控制的Case架構，在Case架構內嵌入堆疊序列(Stacked sequence)，共分為Frame 0及Frame 1，其設計如下分項所述。重複上文所述，該堆疊序列架構為嵌在主程式迴圈中，菜單控制字元為"e"的真布林值(Boolean→True)條件架構內；相關程式設計架構如圖B-17、圖B-18所示。

1. Frame 0：將預設參數值寫入個別對應的硬體中。

2. Frame 1：利用 *While* 迴圈，持續讀取硬體回應之數值，*While* 迴圈結構特性為持續程式動作，直到下達終止指令(Program Stop)。

【Frame 0 程式設計】

系統潔淨程式中堆疊序列0(Frame 0)如圖B-17所示，其主要設計為將預設值寫入對應的硬體中，分為關閉節流閥、重置(Reset)溫控器、MO分子源/SiH₄壓控器壓力設定等；而載流氣體種類和各式流量計流量設定為菜單指令為"e"的前一步驟列所設定之值，不再次作設定及寫入動作，其餘氣動閥邏輯狀態也根據表B-3所列依其特定字元寫入邏輯判定式中。

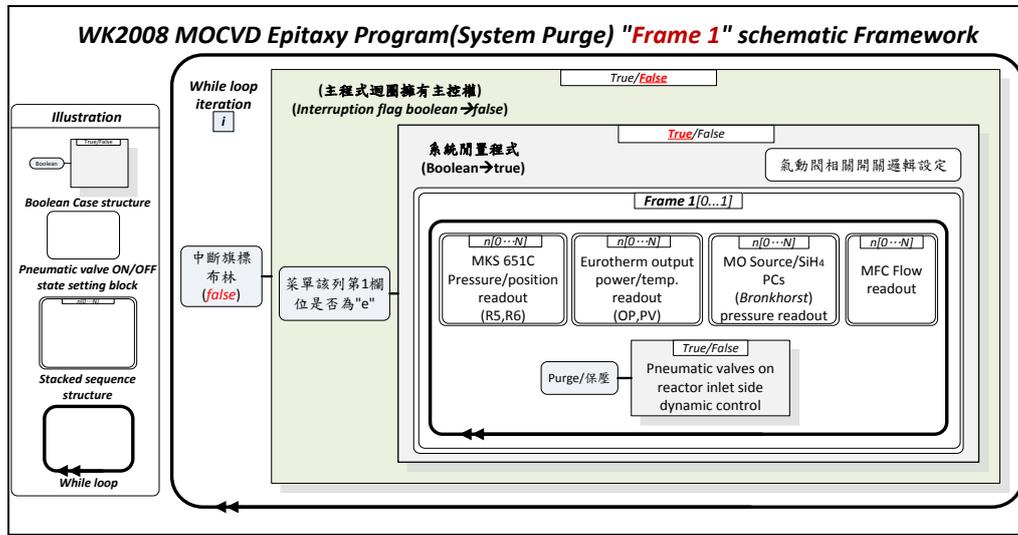


圖B-17 WK2008 MOCVD 磊晶系統潔淨程式設計架構(堆疊序列0)

註：在系統潔淨狀態，將節流閥(Throttle valve)設定為全關閉，目的為可使不含反應物分子源之潔淨氣體(Purge gas)，不經由Scrubber的酸鹼中和反應，直接經由單向導通之逆止閥(Check Valve)經由Extract管路排放至大氣中，詳細氣體走向請參閱圖A-22。

【Frame 1程式設計】

系統潔淨程式中堆疊序列1(Frame 1)設計如圖B-18所示。



圖B-18 WK2008 MOCVD磊晶系統潔淨程式設計架構(堆疊序列1)

其為利用While迴圈持續讀取溫控器的目前溫度、設定溫度、RF輸出功率，及腔體目前壓力(MKS)、個別MO分子源壓力控制器目前壓力值、個別流量計目前的輸出流量等值。讀取指令格式與先前介紹的個別硬體讀取程式相同；此外在Frame 1中，另外加入了連結至腔體的氣動閥開關動態控制，控制邏輯如同表B-3中連結至腔體端氣動閥狀態說明。

【系統潔淨狀態之氣動閥狀態設定】

為防止使用者編輯菜單疏忽，所以WK2008磊晶系統處於潔淨狀態時，強制設定個別氣動閥狀態，惟獨不強制設定載流氣體相關的4個氣動閥(H1/N1/H2/N2)，使用者可決定使用氫氣或氮氣潔淨(Purge)系統；使用者在編輯菜單時需多加注意編輯菜單中指令'e'的上一步驟中載流氣體指令(Column 5)，相關氣動閥預設控制字元如同表B-3中氣體傳輸管路之氣動閥狀態設定所示。系統潔淨狀態的氣動閥設定區塊獨立於上述堆疊序列，但仍嵌在主程式中，菜單控制字元為'e'的真布林值條件架構內。

B-7 系統安全模式設計

本節為介紹 WK2008 磊晶系統中的安全模式設計，文章開始先將系統偵測異常狀態依其嚴重性程度大小來作狀態定義，主要包含有警示(Early warning)、預警(Precaution)、程序停止(Process Stop)，以及緊急狀態(Emergency state)等 4 項，個別觸發狀態將分類介紹並包含程式應對設計概念等；接下來則針對系統安全模式和系統跳電情況下的各式硬體動作設定作定義，包含載流氣體設定、氣動閥邏輯設定、流量計設定、壓力控制器壓力值設定等；此外尚針對前置面板上節流閥控制按鍵使用時機等作說明。為使使用者能夠完全瞭解安全模式下系統設定及建議的狀態排除方法，B-8 小節附錄 VIIA-5 將介紹不同觸發狀態下控制系統的軟硬體設定比較、各項觸發狀態初步判定與排除方法、各式狀態偵測方式、WK2008 控制系統相關硬體參數等，內容皆以列表呈現便於參考。

本節著重於介紹安全模式架構設計理念，期使使用者瞭解整體程式運作；而程式設計部分，僅節錄部分較為特殊的設計附於 B-8 節附錄 VIIA-3。

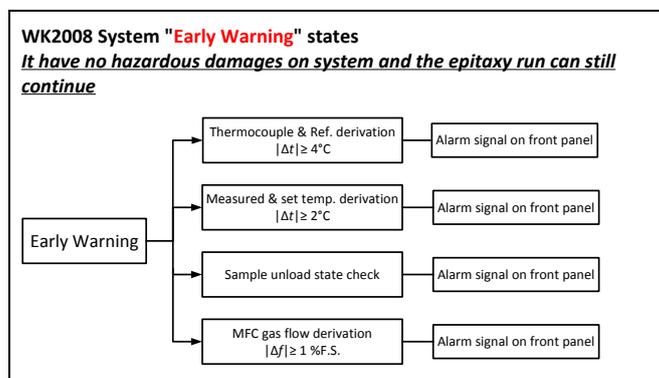
B-7-1 【系統安全模式考量】

WK2008 磊晶系統參考商用機台 Aixtron 200/4RF 型磊晶系統的安全模式考量，設計出適合系統的諸多異常狀態偵測，其中依狀態嚴重性程度可分為早期警示(Early warning)、異常預警(Precaution)、程序停止(Process Stop)，及緊急狀態(Emergency state)等 4 項，圖 B-18(a)~(d) 即為系統狀態分類及其相對應的程式設定概念和硬體設定等。

【早期警示狀態(Early Warning)】

在 WK2008 磊晶系統中，程式設計了 4 項早期警示狀態偵測，包含溫度控制器讀取溫度值與溫控器參照組(Reference)之間相差值是否大於 4°C、溫度控制器溫度設定與讀取值之間相差值是否大於 2°C、流量計流量設定與讀取之間相差值是否大於 1% 的全流量(1% F.S.)、樣品是否處於可取出之狀態

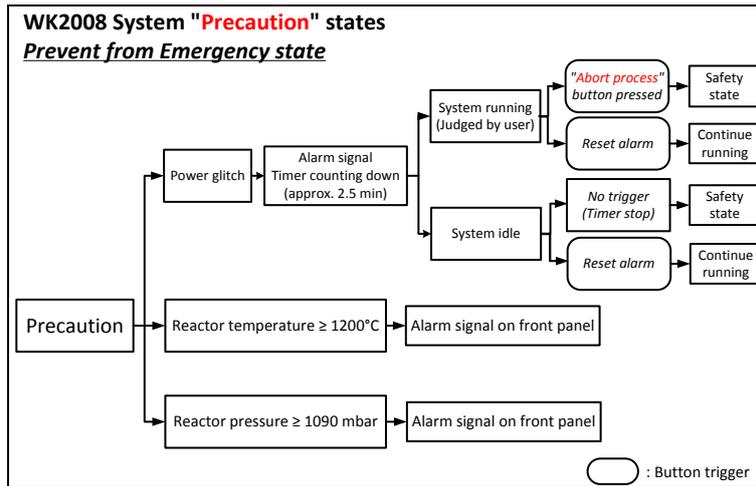
(Sample unload state check)，這4項狀態主要為提供使用者硬體誤差狀態校正判定，而當該狀態發生時，程式僅在前置面板上相對應的預設狀態燈號轉為紅燈以做顯示用，且警示狀態皆不影響系統運作，但使用者仍需多加注意。



圖B-18(a) WK2008磊晶系統預設早期警示(Early Warning)狀態

【異常預警狀態(Precaution state)】

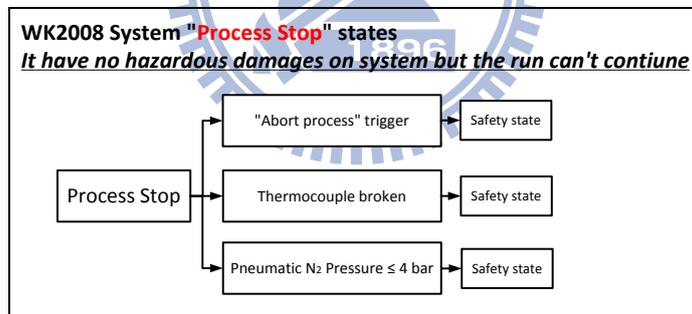
系統異常預警(Precaution)狀態主要為提醒使用者可能發生的潛在緊急狀態，預防緊急狀態發生，主要有系統跳電狀態、腔體壓力大於1090mbar、腔體溫度大於1200°C等3項；當發生上述3項狀態時，程式僅會在前置面板上相對應的預設狀態燈號轉為紅燈以做顯示用，而磊晶程序仍會持續進行不受該狀態所影響。當系統跳電時，不斷電系統(UPS)將透過RS-232(Com1)通訊埠送出跳電訊號給系統程式，此時程式開始倒數計時(一般約為140秒)，如使用者未按下前置面板上的"Power Glitch Timer Reset"按鍵將計時器重置，系統程式將自行載入安全模式，系統因應跳電狀況的硬體設定請參閱下文中【系統因應跳電(Power Glitch)之相關硬體設定】內容。



圖B-18(b) WK2008磊晶系統預設的異常預警(Precaution)狀況

【程序停止狀態(Process Stop)】

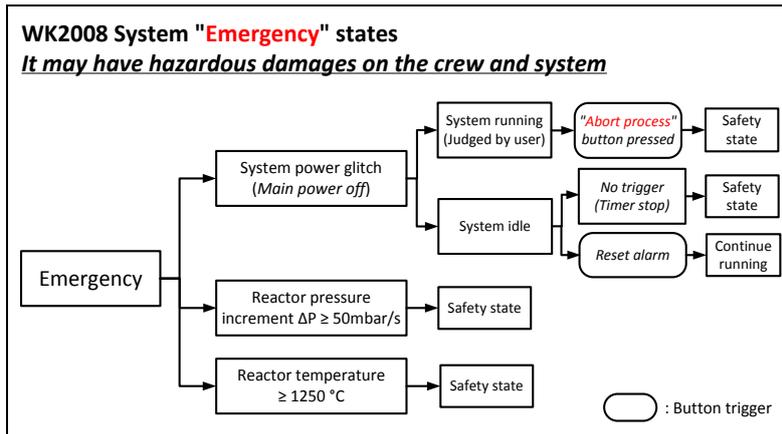
熱電偶電路開路、供給氣動閥的氮氣壓力(Pneumatic N₂ Pressure)低於4bar，這2種狀態不會對系統造成立即損害，但磊晶程序已不能夠持續進行，當發生上述狀態時，系統程式會強制切換至安全模式；此外程式亦設計強制中斷按鍵(Abort Process)，當該按鍵經使用者按下而狀態觸發，程式會經由使用者重覆確認(Double check)動作後，再行載入安全模式。



圖B-18(c) WK2008磊晶系統預設程序停止(Process Stop)狀態

【緊急狀態(Emergency state)】

所謂系統緊急狀態亦即當該狀態發生時，不但該次製程程序無法延續外，亦可能對系統或人員造成立即損害；主要緊急狀況有系統斷電(Power glitch)、腔體壓力上升速率大於50mbar/s、和腔體溫度讀取值大於1250°C等4項狀態，當其中任一個狀態發生，程式立即載入安全模式(Safety Mode)，安全模式相關設定請參閱B-7-2節。

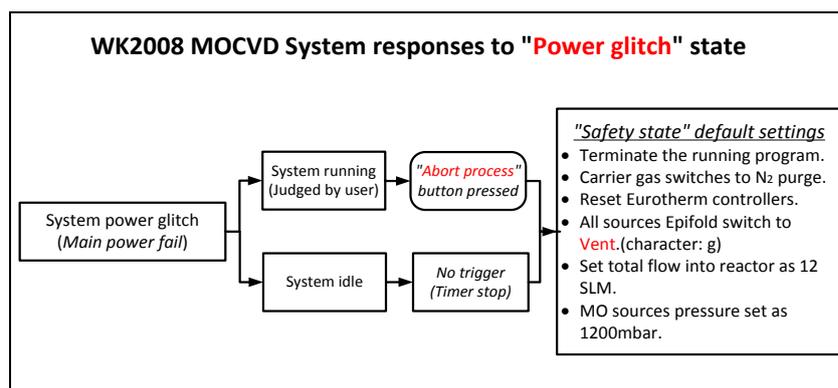


圖B-18(d) WK2008磊晶系統預設緊急(Emergency)狀態

【系統因應跳電(Power Glitch)之相關硬體設定】

當不斷電系統(UPS)送出跳電訊號，經使用者判定為斷電狀況(確認狀態觸發，"Abort process" triggered)或程式斷電倒數計時器終止，系統程式將自行載入安全模式。系統對應之硬體預設值如下：

1. 中止主程式。
2. 載流氣體切換為氮氣(指令字元n)。
3. 重置溫度控制器(SPI=5°C)。
4. 關閉所有MO分子源和V族、摻雜分子源(不帶Source，指令字元g)。
5. 所有分子源管路Epifold端切換至Vent(排Vent，指令字元v)。
6. 所有MO分子源末端管路壓力設為1200mbar。



圖B-19 WK2008控制系統因應跳電狀態之硬體設定

註1：在WK2008系統中，UPS僅供應下列硬體(110VAC)：

- 1-1. 系統工業級電腦。
- 1-2. 上、下溫度控制器(Eurotherm 818P)。

1-3. $\pm 15\text{VDC}$ 電源供應器(供給啟成(SIC)流量計)。

1-4. $+24\text{VDC}$ 電源供應器(供給MO分子源管路末端壓力控制器(*Bronkhorst*), 及所有電磁閥 24V 直流電源)。

1-5. TMGa(L)流量計供電(110VAC to $+24\text{VDC}$)。

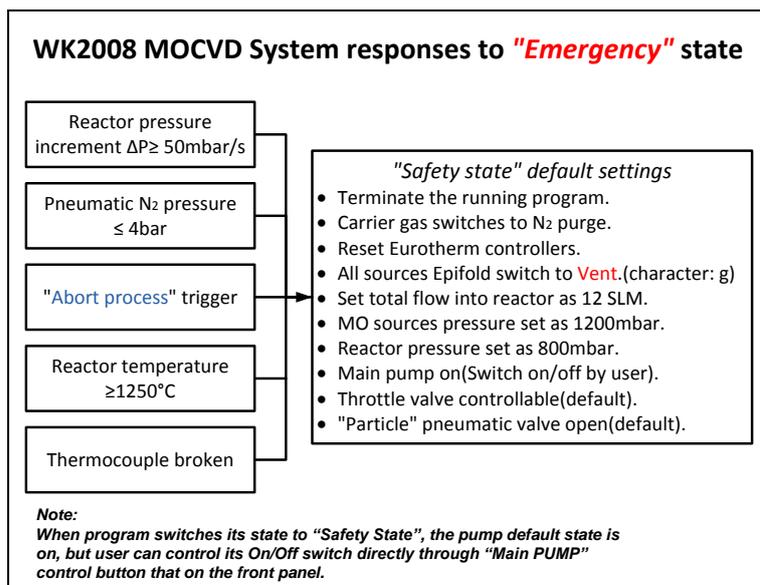
註2: 市電回復後, 流量計/壓力控制器會維持在供電前的流量(壓力)設定值, 亦即設定值已寫入硬體內部的EEPROM中。

註3: 系統斷電後, *Bronkhorst* 相關控制器需要重置, 即TMGa(L), TMGa_Press, TMIn_Press, 由於這3台控制器(包含1台流量計與2台壓力控制器)預設為類比輸入(Analog input)控制, 當LabVIEW程式再度控制其硬體時, 會有無法控制的情形發生(但可做讀取動作), 此時需進入*Bronkhorst FlowDDE* 程式調整回0.BUS/RS232控制, 詳細調整內容請參閱附錄G G-J。

B-7-2 【系統安全模式狀態下的硬體設定】

LabVIEW控制程式在安全模式下的相關硬體預設值如下9點所列:

1. 中止主程式。
2. 載流氣體切換為氮氣(指令字元n)。
3. 重置溫度控制器($\text{SP1}=5^\circ\text{C}$)。
4. 關閉所有MO分子源和V族、 SiH_4 分子源(不帶Source, 指令字元g)。
5. 所有Epifold切換至Vent(排Vent, 指令字元v)。
6. 設定流量計進腔體總量為 $12\text{SLM}^{\text{註1}}$ 。
7. 所有MO分子源末端管路壓力設為 1200mbar 。
8. 真空泵浦(Mechanical Pump)預設為開啟(使用者仍可自由切換其電源開關)。
9. 反應腔體壓力預設為 800mbar , 且節流閥為受控狀態(Throttle valve controllable)。



圖B-20 WK2008控制系統因應緊急狀態的相關硬體設定

註1：安全模式下個別流量計流量設定如表B-4所示。

MFCs flow settings under Safety Mode			
MFC	Flow setting	MFC	Flow setting
Run V	1500sccm	Run III	5500sccm
NH ₃ (M)	1350sccm	Sub III	500sccm
NH ₃ (L)	150sccm	TMGa(H)	4sccm
Liner Purge	250sccm	TMGa(L)	1sccm
Disk rotation	250sccm	TMGa_PUSH	95sccm
Vent	1000sccm	TMIn	100sccm
TMAI	50sccm	Cp ₂ Mg	250sccm
SiH ₄ _Source	20sccm	SiH ₄ _Dilute	500sccm
SiH ₄ _Inject	20sccm	NH ₃ (H)	3000sccm

表B-4 WK2008磊晶系統安全模式下個別流量計的流量設定

註2：LabVIEW程式在安全模式(Safety Mode)狀態下，儘管腔體壓力預設值為800mbar，但此時使用者仍可隨時切換節流閥開關狀態，其控制按鍵為前置面板上的"Throttle valve control button"。

需注意：在菜單字元控制(一般磊晶程序)及系統潔淨狀態下，節流閥控制按鍵"Throttle valve control button"功能無效，節流閥狀態會自動鎖定在其預設值，使用者無法透過該按鍵任意改變節流閥狀態。

➤ 菜單字元控制：節流閥開關受MKS 651C控制(Controllable)。

➤ 系統潔淨狀態：節流閥強制關閉(Closed)。

"Throttle valve control button"控制鈕於【安全模式】狀態下功能說明：

不按控制鍵：如真空泵浦開啟，腔體壓力受控於800mbar，此時節流閥由MKS 651C腔體壓力控制器控制其開口度；如真空泵浦關閉，腔體壓力逐漸往上升(終端壓力約為1070mbar)，而此時節流閥開口度(%)應會逐漸變大。

按下控制鍵：節流閥立即關閉，此時無論真空泵浦開啟與否，腔體壓力逐漸往室壓上升，而腔體氣流透過逆止閥(Check valve)經由'Extract'管路排至大氣中，建議使用者此時關閉真空泵浦。

此外，Particle氣動閥在安全模式下的預設狀態為開啟(如未開啟，腔體末端未聯結至真空泵浦)，如按下前置面板上的"Throttle valve control button"控制鍵，即強制節流閥關閉，Particle氣動閥亦立即關閉，氣流不經過Particle trap而是通往25&70mbar逆止閥管路端，故腔體壓力會逐漸往室壓上升。

B-7-3 【安全模式程式設計架構】

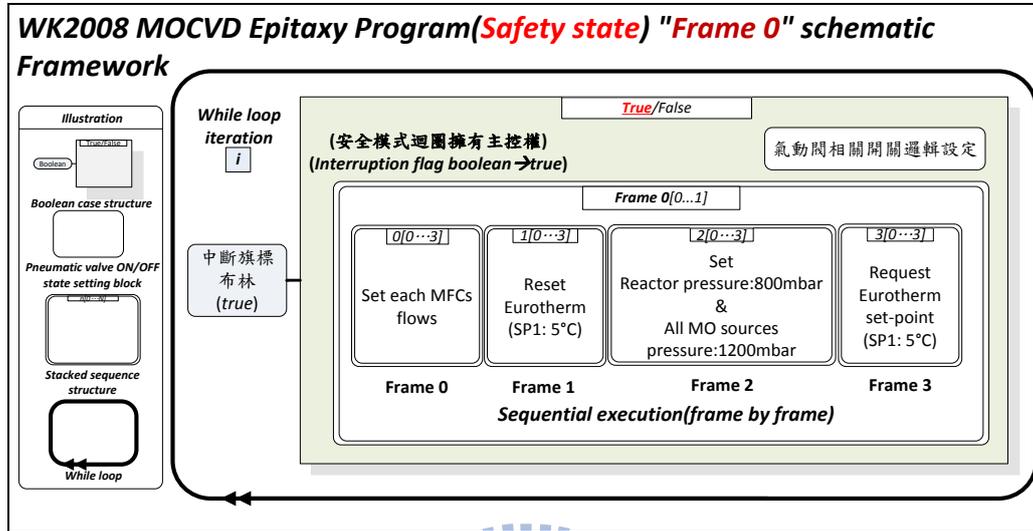
安全模式程式設計架構與系統潔淨程式設計架構相似，其基本理念為將B-7-2小節所列之系統預設值寫入各別對應的硬體後，即持續做讀取動作；與系統潔淨程式不同的是，安全模式狀態下的載流氣體設定為全氮氣，而進腔體總氣體流量為5.5SLM。安全模式與系統潔淨程式架構相同，皆為條件布林控制的Case架構，在Case架構內嵌入堆疊序列，共分為Frame 0及Frame 1，其設計如下分項所述。重複上文所述，該堆疊序列架構為嵌在主程式迴圈，中斷旗標布林值為真(Boolean→True)的條件架構內；相關程式設計架構如圖B-21、圖B-22所示。

1. Frame 0：將預設參數值寫入個別對應的硬體。
2. Frame 1：利用While迴圈，持續讀取硬體回應之數值，While迴圈結構特性為持續程式動作，直到下達終止指令(Program Stop)。

【Frame 0】

安全模式的Frame 0設計架構如圖B-21所示，Frame 0主要功能為寫入參數，在設計上為在Frame 0內再嵌入堆疊序列(Embedded Frame 0~3)，且依照

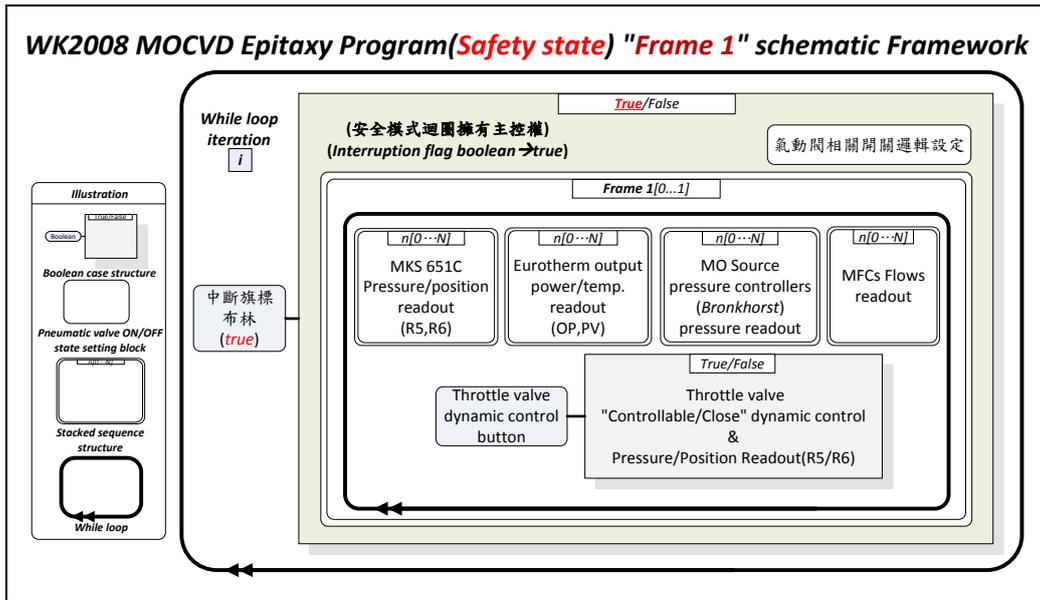
硬體屬性區分將寫入動作作時序切割(Time sequence divion)，並依照序列編號(0~3)(Frame by frame)將對應數值依序寫入(Sequential execution)，整體耗時約0.3秒；如此序列切割的目的僅為方便程式維護者編輯程式。



圖B-21 WK2008 MOCVD 磊晶程式"安全模式序列0(Frame 0)"設計架構

【Frame 1】

安全模式Frame 1設計架構如圖B-22所示，其設計與系統潔淨程式Frame 1的設計架構相同，皆為利用While迴圈持續讀取各式硬體回傳數值。讀取指令格式與先前介紹的個別硬體讀取程式相同，不再贅述。此外在Frame 1中，另外加入了節流閥開關動態控制(Throttle valve "Controllable/Close" dynamic control button)，控制邏輯如同B-7-2註2所述，程式設計如B-8節附錄中VIA-3-2內容所述。



圖B-22 WK2008 MOCVD磊晶程式"安全模式序列1(Frame 1)"設計架構

B-8 附錄VII (Appendix VII)

本附錄內容分為各項程式區塊內的撰寫細節和列表等2大部分。其各項程式區塊內的撰寫細節包含獨立程式區(VIIA-1)、主程式迴圈中菜單指令字元控制區段(VIIA-2)、安全模式區塊(VIIA-3)程式節錄、其他程式項(VIIA-4)等4大部分；其主要篇幅集中於VIIA-2，其包含系統中所有硬體控制介面的程式寫法細節，使用者若有修改程式需要可選擇查閱之。

VIIA-5內容主要為各項系統硬體參數附表，提供各項維修參考依據。

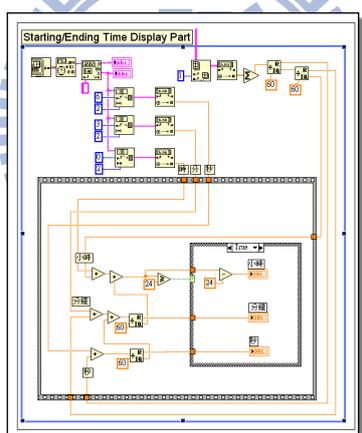
VIIA-1【獨立程式區】

『獨立程式區』為獨立於主程式迴圈與系統異常狀態偵測迴圈的程式設計區，其包含磊晶程序時間計算和菜單格式轉換及輸入等2大區塊。

該磊晶程序時間計算區塊負責計算磊晶製程中所需的時間資訊，包含程式起始時間、菜單執行時間(Duration)估算、預計菜單中止時間等訊息，而菜單格式轉換及輸入部分則將輸入的(.txt)格式菜單做陣列編碼(Array indexing)，而後匯入主程式迴圈內提供相關數值擷取。

VIIA-1-1 【磊晶菜單耗時計算區塊】

磊晶程序時間計算程式區塊獨立於主程式迴圈與系統異常狀態偵測迴圈架構，如圖B-6(右上方)、B-11(左上方)所示，其主要功能為計算磊晶程序所需的時間資訊，包含讀取程式起始時間(包含年/月/日/時/分/秒)，且根據菜單中設定計算程式執行(Duration)時間，即菜單控制指令字元執行至"e"步驟之前的所有步驟耗時(Column 1)加總計算，以及估計菜單結束時間(時/分/秒)等，並於前置面板顯示各項系統時間資訊，如圖B-1中所示；程式設計則如圖B-A1所示，該程式部分僅為抓取單一起始時間值及簡易數值運算，故該運算不需以迴圈(Loop)架構來撰寫，此外目前系統時間及該次步驟倒數時間等資訊，則分別寫在系統異常狀態偵測迴圈(While)和主程式迴圈(For)中，詳細請參閱VIIA-4-1和VIIA-2-2等兩小節內容。

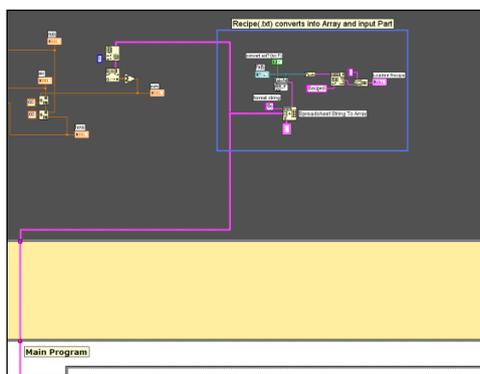


圖B-A1 磊晶程序時間計算區塊

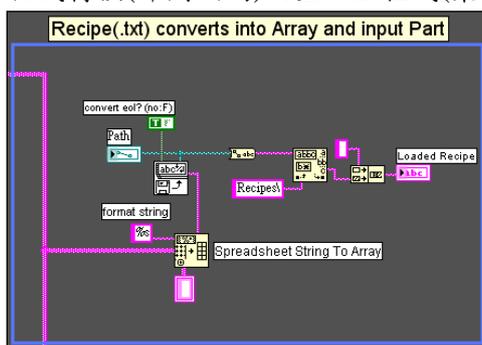
VIIA-1-2 【菜單格式轉換及輸入部分(Spreadsheet String to Array)】

WK2008磊晶系統中LabVIEW程式的起始端為先將經由菜單EXCEL編譯程式所編譯過的菜單(Compiled Recipe)匯入，其檔案格式為以Tab分行的(.txt)文字檔。在菜單匯入主程式前，控制程式會先將其格式轉換成陣列編碼(Array indexing)形式，即對菜單指令作列位(Row index)及欄位(Column index)編碼，再將(.txt)菜單文字檔匯入主程式中，正常工作區塊、菜單指令字元控制區段內。一旦匯入後，主程式該區段立即由第0列(步驟1)開始，

逐列(Row by row)依序執行菜單步驟，並將該列中所有欄位的設定值(壓力、溫度、流量等)和氣動閥狀態設定字元(Pneumatic valves ON/OFF state control characters)，依其欄位編號將該列設定值寫入相對應的硬體或邏輯判斷式中，圖B-A2為格式轉換及輸入部分設計。



圖B-A2(a) 菜單格式轉換(陣列編碼)及匯入主程式(菜單字元控制部分)



圖B-A2(b) 菜單格式轉換(陣列編碼)部分放大

VIIA-2 【主程式迴圈中菜單字元控制區段各項子程式介紹】

這部分為說明在主程式迴圈中、正常工作區塊，菜單字元控制區段(正常磊晶程序)架構內的8項子程式的設計理念、程式架構等軟硬體介面控制細節，使用者可根據需求查閱之。

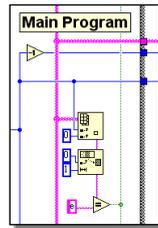
1. 擷取菜單陣列數值部份。
2. 菜單該次步驟秒數倒數。
3. 氣動閥邏輯狀態設定。
4. 流量計設定(Write/Read)。
5. MO分子源氣體壓力控制器(*Bronkhorst*)設定(Write/Read)。
6. 溫度控制器(*Eurotherm 818P*)設定(Write/Read)。

7. 腔體壓力控制器(MKS 651C)設定(Write/Read)。
8. 菜單(Recipe)狀態顯示。

註：在菜單字元控制程式區段架構下，根據不同硬體設定共分為4個由堆疊序列(Stacked sequence)架構所構成的子程式(Sub-Program)，個別子程式有其專責的硬體設定，相互獨立但擁有相同執行時脈(Clock)；其中包含溫控器(Eurotherm 818P)設定、腔體壓力控制器(MKS 651C)設定、MO分子源上游管路壓力控制器(Bronkhorst)設定、氣動閥狀態設定及流量計設定；其中氣動閥設定與流量計設定寫在同一堆疊序列架構內，氣動閥狀態程式設定內容為在序列編號0(Frame 0)內，流量計程式設定則在序列編號1(Frame 1)中。

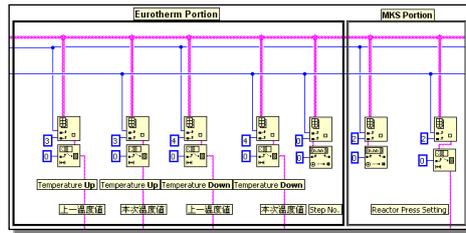
VIIA-2-1 【擷取菜單陣列數值】

當菜單轉換成陣列格式後，會以(m×n)的陣列維度表示，且陣列中所有字元皆為字串(String)格式。待數值陣列匯入主程式中菜單字元控制區段後，該區段會先做菜單控制指令字元是否為"e"的布林真偽判定，即擷取第0列中的第0行，且長度為1的字元作布林值真偽判定，如此用以決定要載入主程式迴圈中正常磊晶程序設定或系統潔淨區段，布林真偽值判定設計如圖B-A2所示。



圖B-A2 擷取菜單陣列(Column=0, Length=1)

菜單字串陣列中第0行為控制指令(Command)，只要該指令字元不為e(end)，主程式則繼續將該列(Row 0)中後續欄位數值(Column 1~...Column n-1)擷取出並寫入相對應硬體或判斷式中，如圖B-A3所示；而若當陣列中第0行指令字元為"e"(End)時，表示菜單指令控制區段中止，主程式旋即載入系統潔淨區段(System idle)設定。



圖B-A3 擷取菜單中各項欄位(Column index ≠0)設定值

若陣列中第0行內的菜單指令字元(Command)不為e(end)，且當該列中第1行內所設定的執行時間(秒數)倒數結束後，主程式即跳往下一列重複執行上述動作，即先判定該列中的第0行字元是否為"e"，若不為"e"，則執行後續欄位資料擷取及寫入硬體動作，後續欄位則依其擷取欄位編號(Column index)，分別將欄位內數值寫入對應的硬體設定子程式中。

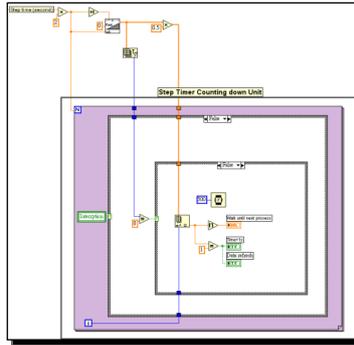
VIIA-2-2 【菜單該步驟列秒數倒數迴圈】

菜單中每一步驟(列)皆有其設定時間(秒)，待該步驟列設定時間執行完畢後旋即跳至下一步驟列依序執行指令內容及硬體設定，以此模式反覆執行。菜單該次步驟列時間倒數設計可讓使用者了解目前該次菜單步驟列還剩下幾秒鐘，而程式設計技巧為利用LabVIEW中的"*Ramp Pattern*"^{註1}函數，起始值為該步驟所設定的秒數，中止值為0，而個數(samples)為該步驟所設定的秒數加1，利用*For*迴圈^{註2}，設定執行單次的秒數為1秒，並將由"*Ramp Pattern*"函數輸出的數值(Ramp Pattern)顯示於前置面板上(如圖B-1上方所示)，程式設計如圖B-A4所示。相同地該時間倒數迴圈為嵌在主程式裡正常工作區塊中，菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→*False*)條件架構內；而此時間倒數迴圈最主要功能在於提供菜單執行步驟中所有硬體讀寫程序的時序控制。

註1：圖像  說明：

LabVIEW 的"*Ramp Pattern*"函數，該功能為將輸入起始值(Start)至終止值(End)根據輸入的次數(samples, N_r)作等差級數排列。

註：*For*迴圈執行次數為該步驟列所設定的秒數。



圖B-A4 菜單該次步驟列時間倒數程式

在B-2節【精確時間控制】中提到，程式利用資料清空技巧，在步驟秒數倒數結束前1秒強迫中止所有迴圈讀值動作，以達到步驟銜接無時間差和菜單執行時間無延遲；而主要設計為在該時間倒數 For 迴圈中加入倒數秒數是否為1秒的布林值真偽判定，並將該布林值傳遞至正常工作區塊/菜單指令字元控制區段中，所有 For 讀值迴圈內的布林真偽判定條件結構內。若該布林值為真(即步驟倒數至最後1秒)， For 迴圈內對應之程式設定旋即轉為空集合，而 For 迴圈所剩餘的次數將不再執行任何讀寫動作，即中止所有硬體的資料讀取動作；如此設計可解決在步驟銜接時，因尚有硬體未完成讀取動作所造成的程式執行時序延遲問題。相同地，在正常工作區塊/菜單指令字元控制區段中，所有 For 讀值迴圈內的布林真偽判定條件控制項為中斷旗標布林與步驟秒數是否為1秒的或閘(Or gate)集合；即其中任一項布林值為真， For 迴圈旋即轉為空集合。

For 讀值迴圈內的條件架構布林控制項設計如圖B-A5所示。



圖B-A5 正常工作區塊/菜單字元控制區段中， For 讀值迴圈之布林判定條件架構

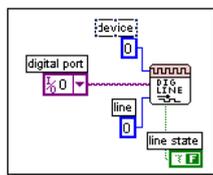
VIIA-2-3 【氣動閥邏輯狀態設定】

WK2008磊晶系統中，氣動閥控制邏輯主要分為氣體傳輸管路中氣動閥控制及真空系統內氣動閥邏輯控制等2大項，氣體傳輸管路中氣動閥控制邏輯分為：載流氣體切換(N₂/H₂ switch, n/h/H₂+N₂)、帶或不帶反應分子源(s/g)、分子源大小流量計切換(h/l)、進反應腔體或排至真空泵浦(r/v)、連結至反應腔之氣動閥開關邏輯切換(e/purge/保壓)等狀態判定。真空系統管路氣動閥控制邏輯則可分為：磊晶程序執行、磊晶程序結束、系統緊急狀況等狀態判定；詳細的狀態邏輯設計請參閱A-4-2 WK2008磊晶系統氣動閥邏輯設計章節。氣動閥開關的邏輯設定個別有其對應之字元控制，詳細的SSR、電磁閥等硬體對應及狀態切換控制邏輯請參閱A-3 WK2008控制系統指令邏輯及相關硬體對應關係說明及表A-12(a)~(b)。

【LabVIEW平台D/O(Digital Output)程式設定】

在WK2008磊晶系統中，氣動閥軟體端控制是藉由ADVANTECH PCI-1739U(D I/O)介面卡的邏輯態(Logic 0/1)輸出直流電壓(0/5V)來控制SSR、電磁閥電路迴路，而其程式中軟體圖示(Icon)為 (D/O)。

LabVIEW控制系統起初在安裝PCI-1739U硬體時，已將研華所提供的應用軟體安裝於LabVIEW平台上，其在LabVIEW路徑為User Libraries/Advantech DAQ/Digital I/O/ADV Write to Digital Line，而程式所需設定的4個參數即圖B-A6所示。



圖B-A6 Advantech LabVIEW輸出設定

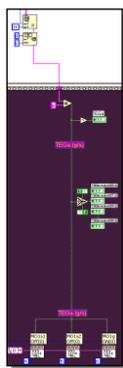
1. 硬體編號(Device)：即是控制卡ID(Board ID)。
2. 埠編號(Digital port)：指定埠編號，可設定為0~5，共6組。
3. 位元編號(Line)：個別埠中的位元編號，可設定為0~7，共8位元(bit)，

實際對應如ADAM-3950輸出模組上編號所示。

4. 位元狀態(Line state)：指定個別輸出埠的邏輯狀態(Logic state)，可為邏輯高態(Logic 1)或邏輯低態(Logic 0)。

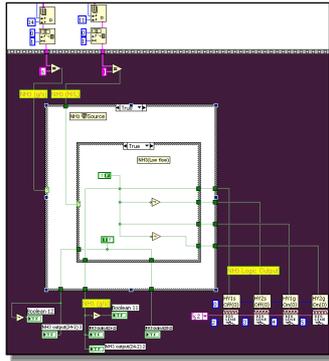
如同上文所述和圖B-14右下角所示，系統中所有氣動閥控制邏輯設定與流量計設定寫在同一堆疊序列架構中，氣動閥狀態程式設定內容為在序列編號0(Frame 0)內，流量計程式設定則在序列編號1(Frame 1)中，且該堆疊序列子程式為嵌在主程式中，菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→False)條件架構內。主程式開始執行後，該堆疊序列程式執行完序列編號0內所有氣動閥設定後(約耗時數毫秒)，旋即進入序列編號1內作流量計設定。由於所有氣動閥控制邏輯設計為數繁多，以下僅舉III族MO分子(TEGa)及V族分子(NH₃)為例簡單說明。

圖B-A7為判斷管路中是否通入TEGa(MO5)MO分子源的D/O程式部份，判定字元為擷取菜單中第31行(s/g)，該字元經由程式邏輯判定設定對應的氣動閥開關；為ADVANTECH PCI-1739U(D I/O)介面卡的(0/1)輸出圖示(Icon)，為管路布林(Boolean)燈號，同理TEGa (v/r)指令的邏輯判定與管路燈號也是如此設定，不再贅述。



圖B-A7 是否帶出TEGa(Source)的D/O程式部份

圖B-A8為控制V族分子(NH₃)相關的氣動閥邏輯，由於NH₃僅有2種控制字元，即(s/g)和(m/l)，而由這2種字元組合的4種邏輯狀態來控制HY1s，HY2s，HY1g，HY1g這4個管路上的氣動閥開關。



圖B-A8 NH₃相關之氣動閥邏輯輸出

註：TEGa，NH₃氣動閥邏輯請參閱A-4-2 WK2008磊晶系統氣動閥邏輯設計。

VIIA-2-4 【流量計設定(寫入/讀取)】

在菜單控制指令(Column 0)中，共有o/r/ous/rus/ods/rds等6項控制指令，而控制指令為複合指令格式(Compound message format)，即控制指令與多項硬體設定有關；其中指令o/r字元只跟流量計設定有關，us/ds字元與系統中上、下溫控器快速升/降溫設定有關，詳細指令控制字元與溫控器硬體設定關係請參閱VIIA-2-6節內容，詳細菜單控制指令功能說明則請參閱表B-2。本小節僅敘述流量計控制，以下為其流量控制(o/r)指令說明：

o(Ordinary)：直接給定流量計所需流量，即要求系統中所有流量計以最快速率到達該列所個別設定的流量值。

r(Ramping)：要求系統中所有流量計由上一列的設定值，在該列設定時間內，到達該列所要求的流量值，亦即不要求立即到達該列菜單中所設定的流量，如此用意主要為避免腔體內氣流瞬間變化量過大。

再次重覆上文所述，系統中所有氣動閥控制邏輯程式設定與流量計設定寫在主程式內的同一堆疊序列架構中，氣動閥狀態程式設定內容為在序列編號0內，流量計程式設定則在序列編號1中。主程式開始執行後，該堆疊序列程式執行完序列編號0內所有氣動閥設定後(約耗時數毫秒)，旋即進入序列編號1內作流量計設定。在序列編號1內的流量計寫入/讀取程式區塊主要由"o/r"字元判定所構成的條件(case)架構，該條件架構判定菜單中每一控

制列的第0欄(Column 0)，且長度為1個字元的指令內容，若該字元為"o"，則執行"o"字元相對應的流量程式設定；若該字元為"r"，則執行"r"字元相對應的流量程式設定。下文即先敘述流量計設定值擷取及轉換方式，再就不同流量控制指令(o/r)內容做詳細程式細節說明。

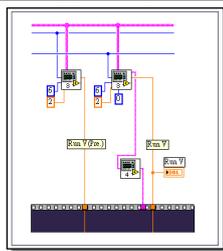
【擷取流量計設定值】

註：以下所述之相關指令及其格式皆為啟成科技(SIC)流量計的控制指令，而Bronkhorst流量計指令請參閱附錄F-3 通訊訊息(Communication Message)；指令格式雖不相同，但流量計(o/r)判定都整合在同一程式區塊中設定。

圖B-A9為擷取菜單中流量計設定值且做初步指令資料格式轉換的程式設計節錄，舉RunV流量計為例。在圖B-A9中，菜單陣列經由圖像擷取第6行中Run V的流量設定值並將其數值轉換成流量計的字串編碼格式(00000~10000)，流量資料由橘黃色訊號線(代表為數值格式，Numeric)傳送至下方由氣動閥狀態設定及流量計設定所構成之堆疊序列架構的序列編號1(Frame1)內。如果控制指令為r(ramping)，即給定流量計作ramping動作所需的前後流量值，即圖B-A9中顯示的上一列流量設定值「RunV(Pre.)」和該列流量設定值「RunV」。

此外圖像為將流量值轉換成流量計的編碼格式(資料為字串(string)格式，桃紅色訊號線為字串格式)，如指令為o(ordinary)，即要求流量值瞬間改變，而不做ramping動作，字串格式的設定值則經由桃色訊號線寫入下方對應的流量計設定程式中。

註：SIC流量計設定只接受字串(String)格式之指令，例：00,OR。



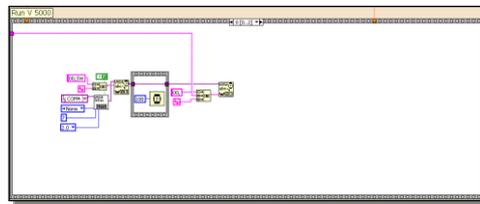
圖B-A9 擷取菜單流量計設定值且做初步指令資料格式轉換(SIC)

【流量計o(Ordinary)動作】

流量計o(Ordinary)動作中的程式設計為利用堆疊序列(*Stacked sequence*)架構，共分為3個序列區塊，序列0專做流量寫入動作，程式設定其耗時為100ms，序列1等待300ms，如此整體動作共需耗時0.4秒(寫入僅0.1秒)；序列2則專作流量讀取及驗證流量誤差動作。

【寫入】

在指令"o"中，序列0為執行流量寫入動作，程式直接利用"SW"指令將設定值寫入各別對應的流量計中，如圖B-A10所示，其中程式設定耗時100ms，圖B-A10中為RunV(5000)流量計的流量寫入程式設計節錄。

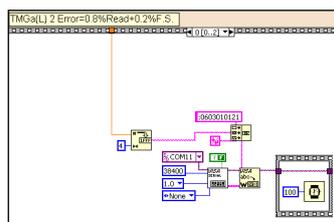


圖B-A10 SIC流量計流量設定程式

註1：流量計指令格式請參閱 附錄E E-3-2 流量計基本RS-232通訊指令集。

註2：LabVIEW 中 RS-232 序列通訊協定設定 (Protocol) 是透過 Serial communication () 物件來做相關設定，該物件可定義波特率、資料位元長度、停止位元長度、奇偶校驗位(Polarity check bit)等；使用者需注意在與硬體做序列通訊傳輸之前，程式與硬體雙方的通訊協定設定需一致。

圖B-A11為Bronkhorst EL-Flow氣體流量計(TMGa(L))的流量設定程式，在程式設計上僅指令格式(Message format)不同，整體程式架構皆與上述序列編號0~2內的執行內容相同。



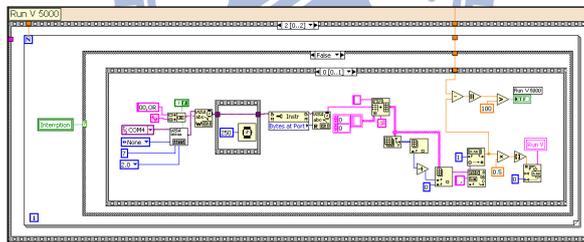
圖B-A11 Bronkhorst氣體流量計流量設定程式(Ordinary)

【讀取】

讀取程式如圖B-A12所示。流量讀取程式置於序列2中，序列2內嵌入For迴圈架構，其特性為需指定迴圈執行次數，次數計算方式為該步驟執行時間(該列菜單時間設定)除以程式設定耗時；由於讀取指令"OR"需耗時250ms，外加等待250ms，總共為0.5秒，所以讀取次數恰為執行時間的2倍；而當執行次數^註倒數結束For迴圈旋即中止，堆疊序列回到序列0並重新執行菜單下一步驟的設定值(若控制指令字元仍為"o")。讀取程式中亦加入了流量值誤差布林(Boolean)判定，即判定其誤差是否大於1%F.S.(啟成流量計數位指令：00100)；且當該布林值為真，前置面板於異常流量計的流量讀值顯示部份底部亮起紅燈以供警示。

註：流量計讀值程式For迴圈執行次數算法為菜單該列所設定的時間(秒數)減去寫入程式執行耗時(0.4秒)，再除以讀值程式執行時間。次數 N_o 計算如：

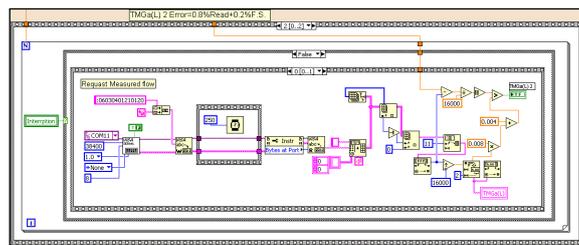
$$N_o = \left\lfloor \frac{T_n - 0.4}{0.5} \right\rfloor, T_n: \text{菜單該列所設定的執行時間(秒數)}。$$



圖B-A12 SIC流量計流量讀取程式

【Bronkhorst流量計讀取程式】

圖B-A13為Bronkhorst EL-Flow流量計流量讀取程式，其間差異僅止於指令及其編碼格式不同，其餘如程式架構、布林判定等皆與SIC流量計讀取程式相同，且程式架構同屬同一區塊(控制指令字元為"o")。



圖B-A13 Bronkhorst流量計流量讀取程式(Ordinary)

註：Bronkhorst EL-Flow流量計流量誤差判定為：0.8%Rd+0.2%F.S.，以WK2008 磊晶系統中TMGa(L)流量計(2sccm)來說，即設定與讀取值的差值須小於0.8%×讀值+0.004sccm。

【流量計r(ramping)動作】

流量計執行r(ramping)動作的程式設計主要為利用LabVIEW中的"*Ramp Pattern*"函數^{註1}，將經由上方擷取流量計設定值中數值(Numeric)編碼格式(橘黃色訊號線)的上/下限流量資料輸入該函數，而該函數即會輸出在該列設定時間(秒數)內的等差級數排列之流量設定值，並將該輸出設定值依序寫入流量計中，藉以完成流量計ramping動作，而等差級數次數(N_r)的算法為將該列設定的秒數除以設定及讀取流量計程式中的總耗時(1s)， $N_r = T_n$ ，耗時設定詳見下述。

程式設計方法即為將上一列的流量設定值「RunV(Pre.)」^{註2}及該列流量設定值「RunV」個別連接至圖像^{註1}上(initial)及(finial)數值欄位，並將輸出欄位接至流量設定(寫入)的程式序列中即可。流量計r(ramping)動作的程式設計也為堆疊序列程式架構，共分為4個序列區塊，程式依圖B-A14(a)~(d)中序列編號依序執行：(序列0) 呼叫並給定流量值、(序列1) 給定流量計等待時間、(序列2) 讀取流量值、(序列3) 讀取流量值之後的等待時間。

註1：圖像^{註1}說明：

LabVIEW 的"*Ramp Pattern*"函數，該功能為將輸入起始值(Start)至終止值(End)根據輸入的次數(samples， N_r)作等差級數排列，次數 N_r 為菜單該列設定秒數除以序列總執行時間(1秒)， $N_r = T_n$ 。

註2：僅列RunV流量計(SIC)為例，其餘流量計"r"指令對應程式寫法皆相同。
(序列0) 呼叫並給定流量值：

WK2008控制系統利用RS-232作為和數位式流量計的通訊傳輸介面，在

LabVIEW中藉由 (VISA序列傳輸介面)設定完通訊協定參數(諸如：硬體通訊埠編號、波特率、停止位元、資料位元長度等)後，即呼叫該流量計並下達流量計寫入流量("SW")指令，序列1耗時250ms(如圖B-A14(a))。其中圖像，即為將數值格式(Numeric)的流量值轉換成流量計可接受之字串編碼格式(String format)，即00000~10000的數位指令格式。

(序列1) 給定流量計等待時間：

需經過一段時間才能從系統電腦端將流量設定值下達給流量計，程式設定預設等待時間值為250ms，序列1程式設計如圖B-A14(b)所示。

(序列2) 讀取流量值：

對流量計下達讀取流量值("OR")指令，等待250ms後，讀取回傳之流量值，其讀取值為(00000~10000)字串編碼格式，該程式部分則針對該流量計的全流量規格將讀取值轉為實際流量值，並顯示於前置面板中。(如圖B-A14(c))。

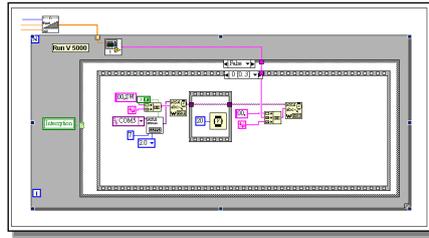
註：SIC流量計數位讀取值格式轉換，詳見附錄E 表E-3 流量值與數位指令格式、類比(輸入)控制電壓對照表。

(序列3) 執行讀取MFC流量值之後的等待時間：

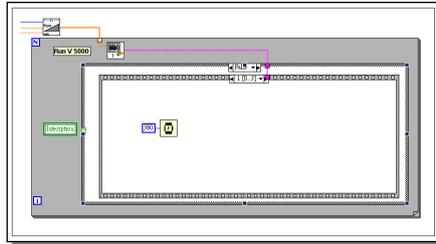
需經一段時間指令才能再對流量計下達指令，程式預設等待時間值為250ms (如圖B-A14(d))。

綜合上述4點，從對流量計寫入流量到讀取流量動作，總共耗時1秒。

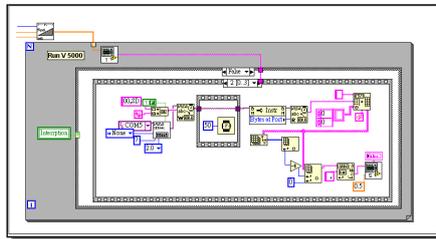
註：流量計Ramping指令中，流量計由寫入到讀取指令皆在For迴圈的程式架構裡，而該For迴圈並不需特別給定迴圈執行次數(N值)，理由為該執行次數已由"Ramping pattern"所給定，即流量設定等差級數中的數列個數(N_r)。



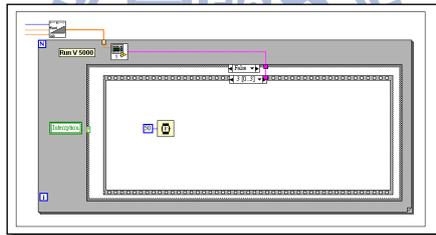
圖B-A14(a) 呼叫並給定MFC流量設定值



圖B-A14(b) 呼叫MFC完後執行等待時間

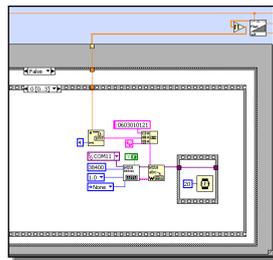


圖B-A14(c) 讀取MFC流量讀值

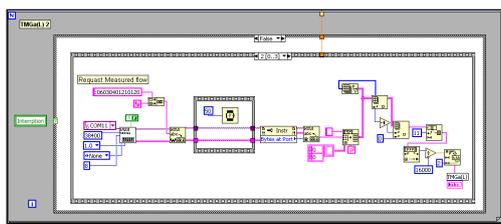


圖B-A14(d) 執行讀取MFC值之後的等待時間

圖B-A15及圖B-A16為Bronkhorst EL-Flow流量計對應Ramping("r")指令的流量設定及讀取程式，該程式也為堆疊序列架構，執行程序如同上述SIC流量計"r"指令中的序列0~3，讀值程式中For迴圈執行次數亦為 $N_r = T_n$ ，與SIC流量計的差異僅止於指令編碼及格式不同。



圖B-A15 Bronkhorst 流量計流量設定程式(Ramping)



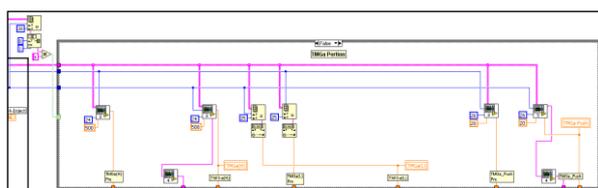
圖B-A16 Bronkhorst 流量計流量讀取程式(Ramping)

【TMGa High/Low流量計設定】

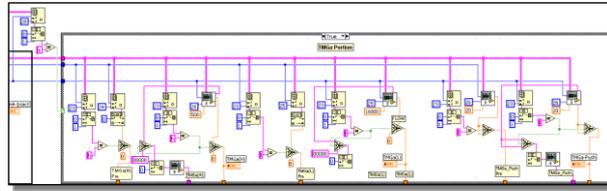
WK2008磊晶系統中由於TMGa有機金屬分子源管路需求，配置有2台大
小流量規格的流量計及PUSH流量計，各別為TMGa(H):20sccm, TMGa(L) :
2sccm, TMGa(PUSH) : 500sccm；所以在擷取菜單個別欄(Column)的數值
上較其他分子源指令多加了輸出指令判定邏輯；指令判定邏輯主要分為帶
或不帶MO分子源(Column 28, g/s指令)，即：

- 不帶Source(指令g)：大小流量計皆有其各自設定的流量，且皆為通入
載流氣體，TMGa(H)及TMGa(L)個別對應之氣動閥邏輯皆設定為開啟，
如圖B-A17(a)所示。
- 帶Source(指令s)：程式設計如圖B-A17(b)所示，根據菜單中第23欄
(Column 23)之h/l指令判定，如為"h"，將設定流量值寫入TMGa(H)流量
計中，且程式強制將流量零值寫入TMGa(L)流量計中(無論菜單中設定
TMGa(L)流量為何)；反之如指令判定為"l"，將設定流量值寫入TMGa(L)
流量計中，且程式強制將流量零值寫入TMGa(H)流量計中(無論菜單中
設定TMGa(H)流量為何)；除了上述流量計設定外，TMGa管路上氣動
閥(MO2L、MO2H)也配合h/l、s/g指令作出相對應的開關切換。

TMGa(MO2)管路上的氣動閥邏輯請參閱圖A-31 MO2 III族有機金屬分子
源(TMGa)端氣動閥控制邏輯設計。



圖B-A17(a) TMGa不帶Source流量計指令設定邏輯



圖B-A17(b) TMGa帶Source流量計指令設定邏輯

VIIA-2-5 【MO分子源氣體壓力控制器(Bronkhorst)設定】

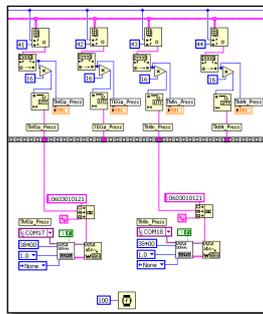
WK2008磊晶系統中，由於MO分子源狀態(固、液態)不同於V族分子(氣體)之特性，所以需在其管路末端架設上游端絕對壓力控制器，以利計算其氣態MO分子莫耳流率；在整個磊晶程序中，其壓力值固定(設定值為：1000mbar)，而在系統潔淨及安全模式下，將其壓力值切換設定為1200mbar。

註：為防範氣體倒流回III族管路中，原則上MO分子源管路壓力需大於反應腔體壓力。

【MO分子源壓力控制器程式】

【寫入壓力值】

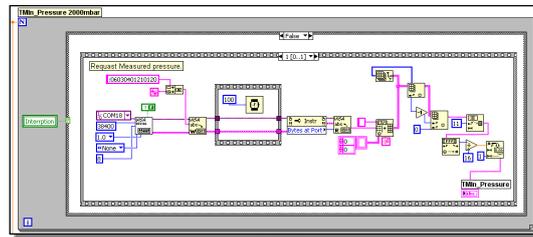
MO分子源壓力控制器程式在菜單字元控制區段中為獨立的堆疊序列(Stacked Sequence)區塊，共有2個序列，序列0程式部分如圖B-A18所示，包含擷取菜單指令及寫入硬體指令編碼；程式先將擷取至菜單中對應的壓力值轉換為數位編碼(00000~32000)，再將其指令編碼轉換為16進位(Hex)的字串(String)格式，寫入對應的壓力控制器中，程式預設耗時為0.1秒，相關的Bronkhorst指令編碼，請參閱附錄F F-4-1 寫入特定壓力值指令範例。



圖B-A18 MO分子源壓控器(Bronkhorst)菜單數值擷取及編碼部份

【讀取壓力值】

圖B-A19為序列1的程式設計，序列1內嵌入For迴圈，專做讀取MO分子源壓力控制器的壓力值動作，其中包含指令編碼轉換(16進位轉10進位，Hex→Dec)等運算，其讀取的壓力值亦顯示於前置面板，程式預設耗時0.1秒，等待0.4秒後再讀取下一次壓力值，故讀取程式總共耗時0.5秒；待For迴圈次數倒數完畢後即中止，並回至序列0等待寫入下一菜單步驟(列)所設定的MO分子源管路壓力值。



圖B-A19 讀取MO分子源壓力控制器(Bronkhorst)的絕對壓力值

註：寫入壓力值須耗時0.1秒，讀取壓力值也需耗時0.1秒，且程式預設等待0.4秒後再讀取其壓力值；故MO分子源壓力控制器之壓力讀取程式總共耗時0.5秒，讀值部分For迴圈執行次數 $N_{III} = \left\lfloor \frac{T_n - 0.1}{0.5} \right\rfloor$ 。

VIIA-2-6 【溫度控制器(Eurotherm 818P)溫控程式設計】

在溫控器的設定程式中，由於Eurotherm 818P硬體內部有獨立運作的時脈(Clock)，故在程式控制上只需將升/降溫速率(Ramping rate)、需求溫度(Temp. Level)，及其停留時間(Dwell time)等3項參數輸入即可，溫控器即由目前讀取的溫度以指定之升/降溫速率升/降至設定溫度；詳細Eurotherm 818P溫控器的硬體操作介紹請參閱第3章內容。

如同上述所列的硬體控制程式，溫控器設定程式也寫在主程式(正常工作區塊)中，菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→False)條件架構內；且系統中2台溫控器的溫控程式皆在同1個堆疊序列子程式。由於溫控器控制較為複雜，其中牽涉到PID演算控制參數設定，後續文章依菜單控制指令不同將內容區分為正常升/降溫控制(Normal temp. ramping)及需要輸入

PID演算參數的升/降溫控制(PID parameters assisted temp. ramping)2大類。

【正常升/降溫控制(Normal temp. ramping)】

正常升/降溫控制即為菜單控制指令不包含溫控器控制字元^註的溫度控制模式，意即菜單控制字元僅由"o"或"r"等單一流量計控制字元所構成。在該(o/r)控制指令模式下，使用者即要求溫控器在該列菜單所指定的時間(秒數)內，由菜單上一列的設定溫度升/降(Ramping)至該列菜單所設定的溫度值；而在該控制模式下，使用者並不需要給定溫度控制器相關的PID演算參數，而溫控器此時升/降溫控制程序的PID演算參數，即為先前手動調整時，硬體執行Self-tune所得的相關PID演算參數，其中包含Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等7項參數；由於這些參數已儲存於硬體中，故使用者無須再額外輸入，詳細的Eurotherm 818P溫控器PID自動演算控制請參閱附錄C C-3-1 Self-tune文章內容。

註：請參閱表B-2。

在正常升/降溫控制程序的溫控程式設計中，程式僅需要下列4項輸入控制參數：

1. 菜單中的步驟(列)編號(Step No.)，藉以判定是否為步驟1。
2. 菜單上一列所設定的溫度值，提供程式計算升/降溫速率(Ramp rate)參數。
3. 菜單該列的溫度設定值，提供程式計算升/降溫速率(Ramp rate)參數，及給定Eurotherm 818P的設定溫度值(Ramp level)。
4. 菜單該列的時間設定值(秒數)，提供程式計算Ramp Rate(°C/min)。

待升/降溫速率經由LabVIEW運算完畢後，溫控程式旋即將升/降溫速率、設定溫度、停留時間(Dwell time)等參數值依序寫入Eurotherm 818P硬體中，溫控程式設計細節說明如下文所述。

【寫入(Write)】

溫控參數寫入程式的設計架構為利用 *For* 迴圈特性，將升/降溫速率 (Ramp rate)，設定溫度 (Ramp level)，該溫度點的停留時間 (Dwell Time) 等參數依序 (One by one) 寫入溫控器硬體中。指令參數寫入的時間間格為 145ms，且指令格式皆為 16 進位 ASCII Code 編碼 (Hex. ASCII Code)，在每一個寫入指令的最後 1 位元即為指令邏輯判定字元 BCC (Block Check Character)，為之前硬體參數控制字元 (hex.) 的互斥或 (Exclusive Or, XOR) 邏輯判定，詳細的 Eurotherm 818P 指令寫法請參閱附錄 C C-5-5 寫入指令 章節。

此外溫控程式在將控溫參數寫入硬體之前，會先做菜單步驟 (列) 是否為步驟 1 的真偽布林判定；因為主程式在執行菜單中第 1 次步驟時 (Step=1)，溫控程式並無法獲得上一列的溫度設定值，所以程式並無法計算出該步驟的升/降溫速率參數；為因應這個問題，溫控程式在步驟 1 時，會先下達溫控器讀取目前的溫度，以作為升/降溫速率的參數運算條件，而後再執行寫入動作。綜合上述，溫控參數寫入程式共可分為 Step=1 及 Step≠1 等 2 種情況，詳細參數設定如下文分項敘述。

【Step=1 的寫入程式設定】

註：r1、l1、d1、r2、l2、d2 等參數為 Eurotherm 818P 硬體遠端通訊指令，詳細指令內容及設定意義，請參閱附錄 C C-5-7 Eurotherm 818P 指令碼內容及表 C-3 Eurotherm 818P "Pr" 參數設定。

r1 = Step1 的升/降溫速率，即以熱電偶目前讀取值作為起始溫度，步驟 1 的設定溫度為終端溫度，執行步驟 1 的升/降溫程序。

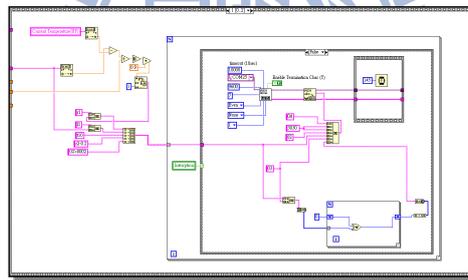
$$r1 \text{ 數值計算： } r1 = \frac{\text{Setting temp.} - \text{Thermocouple readout}}{\text{Step1 setting time}}$$

l1 = 本次 (Step1) 的菜單溫度設定值

d1 = 0 Sec (該溫度點停留時間設為 0)

r2= End

溫控程式為基本上為由布林真偽條件判定內嵌入堆疊序列(Stacked Sequence)的複合程式架構，經由外部布林判定該步驟為步驟1後，即執行在Step=1條件架構內的堆疊序列區塊。而該堆疊序列區塊共有3個子序列(Frame)所構成，序列0即讀取熱電偶電路的溫度值，序列1則專做控溫參數寫入動作，序列2則專作讀值動作，即讀取目前溫度、設定溫度，及RF加熱系統目前輸出功率等即時資訊；圖B-A20為溫控程式(Step=1)中的序列1程式內容，即為控溫參數寫入；r1、l1、d1、r2等參數利用For迴圈依序寫入溫控器中(每項參數寫入時間間隔為145ms)；此外由於r2設定為End，所以後續的l2、d2...等參數無須再給定。For迴圈內的小For迴圈即為運算指令判定字元(BCC)互斥或(XOR)邏輯輸出，而輸入指令的最後1項為Eurotherm控制指令字元(OS>0002)，即下達溫控器立即執行升/降溫程序。



圖B-A20 Step=1之控溫參數寫入程式(不含PID參數寫入)

除了第1次步驟(Step=1)外，升/降溫程序的初始值皆為上一列的溫度設定值，並在菜單該列所指定的時間(秒)(Column 1)內升/降至設定溫度點(l2)，在溫控器程式的硬體參數(Ramp1,r1)設定為Step(r1=step)，目的為避免溫控器程式從內部之SP1值(重置溫度點，Reset Temperature，SP1)開始升/降溫，且將"l1"設為菜單中上一列的溫度設定值旨為銜接上一步驟的溫度設定值；且在我們的測試中，些微提高升/降溫速率可完全避免溫控程式在菜單列與列的設定溫度銜接上發生升/降溫程序出錯；Step≠1溫控程式輸入硬體參數設定如下7項所列。

【Step≠1的程式設定】

r1=Step

l1=菜單中上一列的溫度設定值

d1=0 Sec(該溫度點停留時間設為0)

r2=菜單該列的升/降溫速率，其計算方式為菜單該列與上一列溫度設定值的相差絕對值除以菜單該列所設定時間(min)再加0.9，單位為($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)，該運算意即每分鐘多增加0.9 $^{\circ}\text{C}$ 的變化量，r2計算值：

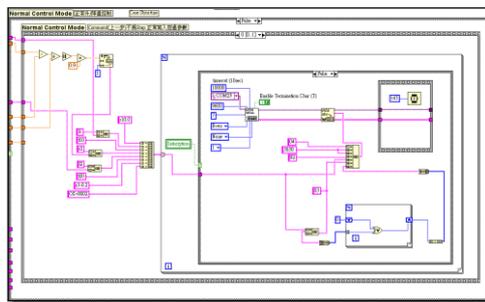
$$r2 = \frac{|Setting_N - Setting_{N-1}| + 0.9}{Step\ setting\ time}$$

l2=本次(列)的溫度設定值

d2=0 Sec(該溫度點停留時間設為0sec)

r3=End

Eurotherm 818P 溫控程式 Step≠1 的程式設計基本架構和 Step=1 的程式相同，皆為堆疊序列區塊所構成，由於起始溫度值即為菜單中上一列的設定值，無需讀取目前溫度，故程式序列僅有 2 個區塊；圖 B-A21 為溫控程式(Step≠1)中的序列 0 程式區塊，即專作硬體控溫參數寫入動作，在寫入指令上和(Step=1)程式只有升/降溫速率計算方式和指令次數不同，其餘如 BCC 驗證碼運算及指令間等待時間皆相同。



圖B-A21 Step≠1之控溫參數寫入程式(不含PID參數寫入)

【讀取(Read)】

Eurotherm 818P之讀取程式，即Step=1堆疊序列的子序列2(Frame 2)，和Step≠1堆疊序列的子序列1(Frame 1)皆由For迴圈內嵌入堆疊序列所構成，

For迴圈內共有3個序列區塊，序列0專責讀取溫度設定點(指令SP，如圖B-A22(a)所示)；序列1則讀取目前溫度(指令PV，如圖B-A22(b)所示)；及序列2則讀取RF加熱系統目前輸出功率(指令OP，如圖B-A22(c)所示)。這3項參數依序讀取，其程式指令間時間間隔為40ms，其數值經由RS-232通訊介面回傳至前置面板上TEMP. SET(°C)、TEMP. READ(°C)，及OUTPUT POWER(%)等顯示資訊項。

註：溫控讀值程式為For迴圈內嵌入堆疊序列架構，其For執行次數算法為菜單該列所設定的執行時間(T_n)減去寫入耗時(間隔145ms乘上指令個數)，再除以讀值程式指令間時間間隔40ms，並取下限正整數；以下為Step=1及Step≠1的For迴圈執行次數(N)算法：

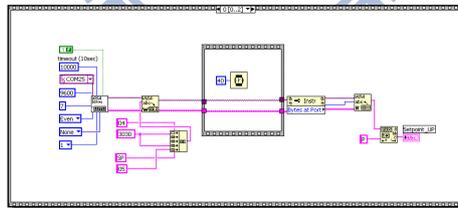
【Step=1】

$$N = \left\lfloor \frac{T_n - 0.145 \times 5}{0.04 \times 3} \right\rfloor$$

【Step≠1】

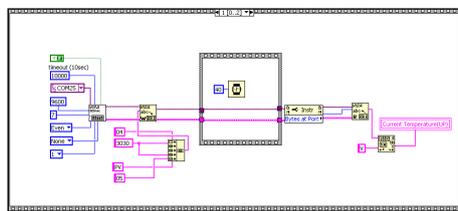
$$N = \left\lfloor \frac{T_n - 0.145 \times 8}{0.04 \times 3} \right\rfloor$$

【溫度設定值(SP)讀取程式】



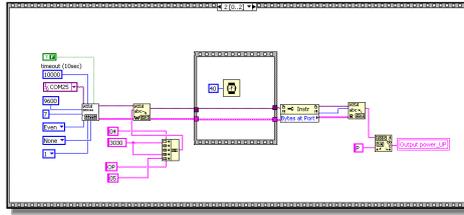
圖B-A22(a) 溫度設定值讀取程式

【目前溫度(PV)讀取程式】



圖B-A22(b) 目前溫度讀取程式

【RF加熱系統目前輸出功率(OP)讀取程式】

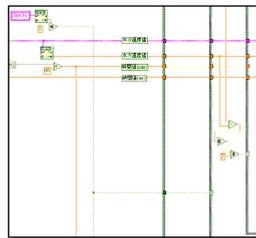


圖B-A22(c) RF加熱系統目前輸出功率讀取程式

【正常升/降溫控制(Normal temp. ramping)之程式架構】

WK2008系統控制程式的溫控程式部份，系統中上/下2台溫控器的溫控程式皆寫在同一個堆疊序列區塊，且個別獨立的條件判定架構中，而菜單控制指令則個別接至獨立的上/下溫控程式之條件判定式中。此外上/下2台溫控器的控制程式除RS-232通訊埠編號不同外，整體程式設計架構皆相同。

WK2008磊晶系統LabVIEW控制程式中的溫控程式主要由複合條件(Compound Case)架構所構成，最外部的條件布林(Boolean)判定該控制列步驟是否為1，內部的條件布林則為判定菜單相鄰步驟之間的設定溫度相差值是否大於 3°C ；當菜單控溫參數載入後，溫控程式會先判定該次步驟編號是否為1，再來則判定菜單相鄰步驟的設定溫度差值是否大於 3°C 。如果為步驟1(Step No.=1)則執行對應的參數寫入及讀取動作；如果Step No. \neq 1，則在執行對應的控溫參數設定前，會先驗證溫差值是否大於 3°C 的條件布林，如果溫差值大於 3°C ，則執行後續控溫參數的寫入及讀取動作，但若相差值小於 3°C ，則程式僅執行讀取動作，程式判定如圖B-A23所示。



圖B-A23 菜單相鄰的前後列間溫度設定值之溫差判定

下列2點簡單描述溫控程式中Step No.=1及Step No. \neq 1的程式設計概念。

1. Step No.=1的控溫程式初步(序列0)為先讀取目前熱電偶電路(Thermocouple)所測得之溫度值，利用區域變數方式(Local Variable)，

將其數值傳遞至溫度設定區段(序列1)中以供計算升/降溫速率(ramping rate)，同時將該升/降溫區段的溫度設定值，依序寫入溫控器中(間隔145ms)，程式設計如圖B-A20所示；在設定完相關的控溫參數後，系統持續讀取目前溫度，RF加熱系統目前輸出功率，及目前設定溫度等值(序列2)，其指令時間間隔為40ms，直到該次菜單步驟時間結束，即結束所有程式序列動作，程式狀態則回至前述複合條件架構的布林判定。

2. 在Step No.≠1的溫控程式中，若設定溫差值大於3°C的條件布林狀態為真，溫控程式則將參數逐一寫入硬體中，由於設定升/降溫程序的初始值皆為菜單上一列所設定的溫度值，在溫控器硬體指令參數(r1,Ramp1)設定為Step(r1=step，即以最快升/降溫速率到達設定點)，避免溫控器程式從內部預設的SP1值(Reset Temperature)開始升/降溫，造成程式的時脈錯亂；待程式參數設定(寫入)的序列區塊(序列0)結束後，程式旋即持續讀取目前溫度，設定溫度，RF加熱系統目前輸出功率等數值(序列1)，讀取程式如圖B-A22(a)~(c)所示；如果設定溫差值大於3°C的條件布林狀態為偽，則僅做上述參數讀取動作，且程式仍為For迴圈內嵌入堆疊序列所構成，For迴圈執行次數

$$N = \left\lfloor \frac{T_n}{0.04 \beta} \right\rfloor。$$

【需要輸入PID演算參數的升/降溫控制】

在附錄C C-3 Eurotherm 818P溫控器PID控制簡介及C-5-1 溫控器遠端電腦控制內容中提及，由於溫控器在不同工作溫度區間各別有其最佳的PID控制演算參數；而在某些特殊的製程溫度條件，如成長量子井結構中的覆蓋層(Barrier)時，為降低主動層的脫附(Desorption)效應，通常會要求以最快速率升溫；而為避免製程溫度產生過衝(Overshoot)、持續反覆震盪(Oscillation)等不穩定現象，使用者必須在實際成長前，預先模擬該製程條

件並利用手動方式執行硬體Self-tune PID演算，以獲得相關穩定溫度控制的PID演算參數；再利用RS-232序列通訊將這些PID演算控制參數依序寫入溫控器。

為配合特殊製程條件需求，在WK2008菜單編譯程式中，即設計了相對應的控制指令字元(Command Character)，而如同先前所提，控制指令為複合指令格式，指令字元"o/r"只與流量計設定模式有關；而若指令字元含有"s"(Step)，意即該步驟(列)要求最快速率升/降溫，設定方法為將溫控器的升/降溫速率(Ramping rate, Pr)設定為Step，詳細Eurotherm 818P溫控器之(Ramping rate, Pr)參數設定意義請參閱附錄C 表C-3 Eurotherm 818P "Pr"參數設定。WK2008磊晶菜單控制指令說明整理如表B-2所列。

注意：若菜單該列控制指令(Command, Column 0)中含有us/ds等字元，使用者需注意在菜單編寫下一步驟列控制指令時，需將正常升降溫程序的P/I/D值輸入菜單，以提供程式作覆寫動作。

【相關PID演算參數之菜單輸入細節說明】

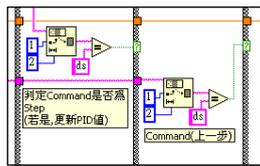
附錄C C-3-1 Self-tune內容中提到，Eurotherm 818P溫控器在手動執行完自動PID演算(Self-tune)後，硬體會自動更新Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等相關的PID演算參數並儲存於硬體中。故使用者在預先模擬特殊製程條件並利用手動方式執行溫控器Self-tune PID演算後，需將上述所列的7樣參數值記錄下來，以配合菜單控制指令利用系統程式將PID演算參數寫入溫控器中。若使用者選擇複合菜單控制指令，即ous、ods、rus、rds等^註4樣與溫控器控制相關的指令時，需在菜單中輸入先前手動Self-tune所獲得的Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等7項參數；而在複合菜單控制指令的下一菜單步驟中，若控制指令設定為"o/r"，則須在該列菜單中輸入正常升/降溫控制程序中所使用的PID演算參數，也就是將上述的Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等7項參數值覆寫，以避免產生溫度控制發生不穩定現象。使用者需較

為注意的是正常升/降溫程序中所使用的PID演算參數需詳加記錄於磊晶菜單中，而若有再次更新其PID值，磊晶菜單中的正常升/降溫程序之PID演算參數值亦需作同步更新。

註：ous/rus控制指令即要求上溫控器以最快速率(Step)作升/降溫動作，下溫控器則為一般正常升/降溫設定，該指令中上溫控器需要輸入相關PID演算參數；反之ods/rds控制指令即要求下溫控器以最快速率作升/降溫動作，該指令中下溫控器需要輸入相關PID演算參數，上溫控器為一般正常升/降溫設定。

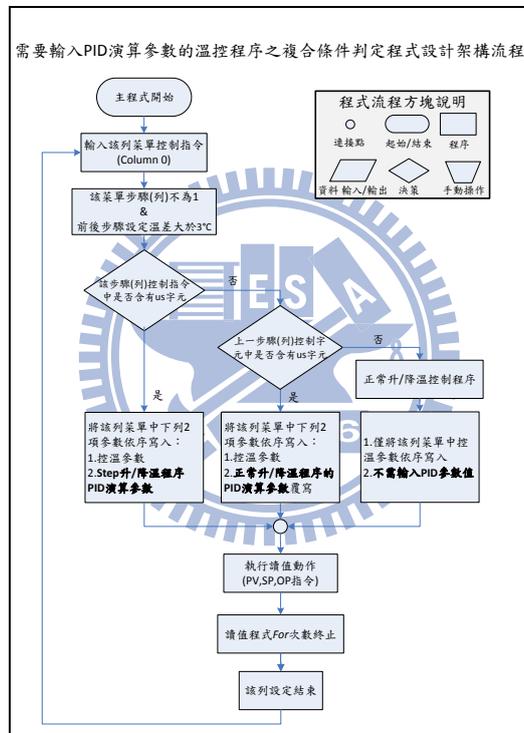
【需要輸入PID演算參數的溫控程式設計】

需要輸入PID演算參數的溫控程式與正常升/降溫程序的溫控程式設計架構大致相同，主要差異為寫入參數個數、指令設定不同，以及在參數寫入程式上多加了條件布林判定外，其他如寫入及讀取程式設計架構、時脈設定等皆與正常升/降溫程序的溫控程式相同。在需要輸入PID演算參數的溫控程式設計中，在執行參數寫入動作之前，會先做菜單控制字元判定，即判斷該步驟(列)所設定的控制指令中是否含有us/ds字元，如圖B-38所示。由於系統中有上/下2台溫控器，其判定字元各不相同；上(↑)溫控器程式部份判定是否有us字元(Upper,Step)，而下(↓)溫控器程式則判定是否有ds字元(Down,Step)。若控制指令字元符合，即該字元判定條件布林值為真，程式立即執行相對應的PID參數寫入動作；但若指令字元不符，即控制指令中未含有us/ds字元，意即一般正常升/降溫設定(指令o/r)，在相對應的偽布林值條件架構內會在作上一步驟(列)菜單控制字元是否含有us/ds字元的條件布林判定，如圖B-A24(Command上一步)所示，



圖B-A24 正常升/降溫程序中，判定上一步驟(列)指令是否含有us/ds字元目的為判定是否將PID值作覆寫動作；若上一步驟(列)控制字元中含有us/ds字元(該狀況為執行完Step升/降溫程序後，PID參數覆寫動作)，溫控程式即

會將該步驟(列)的PID控制參數(正常升/降溫控制之PID參數值)覆寫入溫控器中，但若上一步驟(列)控制字元中不含us/ds字元，意即執行正常升/降溫動作，該條件下該列菜單中不需設定PID值，程式亦不作PID參數寫入動作。圖B-A25即為需要輸入PID演算參數的溫控程式之複合條件判定程式設計架構流程，圖中舉上(↑)溫控器為例，判定字元為"us"。文章後續將敘述需要輸入PID演算參數的溫控程式設計細節，分為寫入及讀取動作。在寫入部分則分為控制指令字元含有us/ds及不含us/ds字元的個別程式設計，詳細內容詳見下文。



圖B-A25 需要輸入PID演算參數的溫控程式之複合條件判定程式設計架構

【寫入】

【控制指令含有us/ds字元】

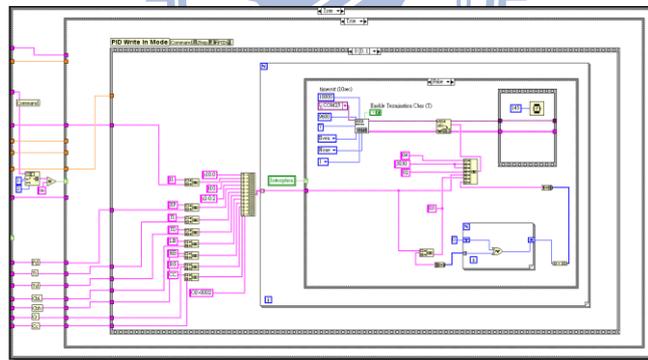
在控制指令(Column 0)含有us/ds字元的溫控參數寫入程式中，程式需要輸入的下列8項輸入控制參數：

1. 菜單該列的溫度設定值，提供溫控器I1指令的設定參數。
2. Step升/降溫程序所需的PID相關演算參數，即Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等7項參數值。

需要輸入PID演算參數的溫控參數寫入程式部份與正常升/降溫程序的溫控參數寫入程式設計架構相同，也是利用For迴圈特性，將上述所列的參數值依序(One by one)寫入溫控器硬體中。個別設定參數設定如下所列，程式設計如圖B-A26所示。

- r1= Step
- l1= 該步驟(列)的設定溫度值
- t1= 0秒
- r2= End
- 利用XP/TI/TD/LB/HB/RG/CC等指令，將該菜單步驟(列)中**Step升/降溫程序**的P/I/D/CbL/Cbh/Cr/Cc等參數值依序寫入溫控器。

將溫控指令參數(Ramp1,r1)設定為Step(r1=step)，且將l1設為菜單中該列的溫度設定值，r2設定為End，而後的輸入參數即為相對應的PID控制指令設定，相關指令使用者可參閱附錄C 表C-12 Eurotherm 818P通訊指令碼。



圖B-A26 控制指令含有us字元的上(↑)溫控器之控溫參數寫入程式(含PID參數寫入)

【控制指令不含us/ds字元】

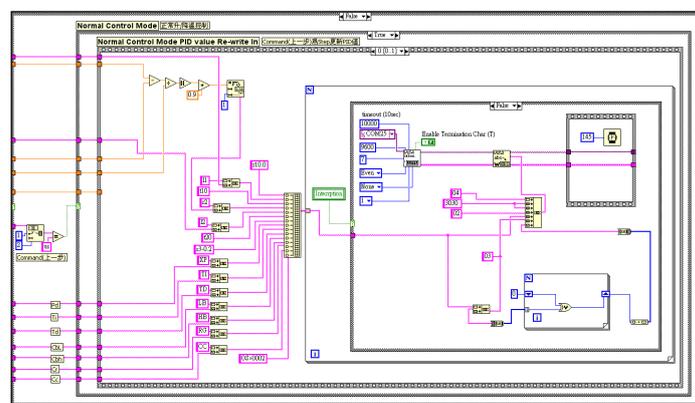
如上文中程式架構所述，在控制指令裡不含有us/ds字元的正常升/降溫程序之溫控參數寫入程式中，尚有上一步驟(列)控制指令中是否含有us/ds字元的條件布林判定；若上一步驟(列)控制指令中含有us/ds字元，則需將PID演算參數作覆寫，程式設計需要輸入下列10項控制參數：

1. 菜單上一列所設定的溫度值，提供程式計算升/降溫速率(Ramp rate)參數。

2. 菜單該列的溫度設定值，提供程式計算升/降溫速率(Ramp rate)參數，及給定Eurotherm 818P的設定溫度值(Ramp level)。
3. 菜單該列的時間設定值(秒數)，提供程式計算Ramp Rate($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。
3. 正常升/降溫程序所需的PID相關演算參數，即Pb、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc等7項參數值。

寫入程式架構也是利用For迴圈特性，將上述所列的參數值依序(One by one)寫入溫控器硬體中。個別設定參數設定如下所列，程式設計如圖B-A27所示：

- r1= Step
- l1=上一步驟(列)的設定溫度值
- t1= 0秒
- r2=菜單該列的升/降溫速率，其計算方式為菜單該列與上一列溫度設定值的相差絕對值除以菜單該列所設定時間(min)再加0.9，單位為($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。
- l2=該步驟(列)的設定溫度值
- t2=0秒
- r3=End
- 利用XP/TI/TD/LB/HB/RG/CC等指令，將該菜單步驟(列)中**正常升/降溫程序**的P/I/D/CbL/Cbh/Cr/Cc等參數值依序寫入溫控器。



圖B-A27 控制指令不含us字元的上(↑)溫控器之控溫參數寫入程式(含PID參數覆寫)

【讀取】

如圖B-A25所示，在需要輸入PID演算參數的溫控程式之複合條件判定程式設計架構中，待寫入程式執行完畢後，即作目前溫度、設定溫度、RF加熱系統目前輸出功率3項參數讀取動作等；程式設計如同圖B-A22(a)~(c)所示，不再贅述。

註：溫控讀值程式為For迴圈內嵌入堆疊序列架構，其For執行次數算法為菜單該列所設定的執行時間(T_n)減去寫入耗時(間隔145ms乘以指令數)，再除以讀值程式指令間時間間隔40ms，並取下限正整數；以下為控制指令含有us/ds字元及該列控制指令不含us/ds字元，但上一步驟(列)控制指令含有us/ds字元等條件下的For迴圈執行次數(N)算法， T_n 為該列步驟所設定的秒數：

【控制指令含有us/ds字元】

$$N = \left\lfloor \frac{T_n - 0.145 \times 12}{0.04 \times 3} \right\rfloor$$

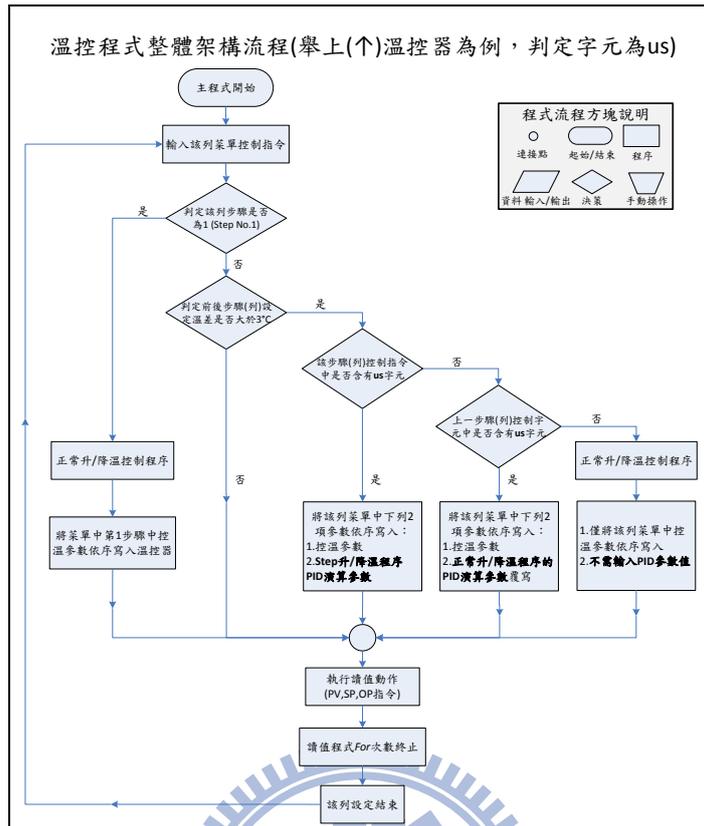
【該列控制指令不含us/ds字元，但上一步驟(列)控制指令含有us/ds字元】

$$N = \left\lfloor \frac{T_n - 0.145 \times 15}{0.04 \times 3} \right\rfloor$$

【溫控程式整體設計架構流程】

圖B-A28為系統控制程式中整體溫控程式設計架構流程，圖中僅舉上(↑)溫控器為例，即判定菜單控制指令中是否含有"us"字元。如同前文所述，系統中上/下2台溫控器的溫控程式設計架構皆相同，差異僅止於判定字元不同(us/ds)。無論字元判定為何，程式設計邏輯皆為寫入參數後即作讀取動作。





圖B-A28 溫控程式整體架構(舉上(↑)溫控器為例，判定字元為us)

VIIA-2-7 【腔體壓力控制器(MKS 651C)設定】

腔體壓力控制的程式運作程序，可分為寫入MKS 651C控制器壓力數值、讀取目前反應腔體壓力數值、讀取節流閥(Throttle Valve)目前開口度，及節流閥開關控制等項，細節如下陳述。

【寫入壓力值】

寫入目前菜單步驟(列)中所設定的腔體壓力值，由於MKS 651C控制器設定為壓力控制(Pressure control)，故程式只需將需求壓力值寫入壓力控制器的特定設定點中，而程式預設值為設定點B(Set point B)。

如同前文所述，腔體壓力設定程式也寫在主程式(正常工作區塊)，菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→False)條件架構內；且MKS壓力控制程式亦為堆疊序列結構，共分為3個序列區塊，序列功能依序為：

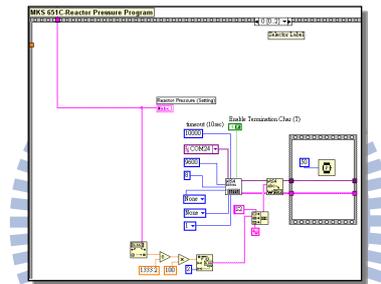
序列0：寫入壓力值至指定設定點B。

序列1：指定控制器到達設定點B中的壓力設定值。

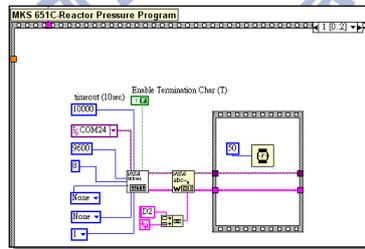
序列2:讀取目前壓力值與節流閥開口度,並做腔體壓力在單位時間(1sec)內增值是否大於50mbar(Reactor press. Increment $\Delta P \geq 50\text{mbar/s}$)狀態判定。

壓力控制程式起始(序列0)為先將菜單中該列的腔體壓力設定值(菜單中第2欄, Column 2)寫入MKS硬體設定點B(Set point B)^註中,程式設計如圖B-A29所示;序列1為指定MKS 651C壓力控制器控制點為Set point B,程式設計如圖B-A30所示,序列0及序列1程式設定等待時間各為50ms,故完成寫入壓力總共需耗時100ms。

註: MKS 控制器提供 5 組數位設定點(Set point A~E), WK2008 腔體壓力控制則是利用設定點 B(Set point B), 且壓力值輸入方式請參照附錄 D D-4-1 小節。



圖B-A29 腔體壓力控制程式(序列0:將該列壓力數值寫入設定點B)



圖B-A30 腔體壓力控制程式(序列1:指定設定點B)

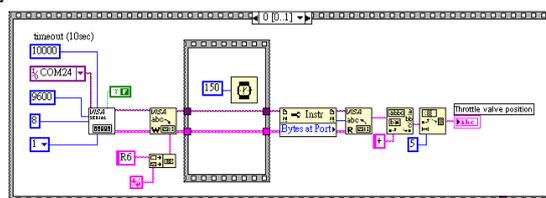
【讀取壓力值/節流閥開口度】

序列2主要為讀取目前腔體壓力值及節流閥開口度,壓力控制程式經由RS-232通訊指令將讀取的壓力值及節流閥開口度個別顯示於前置面板上的Reactor Press.(mbar)/Valve pos.(%)方框內,程式設計如圖B-A33所示。讀取程式(堆疊序列2)為擁有資料位移暫存(Shift register)功能的For迴圈內嵌入堆疊序列架構,該堆疊序列共有2個子序列,序列0為讀取節流閥開口度,序列1則為讀取目前壓力值,個別子序列區段預設執行時間為150ms^註,For

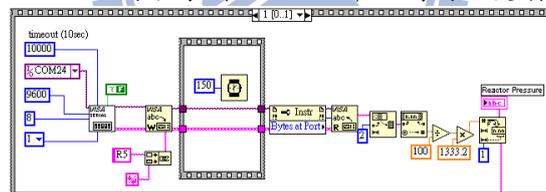
迴圈內堆疊序列0和序列1程式設計如圖B-A31、B-A32所示，詳細的MKS硬體指令請參閱附錄D D-4 MKS 651壓力控制器RS-232序列通訊。For迴圈將持續執行到菜單該列所設時間倒數結束後中止，待終止後，For迴圈所在的堆疊序列2即執行結束，壓力控制程式序列區段則跳回至序列0等待寫入下一列菜單壓力值，並重複執行上述寫入(序列0)、指定設定點(序列1)、和讀取(序列2)流程。在For迴圈內尚嵌入腔體壓力在單位時間內增值是否大於50mbar的狀態判定，詳細設計請參閱下文內容。

註：MKS壓力讀值程式中，For迴圈的執行次數(N_p)算法為菜單該列所設定的時間減去寫入程式區塊的總耗時(0.1秒)再除以讀取區塊預設耗時(0.3秒)。

$$N_p = \left\lfloor \frac{T_n - 0.05 \times 2}{0.3} \right\rfloor$$



圖B-A31 For迴圈中序列0：MKS節流閥開口度讀取程式



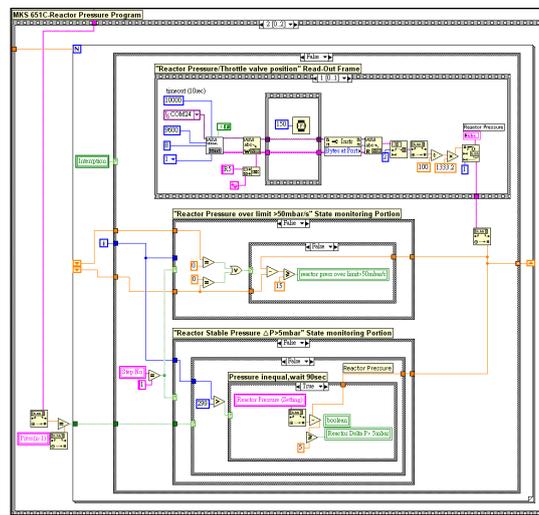
圖B-A32 For迴圈中序列1：腔體壓力值讀取程式

【Reactor press. Increment ≥ 50 mbar/s狀態偵測】

發生腔體壓力在單位時間內增值大於50mbar狀態，可能的原因為腔體內部發生大量外部氣體洩漏，石英內襯層(Quartz liner)破裂、手套箱內氣體經由腔體載台不銹鋼連結處洩漏等皆有可能造成腔體內部壓力迅速上升，所以程式需持續偵測該狀態；如該狀態發生，為避免大量氣體持續回流至腔體及保護真空泵浦，須立即關閉泵浦及中斷磊晶程序。

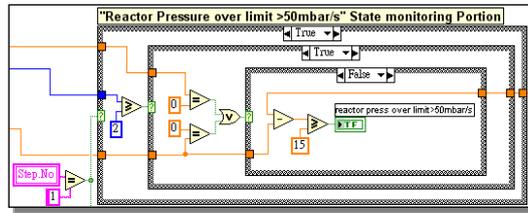
腔體壓力在單位時間內增值是否大於50mbar的狀態偵測亦寫在For迴圈架構內，其設計概念為利用For迴圈中位移暫存器(Shift Register)功能，壓力讀值(n)經由上方For迴圈中序列1輸出，並將該壓力數值(n)暫存於圖

B-A33中右邊橙色暫存器(▲)和左邊最上方的橙色暫存器(▼)內；若壓力數值(n+1)經該序列1再次更新，相同地，數值(n+1)也存放於右邊暫存器(▲)與左邊最上方的暫存器(▼)內；而上次壓力數值(n)則往下傳至左邊最下方的暫存器(▼)內，暫存程序重覆執行至For迴圈次數(N_p)終止。而壓力增值判定方法即為測定壓力數值(n+1)與壓力數值(n)相差值($P_{(n+1)}-P_{(n)}$)是否大於15mbar，由於連續壓力數值之間穿插了節流閥開口度讀取(耗時150ms)，故相鄰壓力數值擷取時間差為0.3秒，所以50mbar/s折換算成15mbar/0.3sec，即為判定相鄰壓力差(300ms內)是否大於15mbar，若該布林狀態為真，安全模式立即觸發，程式設計如圖B-A33中間布林判定所示。

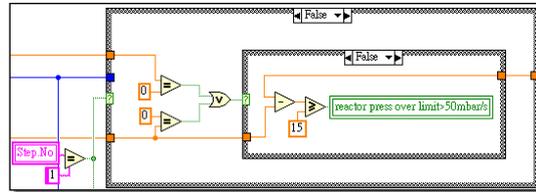


圖B-A33 腔體壓力控制程式(序列2)設計

連帶一提，由於程式初步執行第1列(Step No.=1)菜單中設定(For迴圈執行次數 $i < 2$)時，左邊最下方暫存器(▼)中壓力數值為0(尚未更新)，所以當右方暫存器(▲)壓力數值更新後，該狀態會發生錯誤觸發，故狀態判定程式最外圍先行判定該列菜單步驟是否為1，若是，待For迴圈執行次數 $i \geq 2$ 後(共耗時 0.3×2 秒)，腔體壓力在單位時間內增值大於50mbar狀態才開始作判定；若 $i < 2$ ，則不作該狀態判定，如圖B-A34所示，圖B-A35為Step No. $\neq 1$ 的Reactor press. Increment ≥ 50 mbar/s狀態偵測程式設計。



圖B-A34 Reactor press. Increment $\geq 50\text{mbar/s}$ 狀態偵測程式 (Step No.=1, $i \geq 2$)



圖B-A35 Reactor press. Increment $\geq 50\text{mbar/s}$ 狀態偵測程式 (Step No. $\neq 1$)

VIIA-2-8 【主程式(菜單字元控制區段)中其他顯示項】

除了上述硬體控制項外，主程式(菜單字元控制區段)中尚包含了菜單狀態顯示設計，如下文詳述。

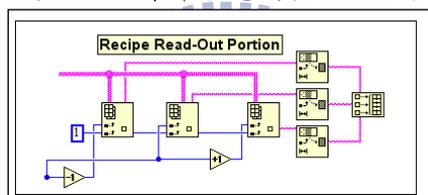
【菜單(Recipe)狀態顯示】

磊晶程式將菜單相關設定集中顯示於前置面板上，使用者可方便瞭解目前磊晶系統中的各項硬體設定，圖B-A36為菜單步驟狀態前置顯示面板，菜單步驟顯示分為上一步、該次步驟(紅框內資訊)、下一步的相關菜單設定，在此只顯示出易於變化的設定參數，如流量計設定、溫度設定、腔體壓力設定、載流氣體切換、步驟指令及執行時間等；其中帶或不帶分子源(Source,含有指令字元"s")則由紅色布林顯示燈號代表，紅色燈號顯示亦即開啟該分子源，其中不常更動之參數，如MO分子源管路末端壓力，則不顯示對應的菜單設定，但使用者仍可由前置面板上壓力控制器讀值部分獲得該項資訊；此外除了菜單資訊顯示幕提供設定資訊外，個別硬體讀值視窗旁亦有該列菜單設定值顯示(黑底白字)，如流量設定、壓力、溫度設定等，如圖B-1下方所示；圖B-A37為程式設計，在圖中較粗的桃紅色訊號線即為已經過排序的(.txt)菜單陣列資料，透過藍色訊號線(即為While loop iteration)就可判定目前該抓取菜單中哪一個列位(Row index No.)，而藍色框內數值則為根據菜單上硬體編號所指定的特定欄位(Column index No.)^註，

且藍色訊號線與目前菜單列位輸入值(Row index)訊號同步，如此抓取程式便可獲得目前該抓取菜單陣列中的哪一欄位，哪一系列位內的字元資訊，該程式將菜單陣列內相對應數值(特定欄位)取出，並依上一步(上1列)、該步驟(列)、下一步(下1列)菜單資訊置於前置顯示面板的3×1陣列中。相同地，該取值部分仍為嵌在主程式(正常工作區塊)，菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→False)條件架構內。

註：在菜單編排上，每1欄位(Column)個別代表特定1種硬體設定，該硬體的數值變化則由列位(Row)來控制輸入，而列位編號即代表菜單執行步驟。

圖B-A36 菜單狀態前置顯示面板



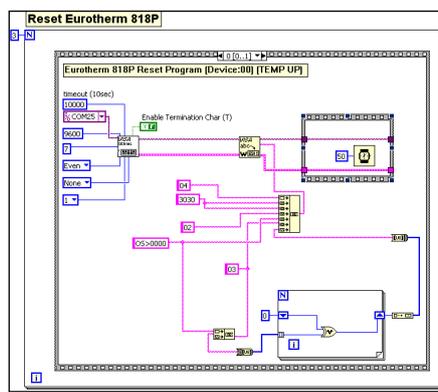
圖B-A37 菜單設定狀態之程式讀取輸出

VIIA-3 【安全模式程式部分節錄】

如圖B-20中左方所列的系統緊急狀態和程序停止狀態等判定布林值為真時，程式旋即載入安全模式中。安全模式的程式設計亦為利用堆疊序列架構，在Frame 0中先對相關硬體做數值寫入動作，個別硬體所對應的寫入數值請參閱B-7-2【系統安全模式狀態下的硬體設定】內容中的9大項設定。待所有數值寫入完畢後，在Frame 1中即利用While迴圈持續做讀取的動作，程式架構如B-7-3內容介紹。本附錄主要描述溫控器在安全模式中子序列0(Frame 0)所使用的特殊指令，以及節流閥動態控制程式設計介紹，節流閥動態控制邏輯如B-7-2節註2內容所述。

VIIA-3-1 【溫控器重置(Reset)指令】

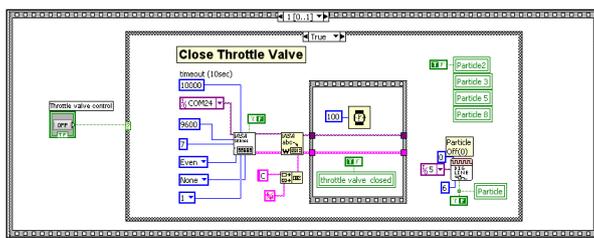
Eurotherm 818P溫度控制器中，OS指令提供重置(Reset)、開始(Start)、及暫停程式(Hold)等3項功能，OS指令碼功能及寫法請參閱附錄C C-5-9小節，此時指令設定為重置溫控器(OS>0000)，圖B-A38為其程式設計擷圖。



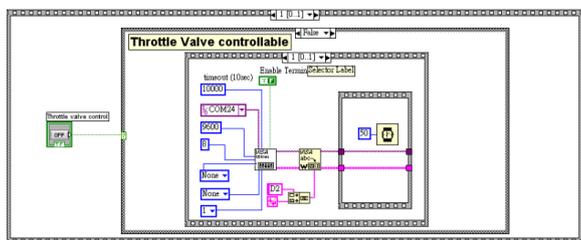
圖B-A38 溫控器重置(Reset)程式

VIIA-3-2 【節流閥(Throttle valve)動態控制】

在B-7-2【系統安全模式狀態之硬體設定】的註2中有詳細介紹前置面板上的"Throttle valve control button"按鍵功能，圖B-A39(a)~(b)為其動態程式之實現，該程式為寫在安全模式程式的Frame 1架構內。其程式設計概念亦利用堆疊序列架構，由於安全模式程式的Frame 1為While迴圈所構成，所以寫在該迴圈內的堆疊序列架構會反覆執行，故可達到動態控制。而節流閥控制程式(安全模式下)主要為堆疊序列架構，其中Frame 0為讀取腔體壓力值和節流閥開口度，Frame 1為"Throttle valve control button"布林所控制的條件架構；圖B-A39(a)~(b)即為該堆疊序列架構的Frame 1示意，當使用者按下前置面板上"Throttle valve control button"按鍵時，該布林值為真，程式旋即下達MKS 651C關閉節流閥指令(如圖B-A39(a))，前置面板節流閥控制按鍵出現"Close"字樣。此外若再次按下該按鍵，布林值為偽，程式即下達MKS 651C壓力控制器回到控制點B(即先前所設定的800mbar)，程式設計如圖B-A39(b)所示，此時前置面板上節流閥控制按鍵即出現"Controllable"字樣。



圖B-A39(a) WK2008系統處於安全模式下的節流閥控制按鍵程式設計(閥關閉)



圖B-A39(b) WK2008系統處於安全模式下的節流閥控制按鍵程式設計(閥受控)

VIIA-4 【其他程式設計】

附錄VIIA-4所描述的程式部分皆不在主程式迴圈(正常工作區塊或安全模式)架構裡，為獨立的程式架構，主要分為系統異常狀態偵測程式、UPS硬體狀態偵測程式、真空泵浦動態開關控制、系統硬體輸出值監控記錄檔等；這些程式部分皆由*While*迴圈所構成，也由於獨立迴圈設計，故可在整體程式運行時，執行各項異常狀態偵測及動態控制等，不受任何控制項中斷。

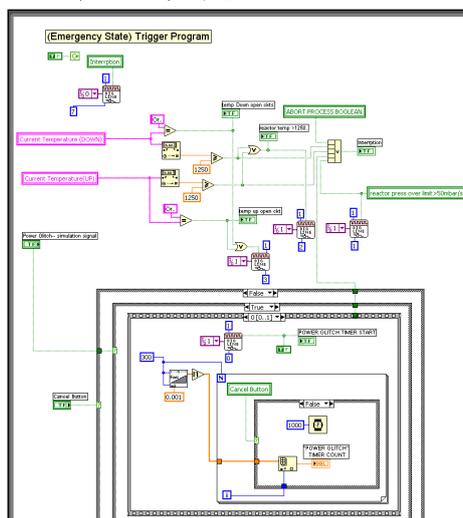
VIIA-4-1 【系統異常狀態偵測程式】

系統異常狀態偵測程式為不寫在主程式^註中的獨立區塊，其程式大架構如同主程式，且皆由*While*迴圈構成，無論系統主程式執行至什麼狀態、何種步驟，系統異常狀態偵測程式皆不中斷地持續執行偵測，其機能類似自主神經。

而系統異常狀態偵測可分為腔體壓力偵測、溫度偏差偵測、熱電偶電路(Thermocouple)開路偵測、流量計流量偏差(>1%F.S.)偵測、系統110VAC供電狀況偵測、氣動閥N₂供氣源壓力是否過低偵測(<4bar)、樣品是否達到取出(Unload)狀態偵測，及使用者是否強制中斷主程式之偵測、斷電狀態倒數計時器*For*迴圈等，這些數值部分則利用區域變數技巧，將主程式迴圈

裡的讀值傳遞至異常狀態偵測迴圈裡的個別判定式中。當相對應的緊急狀況觸發(Boolean→True)時，中斷旗標布林狀態即轉為真(Interruption boolean flag: True)，再利用區域變數概念，即可將其中斷旗標布林當下狀態(Interruption flag in-situ Boolean value)傳至主程式迴圈中，以提供主程式與安全模式程式的主控權轉移判斷用。由於偵測程式內容較為龐大，圖B-A40僅顯示部分系統異常狀態偵測程式結構。

註：主程式由While迴圈所構成，迴圈架構內包含正常工作區塊與安全模式等2大控制項，其中正常供作區塊與安全模式程式之間即透過中斷旗標布林真偽值來作主控權轉移控制，詳見B-5-3小節；而系統異常狀態偵測迴圈即透過特定狀態偵測判定是否觸發該中斷旗標布林值。



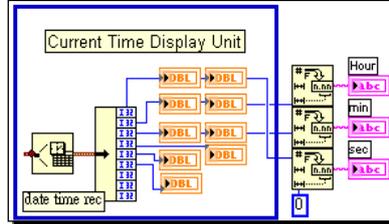
圖B-A40 部分系統異常狀態偵測程式結構

系統異常狀態偵測程式中，除了狀態偵測外，程式也將其狀態(Logic 0/1 輸出訊號)透過PCI-1739U數位I/O埠控制卡傳遞至相對應LED顯示盤面上，詳細電路設計及狀態對應請參閱A-7 系統異常狀態偵測的LED電路接法，和表A-16 PCI-1739U(Device01)數位輸出/輸入埠功能對應表。

【系統目前時間顯示】

系統異常狀態偵測迴圈中尚包含了系統目前時間讀取程式區塊，程式設計如圖B-A41所示。目前時間讀取程式為利用LabVIEW平台中(date time rec icon)圖示，以抓取Windows 2000作業系統時間，並可同時顯示年/月/日/時/

分/秒等時間資訊；藉由While迴圈持續執行特性，(date time rec icon)即可連續地抓取系統時間值，並於前置面板上Current Date/Time顯示項中顯示，如圖B-1所示。

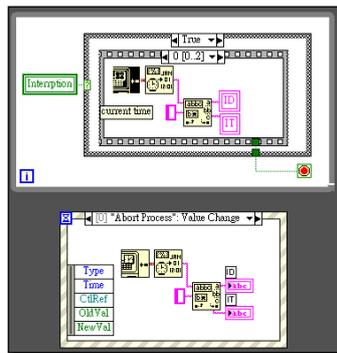


圖B-A41 LabVIEW控制程式系統目前時間讀取

【中斷觸發時間抓取(Fetch Interruption trigger time)】

所謂中斷觸發時間抓取，主要為方便使用者紀錄程式中斷時間，而中斷時間意指正常工作區塊中斷，安全模式觸發(中斷旗標布林值為真，程式主控權轉移, Interruption flag boolean \rightarrow True)的即時時間(In-situ time)；無論是系統緊急狀況觸發或為使用者強制中斷(Abort Process)，程式將立即抓取當下系統時間並於前置面板上顯示相關時間資訊(日期/時間)，如圖B-1所示。

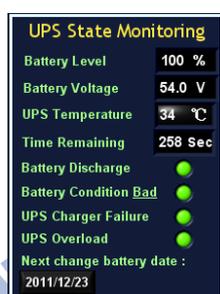
相關程式設計如圖B-A42所示，主要為當相關緊急狀態布林判定為真或強制中斷觸發時，利用LabVIEW中(Current time)圖示抓取系統時間資訊，圖B-A42中其上為中斷布林判定迴圈架構(Stacked sequence embedded in While loop)，其下為利用LabVIEW中事件架構(Event structure)來做強制中斷(Abort Porcess)的布林判定；若"Abort Porcess"事件觸發時(布林值改變)，即利用(Current time)圖示來做抓取時間值/顯示動作。該中斷觸發時間抓取為獨立於主程式、系統異常偵測程式等的獨立迴圈架構。



圖B-A42 中斷觸發時間抓取程式

VIIA-4-2 【UPS 硬體狀態偵測程式】

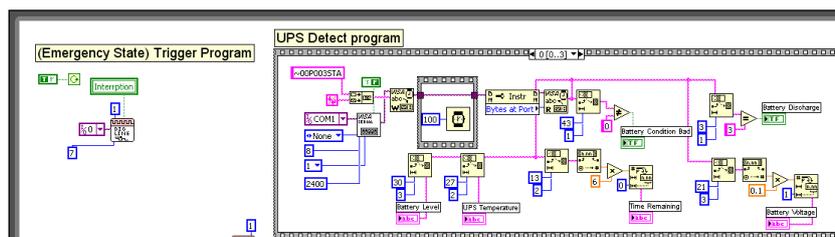
WK2008控制系統中配置1台110VAC不斷電電源供應器(Delta UPS)，系統程式會持續偵測該UPS電池電量百分率、電池電壓(額定為54V)、UPS溫度(低於40°C正常)、UPS電池放電的供電時間(約4分鐘)、電池是否處於放電狀態、電池狀態是否異常、UPS回充電器是否異常、UPS是否過載、下次更換電池時間(一般電池壽命約2年)等。上述UPS資訊呈現於控制程式前置面板，如圖B-A43所示。



圖B-A43 UPS狀態偵測前置面板設計

【UPS硬體狀態偵測及斷電倒數計時程式】

UPS硬體狀態偵測程式寫於系統異常狀態偵測While迴圈結構中，主要為判斷相關字元是否符合特定狀態；相關指令請參閱附錄G G-A，此外UPS狀態偵測每隔0.5秒執行一次。

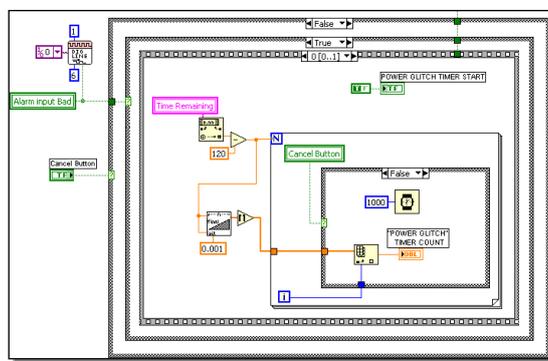


圖B-A44 UPS硬體狀態偵測

【斷電倒數計時程式】

台達電子的UPS(型號：GES202R)有提供評估電池放電時間(Estimated Minutes Remaining)的功能，故在LabVIEW控制程式中斷電倒數程式的初始倒數時間值即是抓取該值；而一般電池處於滿載狀態時，約可提供約260秒的供電時間。而斷電倒數計時程式是由條件布林結構所構成，觸發布林訊號是由UPS硬體狀態偵測中的"Alarm input Bad"狀態判定所提供，當市電

斷電經由UPS判定為真時，倒數計時即開始，倒數時間值為UPS所提供的供電時間秒數減去120秒，目的為預留2分鐘，使系統切換至安全模式並作腔體保壓；且為避免單純的市電短暫跳電，倒數程式中亦設計了重置倒數計時器按鍵('Power Glitch' Timer Reset Button)，使用者可自行決定是否中止程式倒數；如僅為單純短暫跳電，僅需在前置面板左上方的"Program control button"(圖B-1)中按下該按鍵即可清除計時器，但如果倒數計時完畢(Without resetting Timer)，控制系統將強制切換至安全模式狀態，圖B-A45即為斷電倒數計時程式設計。

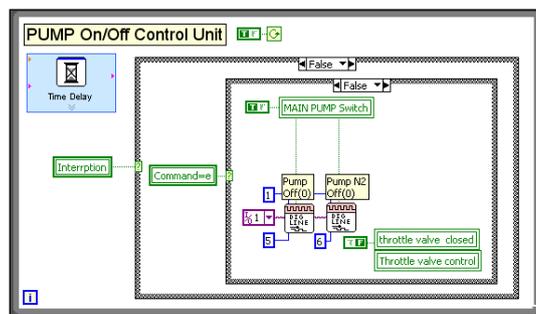


圖B-A45 斷電倒數計時程式設計

VIIA-4-3 【真空泵浦(Vacuum Pump)開關控制程式】

真空泵浦開關控制之程式設計，由於系統潔淨狀態及安全模式的泵浦動態控制考量，其程式設計如同系統異常狀態偵測程式，也為不嵌在系統控制程式的獨立執行區塊(While迴圈)，程式設計如圖B-A46所示，在此不再贅述其設計內容。

真空泵浦開關動態控制邏輯則誠如表B-A1所列。



圖B-A46 真空泵浦開關動態控制程式

WK2008磊晶系統真空泵浦(Mechanical Pump)開關邏輯	
系統狀態	真空泵浦開關
主程式菜單指令字元控制 (Command≠e, 成長樣品)	ON(Program locked) (使用者無法任意切換開啟狀態)
系統潔淨(purge)狀態 (菜單執行至"e"指令)	ON(default) (使用者可自由切換其開關狀態)
系統安全模式狀態 [$\Delta P > 50 \text{ mbar/s}$ 狀態]之布林判定為偽 (中斷旗標為真)	ON(default) (使用者仍可自由切換其開關狀態)
系統安全模式狀態 [$\Delta P > 50 \text{ mbar/s}$ 狀態]之布林判定為真 (中斷旗標為真)	OFF(default) (使用者仍可自由切換其開關狀態)
系統在潔淨狀態下，安全模式觸發 (中斷旗標為真)	OFF(default) (使用者仍可自由切換其開關狀態)

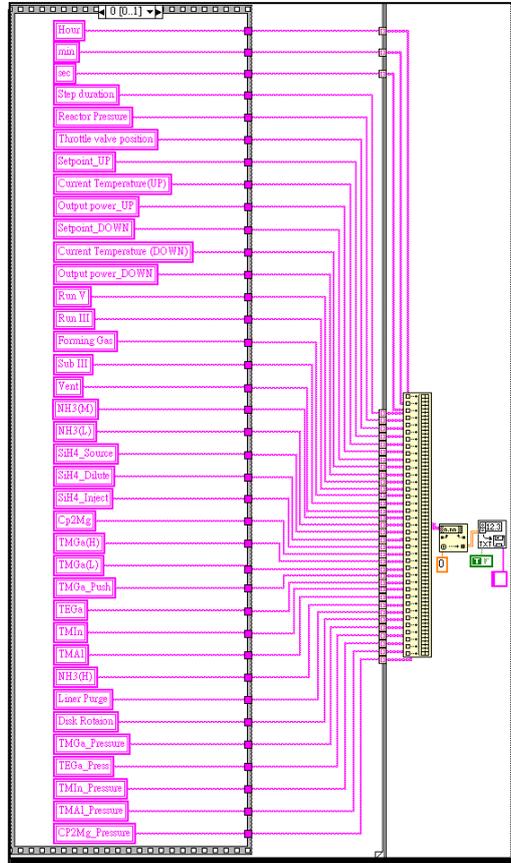
表B-A1 不同狀態下，真空泵浦開關動態控制邏輯

VIIA-4-4 【WK2008系統硬體輸出值監控記錄檔】

為方便使用者完整監控整段成長程序中系統各式硬體輸出狀態，在控制程式中設計了硬體狀態監控紀錄輸出，待正常工作區塊結束載入系統潔淨程式設定後，程式會將整段成長程序的所有硬體讀取值紀錄下來並輸出至特定的(.txt)格式文字檔，提供使用者檢閱。

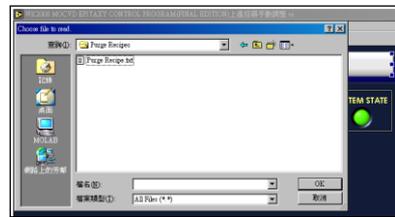
硬體輸出值監控紀錄程式設計為獨立於主程式的While迴圈架構，並利用區域變數概念，將主程式中各式硬體的讀取值暫存，其硬體讀取值記錄時間間隔為0.5秒；當主程式中菜單控制部分程式結束後，在磊晶程序中的所有硬體讀取值紀錄將輸出於使用者指定的檔案中，其預設檔案格式為以Tab分行的(.txt)格式文字檔，預設儲存路徑為D:\Epitaxy Document\WK2008系統硬體監測紀錄檔\WK2008 System Hardware monitoring data；原則上紀錄檔中讀取值的排列方式和磊晶菜單(Epitaxy recipe)的編排方式(請參閱B-4 菜單編譯程式)相同，即每一欄位代表特定一項硬體，而每一列位則為該硬體每隔0.5秒的輸出值，為方便使用者瞭解紀錄檔數值紀錄時間，前3欄為時間記錄值，第1欄位為小時、第2欄位為分、第3欄位為秒；而第4欄

位為菜單該列步驟執行秒數、第5欄位為反應腔體壓力、第6欄位為節流閥開口度...等，詳細排序如圖B-A47中由上而下所示，輸出紀錄檔中的第9、12列個別為上、下RF輸出功率(%)。



圖B-A47 WK2008磊晶系統硬體讀取值監控紀錄輸出檔程式迴圈

註：磊晶程式一開始執行時會出現選取載入之菜單畫面(Choose file to read)，如圖B-A48所示；之後隨即出現選取寫入硬體紀錄檔案畫面(Choose file to write)，如圖B-A49所示，使用者需注意其出現順序，以避免輸入格式錯誤之檔案。



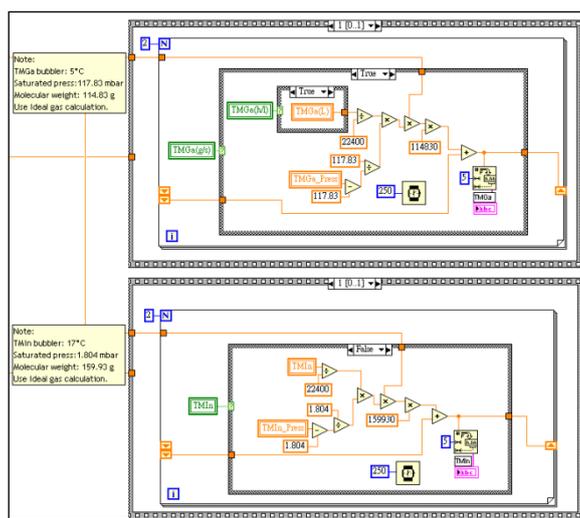
圖B-A48 選取載入菜單檔案畫面



圖B-A49 選取寫入紀錄檔案畫面

VIIA-4-5 【MO分子源消耗量(mg)計算】

為方便使用者詳細評估有機金屬分子源消耗量(MO Source Consumption)，WK2008 MOCVD 系統LabVIEW控制程式中設計有每次(Every epitaxy run)有機金屬分子源(MO分子)消耗量(重量)計算，MO分子每分鐘消耗莫耳流率計算如附錄E 式E-1所示，相關飽和蒸汽壓計算如附錄G G-C內容^註。程式主要設計概念為若菜單中開啟MO分子控制字元為"s"時，即將該列相關流量設定值、壓力設定值、菜單步驟列執行時間等參數匯入運算式中，並計算出該步驟列的MO分子消耗重量(mg)，待該步驟列執行結束時，將該步驟列MO分子消耗量(毫克, mg)顯示於前置面板上，如圖B-1所示；而若往後步驟列開啟MO分子控制字元又為"s"時，則透過相同運算模式將該步驟列消耗量計算出並與上一計算值做累加動作，並同步更新於前置面板上；如此使用者便可在整個長晶程序結束後，得知MO分子估算消耗量並記錄於手冊中，以便於評估何時需更換MO分子源。程式設計誠如圖B-A50所示，為嵌在主程式中菜單控制字元不為"e"的偽布林值(Boolean→False)條件架構內，主要程式架構為堆疊序列內嵌入含有位移暫存器(Shift register)的For迴圈，圖B-A50即為相關數值運算式(子序列1)，該式除了顯示當次(列)消耗量外並將該步驟列運算值存入For迴圈內的位移暫存器中，以提供往後步驟列MO分子消耗量之累加運算用，圖B-A50左方框顯示相關MO分子運算參數供運算參考。



圖B-A50 MO分子源消耗量運算迴圈(節錄)

註：消耗量(毫克)運算為將MO分子莫耳流率乘以該步驟列時間(分)，再乘以MO分子分子量(Molecular weight, mg)(TMGa:114.83g, TMin:159.93g)。

VIIA-5 【附表】

【不同觸發狀態下控制系統的軟硬體設定比較】

觸發狀態	系統可能所處狀態	控制程式設定	註明
Pneumatic N ₂ pressure < 4bar	Run epi. or Purge	強制載入Safety state	氣動氮氣源(N ₂)源供給壓力擾動。
Reactor pressure ≥ 1090mbar	Purge	送出Alarm燈號	多餘氣流會排至Extract管路中，並限制其上限壓力；若該狀態發生時，請檢查真空系統中25&70mbar逆止閥是否有阻塞情形。
Thermocouple& T.C.(Ref) | ΔT | > 4°C	Run epi/Purge	送出Alarm燈號	檢查熱電偶電路(Thermocouple)。
Temperature Controller set& measured | ΔT | > 2°C	Run epi.	送出Alarm燈號	檢查RF狀態和溫控器(Eurotherm)PID參數值。
Sample Unload State Check	Purge	送出Alarm燈號	腔體DOR閥門僅能在此狀態下開啟。

表B-A2 不同觸發狀態下系統可能所處的狀態及程式設定

【各項觸發狀態之初步判定與排除方法】

觸發狀態	可能發生原因	如何驗證與維修
Pneumatic N ₂ pressure ≤4bar	1. 鐵氟龍(Teflon)氣管破裂洩漏。 連結至氣動閥鐵氟龍(Teflon)管脫落。 2. 氣動閥氣源頭供氣壓力不足。 3. 氣動閥氣源壓力為80~85psi。	
Reactor Pressure Increment ΔP ≥50mbar/s	1. 石英管變形導致腔體洩漏。 2. 手套箱N ₂ 灌入反應腔體中。 3. 反應腔氣體灌入Thermocouple quartz.	1. 確認reactor是否能抽至低壓。 2. 確認熱電偶的溫度讀數是否異常。 (核對和Ref相對值.) 3. 更換石英管。
Thermocouple temp. ≥1250°C	1. 菜單溫度數值設定錯誤。 2. 確認熱電偶(thermocouple)與控制器迴路是否接觸不良。	1. 核對Recipe溫度設定值。 2. 核對所有熱電偶溫度值是否都大於1250°C。
Thermocouple Broken	外套管若有彎曲受應力地方, 在加高溫時易斷裂, SOP中應例行檢查熱電偶接點有無嚴重彎曲。	1. Eurotherm本身硬體Sensor break power(SBR)=0% (熱電偶斷路時, 溫控器輸出0V, RF不加熱)。 2. 更換thermocouple。
Reactor pressure ≥1090mbar	逆止閥(Check valve)堵塞。	確認連結至大氣的70/25mbar逆止閥是否異常阻塞。
Thermocouple & Ref. | ΔT | ≥4°C	1. 熱電偶是否異常或接點老化(鏽蝕或外部絕緣層剝落導致正負電極外露等)。 2. 一般溫度差應低於2°C。 3. 使用預留之熱電偶確認何者異常。	該次Run結束後使用預留的熱電偶做比對, 判定是哪一根熱電偶壞掉。
Measured & Setting Temp. | ΔT | ≥2°C	1. 溫控器之PID設定是否異常。 2. 可重新Self-tune一次PID值。 3. 一般正負偏差值低於1°C。	1. 該次Run結束後重設溫控器各溫度點PID值, 並確認和之前所設PID的差異值(需做紀錄)。 2. 一般大約每30個Run執行一次溫控器PID自我演算。
| PT1-PT2 | >75mbar PT1:腔體壓力 PT2:Particle trap出口端錶壓	1. Particle trap 堵塞. (Pressure Transducer difference | PT1-PT2 | >75mbar)。 2. SOP 例行檢測壓力錶頭(Gauge)與壓力傳感器之間的讀值相差值須介於25~45mbar。	1. 確認PT1和PT2差值是否大於SOP所設的值.(典型值約為25~45mbar, 而堵住時的壓力差值大於75mbar)。 2. 更換或清洗Particle trap濾心。
Reactor Stable press ΔP ≥5mbar	1. RF 無氧紅銅管(Coil)破裂, 導致內部冷卻RO水逸漏至反應腔內部。 2. 節流閥動作異常, 或MKS控制器壓力控制不穩等。	1. 若節流閥變動幅度過大(>±2%), 可能該狀態潛在發生。 2. 檢測RF高週波諧調器(tuner)冷卻水水壓是否異常(該水路為封閉迴路)。 3. 檢視節流閥是否已附著滿粒子(Particle), 清

		潔節流閥或更換內部o-ring(可洽詢精傳科技維修)。 4. 重新執行MKS控制器Learn功能。
--	--	--

表B-A3 WK2008系統各項觸發狀態之初步判定與解決方法

【Precaution狀態硬體偵測方式】

觸發狀態	硬體狀態	硬體偵測/觸發方式
Reactor Pressure > 1090mbar	腔體壓力大於 1090mbar	MKS 651C壓控器讀值 (com24)
Thermocouple & Ref. | ΔT | > 4°C	控制器熱電偶與參考熱電偶電路溫度量測值之間 相差值大於4°C	Eurotherm 818P控制器溫度讀值演算 判定 (com2, 25, 26)
Measured & Set Temp. | ΔT | > 2°C	量測與設定溫度之間相差值大於2°C	Eurotherm 818P 控制器溫度讀值演算判定 (com25, 26)
Sample Unload State Check	1.系統N₂ purge. 2.溫度低於100°C 3.腔體壓力大於1000 mbar	PCI-1739U(1)輸出可拿出 樣品之DOR N ₂ 確認訊號 (Device01, PB07)

表B-A4 WK2008磊晶系統之Precaution狀態硬體偵測方式

【各項緊急狀態硬體偵測方式】

觸發狀態	硬體狀態	硬體偵測/觸發方式
Power Glitch	110VAC斷電。	UPS偵測訊號(com1)
Pneumatic N ₂ pressure ≤ 4bar	Pneumatic N ₂ 氣動閥壓力錶頭讀取值小於4bar。	PCI-1739(1)輸入訊號(Device01, PC07)
Reactor Press. Rapidly increase/stable press derivation	腔體壓力每秒上升速度大於50mbar。 穩定壓力值偏差大於5mbar。	MKS壓力控制器壓力讀取值之數值 演算(com24)
Thermocouple Broken	Eurotherm 818P控制器前置面盤出現'Or'字樣閃爍。	Eurotherm 818P控制器的PV指令讀 取值判定
Thermocouple temp. ≥ 1250°C	溫控器讀取值大於1250°C。 (溫控器可供設定之最高溫度: 1200°C, 可顯示最高 溫度為1600°C)	Eurotherm 818P控制器的溫度讀取值 數值演算
"Abort Process" (User manually press)	1.UPS 送出跳電訊號。 2.使用者強制終止主程式。	使用者手動觸發訊號

表B-A5 WK2008磊晶系統之Emergency狀態硬體偵測方式

【WK2008控制系統相關硬體參數】

WK2008控制系統中相關硬體的基本預設參數		
H ₂ /N ₂ 進口端壓力		
項目	預設/典型值	註明
N ₂ 進口端壓力	40~45psi	N ₂ /H ₂ 調壓閥進口端壓力。
H ₂ 進口端壓力	40~45psi	
Particle trap 進出口端 | PT1-PT2 | 壓力相差值	32mbar/腔體壓力200mbar 35mbar/腔體壓力500mbar 36mbar/腔體壓力800mbar	| PT1-PT2 | 差值在Run前後 需紀錄，如相差值大於 75mbar，需更換trap濾心。
一般Purge狀態腔體壓力	1050~1075mbar	25及70mbar逆止閥已安裝於 真空系統的條件下。
氣體流量控制器，啟成科技(SIC)		
MFC工作壓力	0.5~3Kg/cm ² (7.1~43psi)	
MFC最大耐壓	980kPa (142psi)	
氣體流量控制器，TMGa(L)，Bronkhorst		
MFC工作壓力	10~50psi	
MFC最大耐壓	64bar (928psi)	
氣動閥		
作動所需氣體壓力	4~6bar(4.07~6.11 Kg/cm ²)	
氣動閥氮氣源供給壓力	4.6~4.9bar	
MO分子源恆溫槽溫度		
TMGa	5°C	
TMIn	17°C	
註：		
1. 腔體壓力在200mbar時，節流閥開口度約為18.4~18.7%。		
2. 流量計之流量誤差值需低於1%F.S.(Flow derivation ≤ 1%F.S.)。		
3. 溫控器設定與讀取溫度之相差值一般低於1°C。		
4. 下石墨之溫控器熱電偶與(Ref.)熱電偶溫度相差值約小於2°C。		

表 B-A6 WK2008 控制系統中相關硬體預設/典型參數

附錄 C EUROTHERM 腔體溫度控制器

EUROTHERM--Temperature Controller

MODEL : 818P15

WK2008 腔體溫度控制主要是藉由溫控器直流輸出來控制射頻(RF)高週波加熱系統的交流輸出功率，而 RF 加熱系統藉由交流載流銅線圈(AC current in copper coils)感應石墨載體來達到加熱之功效；溫控器則藉由內部電路 PID 演算來達到精確的溫度控制，其穩定溫度正負偏差值小於 1°C。

本章節為針對 WK2008 磊晶系統中，反應腔體之溫度控制器的完整說明，文章可分為硬體功能說明及 RS-232 通訊指令說明和控制指令程式寫法等兩大部分；硬體部分包括 Eurotherm 818P 溫控器基本硬體功能介紹、基本前置面板手動操作說明、溫控器基本製程溫控程式參數設定及簡單輸入範例說明、溫控器內部 PID 演算控制及相關硬體參數功能介紹及其設定方式等；再來針對溫控器內部進階組態參數設定做介紹，其包含進入內部組態參數的特殊硬體接腳設定方式、硬體組態記憶參數表示方式及功能介紹、WK2008 加熱系統中溫控器的組態參數設定值、及加熱系統中針對 RF 輸入控制直流電壓範圍設定等；最後附上 Eurotherm 818P 硬體錯誤碼代表意義及其排除方式介紹，作為使用者初步排除硬體錯誤的依據。Eurotherm 818P 是利用 RS-232 做為其硬體的序列通訊傳輸介面，且資料是以 16Bit 之 ASCII code 編碼型態來做傳輸，在指令格式中上需傳送檢查字元，故在硬體通訊指令說明上包括有溫控器的 RS-232 通訊指令屬性分類(即寫入(Write)及讀取(Request)狀態指令)及其指令寫法格式定義、Eurotherm 818P 中所有通訊指令碼功能說明等 2 大項，其中在指令碼說明中包含了個別指令意義、16 進位字元格式、及寫入或讀取屬性等；最後小節則附上 Eurotherm 818P 的程式控制狀態字元(Status word)寫法，該控制字元功用為控制溫控器內部程式的執行、終止或暫停。

本章節最後為附錄，其內容包含系統中 Eurotherm 818P 硬體規格代碼

(Product code)、輸入熱電偶型態、硬體詳細的輸入/輸出規格、機殼背後接腳腳位定義、硬體 RS-232 序列傳輸的通訊參數設定等資料整理，提供使用者查閱方便之用。

C-1 Eurotherm 818P 基本硬體介紹

Eurotherm 818P15 硬體操作包含前端手動控制(Front panel manual control)及遠端電腦控制(Remote control)，使用者可透過該 2 種介面設定相關硬體參數。Eurotherm 818P15 硬體提供 15 組溫度控制程式設定(program)，每組程式裡有 8 個升/降溫工作區(Segment)可供設定，單一溫度工作區皆可透過設定需求溫度值(Desired temp.)、升/降溫速率(Ramping rate)、停留時間(Dwell time)等 3 項參數來達到製程溫度的控制。溫控程式是以迴圈(Loop)方式執行，使用者可自行設定程式迴圈執行次數(Program loop count)，每個迴圈的執行次數可設定範圍為 1~999 次。此外 Eurotherm 818P15 硬體的 15 組溫控程式之間亦可設定彼此連結，故整體溫度控制程式最多提供 120 組溫度工作區。

Eurotherm 818P 提供 2 種 PID 演算法及數樣輔助參數來達到最佳溫度控制。PID 演算控制包含自動 PID 控制(Self tune)、被動 PID 控制(Adaptive tune)等，輔助參數包含 Cbh/CbL(Cutback high/low)、Atr(Adaptive tune trigger)、Cr(Relative cool gain)等參數，該輔助參數得以優化 PID 控制，降低其溫度震盪(Oscillation)幅度及震盪次數等，使得溫度控制達到最佳化目標。使用者可簡單透過 Eurotherm 818P 前置面板手動設定上述相關參數，包含控溫程式中的升/降溫速率、需求溫度、停留時間、程式迴圈執行次數等設定；及執行 PID 自我/被動演算、PID 值手動輸入、輔助參數輸入、Sbr 參數輸入等。此外控溫程式中相關參數設定和 PID 參數及輔助參數，即個別 P(XP)、I(ti)、D(td)值、Cbh(HB)、CbL(LB)、Cr(RG)、Sbr(BP)等參數皆可透過 RS-232 通訊介面經由遠端電腦作寫入或讀取動作^{**1}，相關參數意義及設定方式文章後續有獨立介紹。

Eurotherm 818P 提供內部硬體組態(Configuration)變更功能，使用者需在

組態變更模式下才能改變諸多硬體相關設定。組態變更功能包含：硬體輸入端型態設定，如設定輸入端的熱電偶為 K、R、T、S 等型態或為其他種類的光學高溫計(Optical Pyrometer)等^{註2}；溫度單位設定，包含顯示及輸入溫度單位設定(°C/°F/K)；硬體輸出型態及範圍設定，即設定輸出為電壓或電流型態；設定輸出為 ON/OFF 或 PID 演算控制；RS-232 通訊參數設定，包含波特率(Baud rate)、通訊協定格式(Format)等；及警告函數設定、PID 值及升/降溫率的單位設定、顯示及可供設定的最高/低溫度值設定、直流輸出電壓(0~5V、0~10V)/電流(4~20mA)範圍設定等；這些組態變更功能僅能在特殊硬體操作下作手動變更，不能藉由前置面板設定。此外僅部份硬體組態設定參數可透過 RS-232 通訊介面經由遠端電腦作讀取動作，可供讀取的參數包含可供設定的最高/低溫度值、螢幕可顯示的最高/低溫度值、硬體特性參數等。

註 1：Eurotherm 818P 硬體 RS-232 數位通訊指令記憶碼及其代表意涵、相關指令屬性(Attribute)對照表請參閱表 C-12 Eurotherm 818P 通訊指令碼，本文中設定參數括號內的英文字母代表對應的硬體指令記憶碼(Mnemonic)。

註 2：Eurotherm 818P 提供數種輸入型態，包含不同合金成份的熱電偶(Thermocouple)及量測並分析加熱物體所輻射出白熾光的非接觸式光學高溫計(Optical Pyrometer)等，詳細硬體提供輸入規格請參閱 EUROTHERM 818 Controller-Programmer 文件中 p.35 內容。

註 3：Eurotherm 818P 原廠相關硬體資料存放於系統工業電腦 D 槽：磊晶系統資料\WK2008 System Files\WK2008--系統溫度控制 EUROTHERM 818P 資料夾。

C-1-1 【Eurotherm 818P 前置面板手動操作】

Eurotherm 818P 溫度控制器硬體前置顯示面板及相關按鍵功能敘述如圖 C-1 所示；

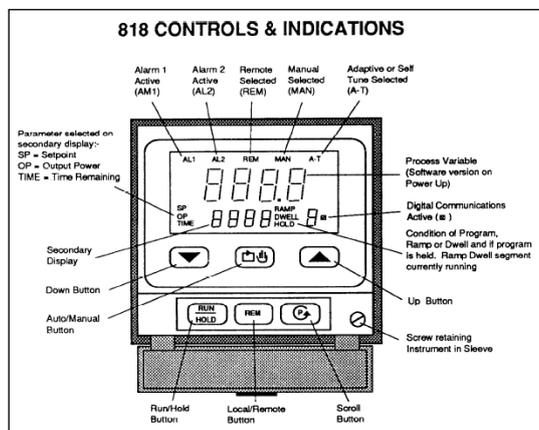


圖 C-1 Eurotherm 818P 前置面板與其顯示/按鍵功能說明

前置面板中較常使用的按鍵為右下方的"Scroll"按鍵、向上(Δ)、向下(∇)按鍵、Run/Hold 按鍵等；使用者可透過前置面板手動設定相關硬體參數，以下為其按鍵功能簡介。

- Scroll 按鍵：進入參數設定選單，及提供參數選單切換。
- Δ 、 ∇ 按鍵：提供參數設定值作上下調整，或手動重置程式。
- Run/Hold 按鍵：手動控制製程溫控程式的執行或暫停。

【前置面板顯示資訊】

前置面板上方主螢幕顯示目前溫度(Processing value, PV)，次螢幕(Secondary display)中綠色 SP 字樣右方為設定溫度(Set-point, SP)；短按"Scroll"按鍵可作為目前溫控器輸出功率百分比比例(Output power, OP)與設定溫度的資訊切換。

註：一般當溫控器初始尚未執行程式時，短按"Scroll"按鍵僅有 SP/OP 等 2 項顯示資訊；而當溫控器執行程式時，短按"Scroll"按鍵還可切換顯示第 3 項資訊"TIME"，即目前該執行中溫度工作區(Segment)所剩餘時間，表 C-1 即列出溫控器於程式執行或初始閒置(Idle)時所提供的顯示資訊。

顯示幕	意涵，單位	程式執行時	未執行程式
SP	目前設定溫度值(°C)	√	√
OP	目前溫控器輸出功率百分比 (%)	√	√
TIME	目前該程式執行所剩時間(Min)	√	

表 C-1 Eurotherm 818P 前置執行介面狀態顯示

【溫控器初始設定】

Eurotherm 818P 溫控器在輸入程式參數前，使用者需對溫控器預設溫度作初始設定，而該預設溫度為溫控器不執行程式時，即系統於閒置狀態 (System idling state) 時所設定的溫度，一般來說預設溫度應低於系統環境中的最低溫度，以避免當預設溫度高於環境室溫時，溫控器強迫輸出驅動加熱系統啟動，造成系統誤動作。基於上述考量，WK2008 加熱系統中 Eurotherm 818P 溫控器預設溫度為 5°C。

【設定預設溫度值】

在溫控器尚未執行製程溫控程式，且 RF 電源處於關閉狀態時，任意按下△或▽按鍵(非同時)，次螢幕中代表設定溫度(SP)字樣右方顯示數值 (Ex:5.1) 出現持續閃爍的綠點，表示預設溫度值可作變更，而該數值即為設定溫度，如圖 C-2 所示；此時可藉由△或▽按鍵^{註1}調整溫控器的預設溫度值(SP1)。設定結束約莫 1~2 秒後，待綠點消失即代表預設溫度值已輸入硬體中^{註2}。



圖 C-2 Eurotherm 818P 硬體預設溫度(SP1)可供變更狀態

註 1：短按△或▽調整鍵，單次僅能變動 1 個最小顯示單位；長按△或▽調整鍵即可快速變動預設溫度值(SP1)。

註 2：如需再次變更預設溫度，任意按下△或▽按鍵即可。

C-2 Eurotherm 818P 基本手動設定

Eurotherm 818P 硬體於系統閒置狀態時，按下位於前置面板上的"Scroll"按鍵約 3 秒可進入硬體手動設定參數選單，次螢幕上會依序出現表 C-2 所列參數，這些參數包含溫控器程式設定、執行 PID 演算、PID 輔助參數、硬體最大/最小輸出功率比例、輸入斷路時硬體預設輸出功率等；使用者可利用△、▽按鍵上下調整設定參數值，要跳往下一參數則需再按下"Scroll"按鍵 1 次，相關參數設定詳見以下章節敘述。表 C-2 亦附上參數的出廠預設值。

參數	簡易描述	出廠預設值
Pnr1 Pr1 PL1 Pd1 | Pr8 PL8 Pd8	Pnr1 代表 Program1，按下 Scroll 按鍵可依序設定 Pr1、PL1、Pd1...Pr8、PL8、Pd8 等 8 組溫度工作區升/降溫參數，要跳往下一參數需再按下 Scroll 按鍵。	N.A.
Cnt y/n	15 組程式間是否連續。(y→yes, n→no)	Y
Hb	Hold back	OFF
PLC	程式迴圈執行次數。	0times
SP1	輸出埠 1 預設溫度。	25°C
SP2	輸出埠 2 預設溫度。	25°C
St	自動 PID 演算(Self tune)	Disable
At	被動 PID 演算(Adaptive tune)	Disable
SAt	自動/被動 PID 演算。	Disable
Atr	被動 PID 演算中的觸發溫度(Adaptive tune trigger point)。	N.A.
Pd	P 比例參數(Proportional band)	10%
ti	I 積分時間(Integral time)	300sec
td	D 微分時間(Derivative time)	60sec
cbL	輔助 PID 溫度參數(Cutback Low)	OFF
cbh	輔助 PID 溫度參數(Cutback High)	OFF
Hl	輸出埠 1 的最大輸出功率比例(Output 1 High limit)	100%

Cr ^{註1}	Relative cool gain	1.0%
CL	輸出埠1的最小輸出功率比例(Output 1 Low limit)	0%
Cc	Output cool cycle time	10.0sec
Db ^{註1}	Output 1/2 heat/cool dead-band	0
Sbr	輸入端開路/短路的輸出功率(Sensor break output power)	0%

表 C-2 Eurotherm 818P 硬體手動設定參數及其預設值對應表

註 1：Cr(Relative cool gain)設定範圍為 Proportion band(Pd)參數的 0.1%~20%，db(Dead-band)設定範圍為 Proportion band(Pd)參數的-5%~5%。

註 2：Eurotherm 818P 硬體前置面板參數除了手動設定外，尚可透過序列傳輸介面做讀取/寫入動作；表 C-2 所列的指令參數，其序列傳輸通訊指令記憶碼(Mnemonic)及其代表意涵、相關指令屬性(Attribute)的對照表，請參閱表 C-11 Eurotherm 818P 通訊指令碼。

文章接下來將依照溫控器手動設定參數選單中出現的參數次序依序介紹，除了一開始介紹的溫控器製程溫控程式的參數設定與程式執行有直接關係外，之後的參數則與達到精準溫度控制及硬體輸出功率設定有關，使用者可根據需求選擇參考之。

C-2-1 【Eurotherm 818P 製程溫控程式介紹】

Eurotherm 818P15 硬體提供 15 組溫度控制程式設定(program)，每組程式裡有 8 個升/降溫工作區(Segments)可供設定，單一溫度工作區皆可透過設定升/降溫速率(Program Ramping rate, Pr(n))、需求溫度值(Program Level, PL(n))、停留時間(Program Dwell time, Pd(n))等 3 項參數來達到升/降溫控制；8 個溫度工作區的升/降溫控制(ramp/level)參數設定依序為(Pr1,PL1,Pd1,Pr2,PL2,Pd2... Pr8,PL8,Pd8)，如圖 C-3 所示。若使用者需要 8 個以上溫度工作區之溫控程式時，即可將 Eurotherm 818P15 硬體 15 組中任何 2 組或以上之溫控程式進行連結(Cnt y/n)，故整體的溫度控制程式最多可提供 120 組溫度工作區(ramp/level)。此外 Eurotherm 硬體提供最多 999 次的程式迴圈執行次數(Program loop count, PLC)，使用者可依照實際需求

做任意設定。

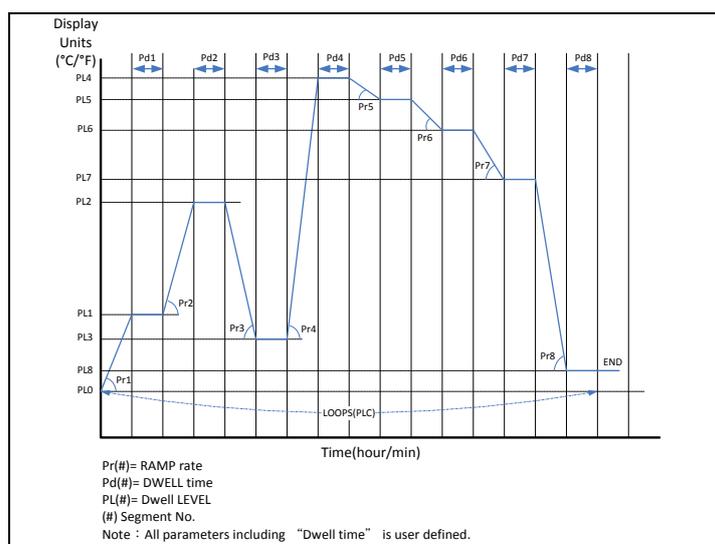


圖 C-3 Eurotherm 818P 控溫設定示意圖(PL0 為起始溫度，一般為室溫)

C-2-2 【進入製程溫控程式參數設定】

按下"Scroll"鍵約 3 秒，次螢幕會出現"Pnr1"字樣，此時進入製程溫控程式參數手動設定狀態，Pnr1 代表第 1 組程式(Program1)，再按下"Scroll"鍵可設定第 1 組程式中的 8 個溫度工作區的控溫參數 (Pr1,PL1,Pd1...Pr8,PL8,Pd8)，參數意義如下 A~C 所述，使用者可利用△或▽鍵調整其設定值，按下"Scroll"鍵可再跳往下 1 組控溫參數；此外，在次螢幕出現"Pnr1"時，按下▽鍵可跳往第 2 組程式(Program2, Pnr2)。

相同地，再按下"Scroll"鍵可進入第 2 組程式中的 8 個溫度工作區的控溫參數設定選單。

註：Eurotherm 818P 按下"Scroll"鍵單次只能手動設定 1 組程式中的 8 個溫度工作區參數，設定完程式參數後即進入 Cnt、Hb、PLC、SP1、CbL/Chh...Sbr 等進階參數設定選單；使用者如需設定其他組程式，需再次按下"Scroll"鍵約 3 秒，再按下△或▽鍵選擇進入所需的程式(Ex：Pnr5)內設定其 8 組溫度工作區相關製程溫控參數。

- A. 個別溫度工作區的升溫速率，(Pr(n)，Ramp rate, °C/min)。
- B. 個別溫度工作區的溫度設定，(PL(n)，Temp. Level, °C)。
- C. 個別溫度工作區設定溫度的停留時間，(Pd(n)，Dwell time, min)。

圖 C-4 為基本升溫參數設定的曲線，只需給定 $Pr(n)$ 、 $PL(n)$ ，及 $Pd(n)$ 等 3 個參數，溫控器程式即會以 $Pr(n)$ 升溫速率由 $PL(n-1)$ 升溫至 $PL(n)$ ，並在 $PL(n)$ 停留 $Pd(n)$ 所設定的時間(min/hour)。

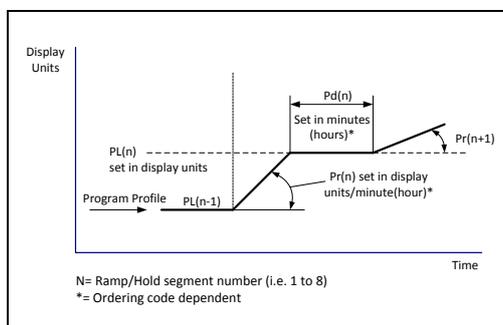


圖 C-4 Eurotherm 818P 基本升溫參數設定之曲線

註 1：在 Pr 的設定中，除了輸入數值以外還有 3 種特殊參數可供設定，個別參數意涵如表 C-3 所示；將 Pr 設為 END 或 Pd 設為 END 都是將程式停在上一個溫度工作區(Segment)，例如 $Pr1=20.1$ ， $Pr2=47.8$ ， $Pr3=End$ ，程式從第 1 溫度工作區($Pr1$)開始，執行至第 2 溫度工作區($Pr2$)結束後即停止程式。

Pr 參數設定	意涵
數值，例如：102.4	設定升溫速率為每分鐘 102.4°C
STEP	瞬間從目前溫度跳至設定溫度點
NONE	該溫度工作區忽略，跳至下一個工作區
END	終止程式在上一個溫度工作區(Segment)

表 C-3 Eurotherm 818P "Pr"參數設定

註 2：在起始升溫的設定上(由室溫開始)， $Pr1$ 可以設定成 STEP 或者是 $Pr1$ 為某一特定升溫速率，兩者意義不同。分述如下：

- $Pr1$ 設定為 STEP：設定溫控器由目前所讀取的溫度值瞬間升溫至 $PL1$ 的設定溫度，這為瞬間改變硬體設定溫度(Set-point)，實際溫度(Processing value)仍須由溫控器 PID 演算控制加熱系統到達設定溫度；如果指定某一特定溫度值作為程式起始溫度而不是由目前溫度作為起始值，可將 $Pr1$ 設定為 STEP， $PL1$ 為指定的溫度， $Pd1$ 可依需求設定，再設定 $Pr2$ ， $PL2$ 及 $Pd2$ ；而當溫度到達特定溫度設定值($PL1$)後，待 $Pd1$ 時間結束後，溫控器即開始執行溫度工作區 2 的設定($Pr2, PL2, Pd2$)。
- $Pr1$ =指定升溫速率：代表程式起始是以設定的升溫速率由目前所讀取的溫度

升溫至 PL1 溫度設定值，圖 C-5 為起始升溫曲線。

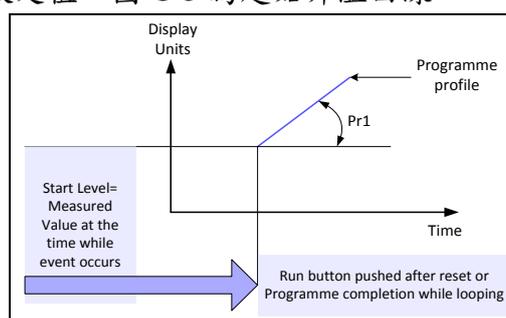


圖 C-5 Eurotherm 818P 起始升溫曲線

待該組控溫程式參數設定完畢後，按下"Scroll"按鍵即進入 Cnt y/n 選單，該選項為提供使用者設定該組程式與下一組程式間是否做連結，若選擇不連結溫控程式將只執行該組程式內的溫度工作區間設定，詳細程式 Cnt y/n 功能設定如下文介紹。

【Cnt 設定】

Eurotherm 818P 硬體 15 組程式中的每組程式皆有連結參數設定(Cnt y/n)，Cnt 功能設定即為設定該組程式是否與下一組程式做連結，例如在第 1 組程式中設定連結，即程式執行完第 1 組程式後，會再接下去執行第 2 組程式中的參數設定；以此類推，若第 2 組程式仍設定連結，即會繼續執行第 3 組程式設定，而程式將依序執行到不做連結設定的該組程式內參數完畢為止。若第 4 組程式設定不做連結，程式在執行完第 4 組程式內參數設定後，即終止(End)在第 4 組程式中的最後 1 個溫度工作區設定(Temp. Level)。

例如：設定 Pnr1 與 Pnr2 做連結，且重複執行 2 次。設定步驟如下：

1. 在系統閒置狀態下，溫控器溫度設定在預設值(5°C)，按下"Scroll"按鍵約 3 秒，此時次螢幕會出現"Pnr1"字樣，即進入製程溫控程式參數手動設定狀態，按下△或▽鍵跳至需要設定的程式，次螢幕即會出現"Pnr2...Pnr15"等程式編號；待選定需要設定的程式編號(Pnr1)後，再按下"Scroll"鍵即進入第 1 組(Pnr1)程式 8 組溫度工作區的參數設定選單。
2. 待 Pnr1 程式中的 8 組溫度工作區參數設定完後，按下"Scroll"鍵會出現"Cnt y/n"字樣，按△或▽鍵切換成 y，此即設定第 1 組程式(Pnr1)與下

一組程式(Pnr2)做連結；再按下"Scroll"按鍵數次^註，回復至硬體閒置狀態，如圖 C-6 所示。



圖 C-6 Eurotherm 818P 硬體於閒置狀態時的顯示幕資訊

3. 重複執行步驟 1，選擇進入"Pnr2"，並依序設定好第 2 組程式中的 8 組溫度工作區參數。參數設定完成後，按下"Scroll"鍵仍會出現"Cnt y/n"字樣；此時按△或▽鍵切換成 n，此即設定第 2 組程式不與第 3 組程式做連結。再按下"Scroll"按鍵，會出現 PLC 字樣，此即選擇迴圈執行次數^註，按△或▽鍵切換成 2，再來按下"Scroll"鍵數次，回復至硬體閒置狀態。
4. 再重複執行步驟 1，選擇"Pnr1"，靜候數秒待回復至硬體閒置狀態，按下 Run/Hold 鍵，即開始依序執行第 1 組與第 2 組程式迴圈共 2 次，即 1→2→1→2。如果使用者選擇"Pnr2"，程式則由第 2 組程式開始執行，變為 2→1→2。
5. 使用者可依照步驟 1~4 流程任意設定程式連結。如果使用者設定完成 Pnr4、Pnr5、Pnr6 等程式內溫度工作區參數後，且 Pnr4 與 Pnr5 皆設定為"Cnt y"，Pnr6 設定為"Cnt n"，PLC 設為 2；選擇由 Pnr5 開始執行程式，則程式會依序執行 5→6→4→5→6。

註：在程式連結設定中，若該組程式設定為"Cnt y"，按下"Scroll"按鍵並不會有 PLC 的參數設定。若該組程式設定為"Cnt n"，按下"Scroll"按鍵則有 PLC 的參數設定，該參數為連結程式的迴圈執行次數，若該組程式的上 1 組程式設定為"Cnt y"，則 PLC 參數為該組與上 1 組程式構成的連結程式的迴圈執行次數；但若上 1 組程式設定為"Cnt n"，則為該組程式的重複執行次數。

Cnt 參數完成設定後，再按下"Scroll"按鍵即可進入 Hb(Holdback)參數(即限制讀取與設定溫度偏差值在可容許的範圍內)設定選單(Hb 詳細功能後

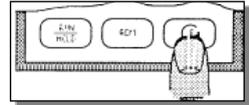
面章節再予詳述)；如不需再額外設定之後的參數，靜候數秒，溫控器自動回復至閒置狀態。使用者一按下"Run/Hold"按鍵，即可執行製程溫控程式。

註：Eurotherm 溫控器的前置面板中，使用者可同時按下△及▽按鍵，強迫中止執行中的製程溫控程式，設定溫度重置(Reset)為預設溫度值(SP1)。

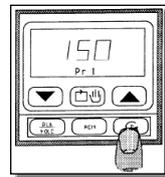
【設定溫控程式參數範例】

以下 11 點將簡單描述如何依序設定溫控程式參數。

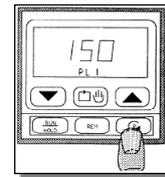
1. 按下"Scroll"按鍵約 3 秒進入手動參數設定選單，如右圖顯示。



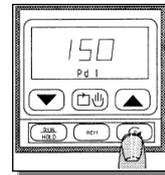
2. 此時出現"Pnr1"字樣，再短按"Scroll"鍵，出現"Pr1"，如右圖所示，任意按下△或▽鍵可調整所需的升溫速率，將其設定為 22.8，亦即 22.8°C/min。



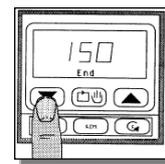
3. 再短按"Scroll"鍵，螢幕出現"PL1"字樣，如右圖所示，任意按下△或▽鍵可調整設定溫度，將其設定為 520，即為 520°C。



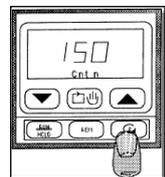
4. 再短按"Scroll"鍵，螢幕出現"Pd1"字樣，如右圖所示，任意按下△或▽鍵可調整設定溫度停留時間，將其設定為 2，即為 2min。



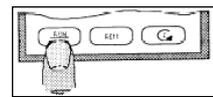
5. 再短按"Scroll"鍵，螢幕出現"Pr2"字樣，任意按下△或▽鍵將其設定為"End"，此即將溫度工作區停在第 1 個溫度工作區。



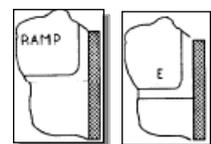
6. 再短按"Scroll"鍵數次，待螢幕出現"Cnt"，任意按下△或▽鍵將其調整為 Cnt n，此即程式間不作連結。



7. 靜候數秒或再短按"Scroll"鍵數次直到螢幕出現"Sbr"選項，溫控器將回至最初顯示預設溫度狀態。按下 Run/hold 鍵，即可執行程式。

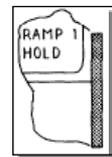


8. 此時次螢幕右下方將出現程式目前執行狀態的黃色顯示

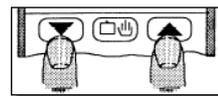


字樣，RAMP 代表執行升溫，DWELL 代表程式執行設定溫度點的停留；E 則為程式結束顯示。按下"Scroll"按鍵可作 SP/OP/TIME 等即時資訊切換。

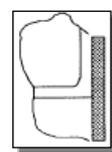
9. 使用者如需暫停程式，則再次按下 Run/hold 鍵，此時右下方顯示幕將出現 Hold 字樣，如右圖所示，如要再繼續程式執行，再按下 Run/hold 鍵即可。



10. 此時程式將以 22.8°C/min 速率由室溫升至 520°C，待停留 2min 後，程式結束，且溫度停留在 520°C。



11. 如需強迫終止程式(Reset running program)，同時按下△及▽按鍵即可，如右圖所示，此時右下方顯示程式執行狀態的黃色字樣將消失；此時溫控器設定溫度為預設溫度(SP1)。



C-2-3 【Eurotherm 818P 其他參數介紹】

當使用者完成溫控程式參數設定後，如果使用者想進一步避免溫度產生過衝或下衝(Overshoot/Undershoot)等溫度控制不準的現象，則必須再設定相關溫控進階參數，以達到精準溫度控制的目的。

使用者可在硬體處於閒置狀態時，按下"Scroll"鍵約 3 秒，待硬體進入手動設定參數狀態，再按下"Scroll"鍵數次；直到出現 Hb 字樣，此時即可設定各項進階溫控參數。

【Hb 參數】

Holdback(Hb)參數為抑制程式執行時序，其功能為當設定(SP)和讀取溫度(PV)之間的偏差值大於容許預設偏差值(偏差包含正、負值及正負偏差區間)時，溫控器會強迫暫停(Hold)目前執行中的程式，待偏差值回復至預設偏差區間內才開始繼續執行程式。Holdback 功能一般於具有相當可觀的傳輸延遲或較不易加熱的系統中使用。WK2008 加熱系統中，由於資料傳輸時間約為 120ms 及加熱系統反應迅速；並未產生實際溫度變化無法跟上程式設定的升/降溫速率等問題，故系統中溫控器並未使用 Holdback 功能。

Hb 參數有下列 3 項可供設定的溫度偏差模式，以設定溫度為基準，有正偏差(Derivation High, $PV-SP>0$)、負偏差(Derivation Low, $PV-SP<0$)、偏差區間(Derivation Band, 即 $|PV-SP| \leq \text{特定溫度}$)等 3 種模式；圖 C-7 顯示 3 種偏差範圍設定示意。

➤ **Derivation High**

讀取溫度只能高於設定溫度於特定溫度範圍內，Ex: limit $PV-SP \leq 5^\circ\text{C}$ ，if $PV-SP > 5^\circ\text{C}$ ，Program holds。

➤ **Derivation Low**

讀取溫度只能低於設定溫度於特定溫度範圍內，Ex: limit $SP-PV \leq 5^\circ\text{C}$ ，if $SP-PV > 5^\circ\text{C}$ ，Program holds。

➤ **Derivation Band**

讀取溫度和設定溫度正負偏差值限定介於某特定溫度區間內，Ex: limit $|SP-PV| \leq 5^\circ\text{C}$ ，if $|SP-PV| > 5^\circ\text{C}$ ，Program holds。

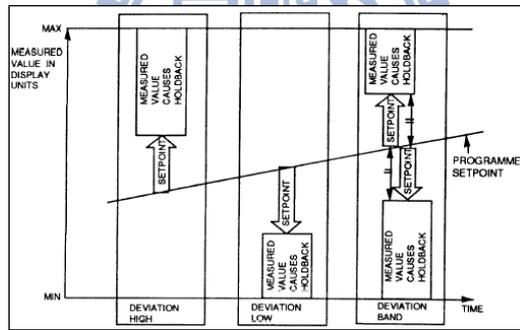


圖 C-7 Eurotherm 818P Derivation High/Low/Band 示意圖

【SP1 參數】

SP1(Set-point1)參數為溫控器於系統閒置(即不執行程式)，或溫控程式重置(Reset)時的內部預設溫度(SP1)，WK2008 系統中溫控器預設溫度為 5°C ，由於系統中 Eurotherm 818P 硬體只利用第 1 組輸出(Output1)，故只需設定 SP1 參數。

【St/At/Manual Tune PID 演算控制】

Eurotherm 818P 提供 3 種 PID 演算控制，即自動 PID 演算(Self-tune, St)、被動 PID 演算(Adaptive-tune, At)、及手動輸入 P/I/D 值^註等 3 種溫度 PID 控

制演算方法。其中自動 PID 演算為硬體自我運算能快速達到特定溫度並穩定控制的 P/I/D 值，該方法能快速獲得 PID 演算控制參數，Self-tune 一般為最常使用的 PID 控制方式；Adaptive tune 提供使用者定義溫控器執行 PID 演算的控制溫度區間，溫控器會持續計算並更新符合設定溫度區間的 P/I/D 值，該方法主要用在若時常更換加熱系統負載或製程溫度變化頻繁的狀況下使用，該 PID 演算方法可有效的達到溫度穩定控制。除了 Self tune 與 Adaptive tune 這 2 種溫控器自動運算 P/I/D 控制參數的演算法外，Eurotherm 818P 溫控器也提供使用者自行輸入 P/I/D 值，輸入方式除了利用前置面板手動輸入外，亦可透過遠端電腦由特定指令寫入，詳細指令內容請參閱 [C-5 Eurotherm 818P 溫度控制器之 RS-232 通訊](#)。使用者可利用前置面板上"Scroll"按鍵即可手動決定執行 Self tune 或 Adaptive tune PID 控制，或手動輸入 PID 控制參數；詳細內容請參閱 [C-3 Eurotherm 818P PID 控制簡介](#)。

註：P(Pb: Proportional Band, %)、I(ti: Integral time, Sec)、D(td: Derivative time, Sec)。

【PID 輔助參數(Cut back Low/High)值設定】

Eurotherm 818P 提供 2 組 PID 輔助參數 Cutback Low/High(Cbh、CbL)，輔助參數為修正硬體 PID 控制的溫度區間，目的皆為降低溫度震盪幅度及震盪次數，以利儘快達到穩定狀態，詳細的輔助參數說明及設定方法請參閱 [C-3 Eurotherm 818P PID 控制簡介](#)。

【HI 參數】

HI 參數為設定輸出埠 1 的最大輸出功率比例(%)，使用者可透過設定該參數決定加熱系統最大輸出功率比例；一般加熱系統中，為避免過大瞬間輸出傷及硬體，通常會限制其最大輸出功率。在 WK2008 磊晶加熱系統中，預設最大 RF 加熱功率比例為 80%。

【CL 參數】

CL 參數為設定輸出埠 1 的最小輸出功率比例(%), 使用者可透過設定該參數決定加熱系統最小輸出功率比例; 在 WK2008 磊晶加熱系統中, 預設最小 RF 加熱功率比例為 0%(0W)。

【Sbr 參數(Sensor break output power)】

Eurotherm 818P 提供當硬體偵測到輸入端感測元件, 即熱電偶斷路(Thermocouple break)時, 溫控器輸出功率比例設定, 其可設定的範圍為 0.0~100%, WK2008 加熱系統中溫控器 Sbr 參數預設值為 0%(0W)。

C-3 Eurotherm 818P PID 控制簡介

Eurotherm 818P 硬體提供 2 種不同的內部 PID 演算方式, 一為自我演算法(Self-tune algorithm), 另一種為被動演算法(Adaptive-tune algorithm), 這 2 種演算法個別有其 PID 控制優勢, 使用者可依其需求選擇這 2 種硬體內部演算法其中之一來快速取得符合製程溫度控制的 P/I/D 值; 若使用者想嘗試自己手動給定 P/I/D 值, Eurotherm 818P 溫控器亦提供 P/I/D 參數手動(Manual)設定功能。本小節將先介紹 Eurotherm 818P 硬體內部所提供的 2 種溫度控制演算法的個別控溫特性、個別演算法所涉及變更的執行參數, 及如何實際執行該演算法的詳細步驟等; 再來針對想自行嘗試設定 P/I/D 參數的使用者提供一套設定參考準則; 最後則介紹 PID 控制輔助參數 "Cutback", 該輔助參數其主要功能為抑制溫度震盪及降低其震盪次數。

C-3-1 【Self-tune】

Self-tune 就是自動調整(Auto-tune), 其為一種 one-shot PID 演算法, 也就是溫控器會自動調整內部硬體相關控制參數, 提供控溫程序中所需要的條件, 在自我調整(Self tuning)的過程中, 溫控器會以全功率輸出(Full heat power output), 或零功率輸出(Zero power output), 或者是以特定的加熱/冷卻功率輸出(Fitted full Heating/Cooling power, 使用者可藉由設定 HI/CL 參數改變額定輸出功率比例), 即是改變全輸出功率值(不一定設定為 100%)

及零輸出功率(不一定設定為 0%)；WK2008 加熱系統中，HI 參數預設為 80%，CL 參數預設為 0%。

圖 C-8 是典型的 Self-tune 程序中，溫控器的讀取溫度(PV)與輸出(OP1)百分比變化關係圖；圖 C-8 中可看到 Self-tune 初期，RF 輸出功率比例為 100%(出廠預設值，該值可藉由 HI 參數調整)，當溫度超過 Self-tune 溫度點(Artificial set-point)時，此時溫度誤差值過大，RF 輸出功率降為 0%，當溫度再度低於 Self-tune 溫度點時，RF 輸出功率即升為 100%，當溫度誤差值變小時，RF 輸出功率不再以 ON/OFF 方式控制，而是根據溫度誤差值變動，持續修正其輸出功率比例，即降低其震盪振幅及抑制震盪，達到溫度穩定控制(Steady state control)。Self-tune 適合在要求快速到達設定溫度值，且到達設定溫度後能最快達到穩定狀態的條件下使用之。

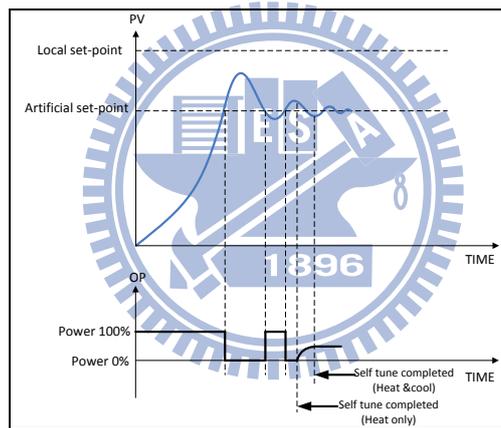


圖 C-8 Eurotherm 818P 典型的 Self-tune 程序
在 Self-tune 的過程中有表 C-4 中所列的 7 種參數值會被自動修正：

Parameter	Mnemonic
Proportional Band	Pb
Integral time	ti
Derivative time	td
Cutback low	CbL*
Cutback high	Cbh*
Relative cool gain	Cr
Cool cycle time	Cc

表 C-4 Eurotherm 818P 執行完 Self-tune 後，會做變更設定的參數列表

*標示註解：在 Self-tune 的過程中，如果要調整 PID 的溫度點(Self-tune set-point)與起始溫度偏差大於硬體 Span 的 5%(80°C)以上^註，CbL 或 Cbh

參數會作更動；當調整PID所設定的溫度點高於起始溫度，CbL參數更動；反之如要調整PID所設定的溫度點低於起始溫度，Cbh參數更動。

註：Eurotherm 818P 硬體輸入端為 R-type 熱電偶，其硬體最大 Span 為 1600°C，表 C-5 列出不同熱電偶電路的最大及最小 Span 溫度值。

Thermocouple types	Max. Span(°C)	Min. Span(°C)
J, L	600	100
R, S	1600	600
K	1200	125
B	1800	1000

表 C-5 不同型態的熱電偶合金電路其最大及最小硬體 Span 溫度值

C-3-2 【執行 Self-tune】

在執行 Self-tune 之前，需確定目前溫度為穩定值(Steady state)；此外使用者必需在溫控器硬體搭配程式執行控溫參數前預先操作 Self-tune 功能，以利溫控器擷取相關 PID 控制參數。

執行 Self-tune 請依照下列 9 點步驟依序執行。待溫控器執行完 Self-tune 後，相關 PID 控制參數(Atr、Pd、ti、td、CbL/Cbh、Cr、Cc)將直接存於溫控器內部硬體中。

1. 中止目前執行的系統控制程式，將位於系統工業電腦 D 槽中檔名為 "PID Auto-tune" 的 (.txt) 檔載入程式中，其菜單路徑為 D(Epitaxy Documents):\WK2008 System epitaxy recipes\System calibration Recipes\PID Auto-tune.txt。菜單中預設載流氣體為 H₂、進腔體總流量為 7.5SLM、壓力設定為 200mbar、通入 NH₃ 流量為 2.7SLM；菜單預設執行時間為 1 小時。(使用者可根據其需求事先更動菜單內的預設參數值，如載流氣體總類、通入腔體的總氣體流量、腔體壓力等參數。)
2. 待控制程式中狀態描述(State Description)視窗出現 "System is ready for PID Auto-tune." 時，於溫控器前置面板按下 "Scroll" 按鍵約 3 秒後進入手動參數設定選單，此時字幕出現 Pnr1 字樣，短按 "Scroll" 按鍵數次跳

到次螢幕顯示"At"字樣。

3. 同時按下△及▽鍵，此時上方顯示幕出現黃色"A-T"字樣，次螢幕目前顯示溫度設定(Set-point, SP)值可供調整。
4. 此時溫度設定僅供參考，使用者可依不同控溫程序設定該溫度點，一般將溫度設定為 520°C(LT-nucleation GaN 成長溫度)，該溫度即為溫控器要設定 P/I/D 參數的參考溫度值。
5. 當溫控器硬體處於設定要調整 PID 之溫度值狀態時，次螢幕中"SP"字樣會持續閃爍約 1 分鐘；當"SP"字樣停止閃爍，此時溫度值不可再任意更動，且上方顯示幕"A-T"字樣開始閃爍，此時開啟系統對應的 RF 開關，溫控器即開始升到設定溫度(Ex：520°C)，上方顯示幕中"A-T"字樣會持續閃爍到整個 Self-tune 程序結束。
6. 若要強制終止 Self-tune 程序，則在溫控器前置面板按下"Scroll"按鍵約 3 秒後進入手動參數設定模式並跳至 St 選單，同時按下△及▽鍵，待上方顯示幕"A-T"字樣消失即可，再將預設溫度調回 5°C。
7. 承接步驟 5，待上方顯示幕中"A-T"字樣消失，Self-tune 程序結束，此時溫度應穩定於 520°C，再來關閉 RF 電源，等待系統自然降溫。
8. 關閉 RF 電源後，按下▽鍵將硬體預設溫度值(SP1)調回 5°C。
9. 待溫度降至低於 300°C 時，按下系統控制程式前置面板中"ABORT PROCESS"按鈕，強制系統載入安全模式(Safety state)。此時系統載流氣體切換成 N₂/5.5SLM。
10. 待溫度降至 150°C 以下，中止系統控制程式，載入"Purge recipe(N2)"的(.txt)菜單，其路徑為 D(Epitaxy Documents):\WK2008 System Epitaxy Recipes\Purge Recipes\Purge recipe(N2).txt。待菜單中預設時間執行完畢，按下控制程式前置面板"Main Pump switch"按鈕，關閉真空泵浦開關。

註：由於 WK2008 磊晶系統中有上、下 2 台 RF 加熱器，各別加熱條件大不相同，使用者可根據長晶條件需求，撰寫合適的 PID 自我演算菜單。

C-3-3 【Adaptive-tune】

Adaptive-tune 是一種背景 PID(Background PID)演算法，溫控器硬體會持續偵測溫度誤差值，誤差值定義為測量溫度值減去設定溫度值(Error signal, PV-SP)，且該演算法會持續分析溫度擾動對控制迴路的響應。當演算法偵測到響應臨界震盪 (Critical Damping) 或為低阻尼 (Under-damped, Oscillatory)震盪狀態，會重新計算並給定 P, I, D 值。Eurotherm 818P 硬體中，Adaptive-tune 演算需定義被動演算觸發溫度參數(Adaptive tune trigger, Atr)，該參數即為定義一個特定的溫度誤差值(Error signal, $|PV-SP|$)，而 Adaptive-tune 在整個控溫程序中會持續偵測溫度誤差訊號，並微調其輸出功率，以求溫度誤差在預設偏差值(Atr)參數內，即 $|PV-SP| \leq Atr$ 。若發生溫度震盪幅度大於觸發溫度(Atr)參數數次，溫控器則會重新計算並給對硬體做 P/I/D 值更新，以降低控溫程序中的溫度震盪幅度和震盪次數。

Adaptive-tune 中 Atr 參數可透過硬體自動給定，或由使用者透過前置面板手動輸入，其可給定之範圍為硬體 Span 溫度的 0.1~25%，約為 1.6~400°C，且 Atr 參數的最低溫度設定值為 1°C。

Adaptive-tune PID 演算適合在需要頻繁改變其控溫參數(Set-points)或時常改變其輸出負載(Output loads)的條件下使用。若製程溫度控制中無法忍受自動演算法(Self-tune)的 ON/OFF 溫度控制模式，Adaptive-tune 提供使用者另一種演算法選擇。一般來說，由於 Adaptive-tune 的 PID 演算控制為持續計算出最佳 P/I/D 值以抑制溫度震盪幅度及震盪次數，即限制設定與讀取溫度偏差值在特定範圍內。

而由於其持續執行 PID 演算之故，所以 Adaptive-tune 在各個製程溫度較 Self-tune 演算更能擁有較佳的溫度震盪控制；如果溫控器輸出負載端時常更換(例如：時常更動加熱系統)或製程溫度變化頻繁的情形下，Adaptive-tune 較 Self-tune 適合該使用條件。由於 Adaptive-tune 持續演算其 P/I/D 值，且輸出不以 ON/OFF 的方式控制溫度，故與 Self-tune 比較起

來，Adaptive-tune 控制較不易快速到達設定溫度。

註：Adaptive-tune PID 控制中，由於 PID 會持續隨著控溫程序做變化，故 P_b ， t_i ， t_d 參數不能以手動方式給定。

C-3-4 【執行 Adaptive-tune】

與 Self-tune 不同，Adaptive-tune 並不需要在溫控器硬體搭配程式執行控溫參數前預先操作，且也不需設定執行 Tune 程序的溫度點。Adaptive-tune 可在系統程式實際執行磊晶菜單指令時，即配合控溫參數執行 PID 演算控制。如果使用者要自行設定 A_{tr} 參數，在執行 Adaptive-tune 程序前，即溫控器處於閒置狀態時，按下"Scroll"按鍵數次，直到次螢幕出現 A_{tr} 字樣，再利用 \triangle 或 ∇ 按鍵設定之。如果只需硬體自行設定 A_{tr} 參數，設定完製程菜單參數後，請依下列 5 點步驟依序執行。

1. 按下"Scroll"按鍵約 3 秒後進入手動設定組態，顯示幕出現 Pr1 字樣，短按"Scroll"按鍵數次跳到次顯示幕顯示"AT"字樣，同時按下 \triangle 及 ∇ 鍵，此時顯示幕上方出現黃色"A-T"字樣，此時溫控器進入 Adaptive-tune 設定起始程序。
2. 系統控制程式載入要執行的磊晶菜單，此時開啟 RF 電源。
3. 溫控器此時即開始執行 Adaptive-tune PID 演算控制。
4. 使用者可自行決定何時要中止 Adaptive-tune 程序，若無嚴重的溫度控制偏差，一般建議待菜單步驟執行至自然降溫狀態時，再手動終止 Adaptive-tune。
5. 若要終止 Adaptive-tune 程序，請重複執行步驟 1.，待次螢幕中黃色"A-T"字樣消失後，Adaptive-tune 程序旋即結束。溫控器此時仍會執行控溫參數(即執行內部的溫控程式)，使用者此時可依當下情況決定是否關閉 RF 電源。

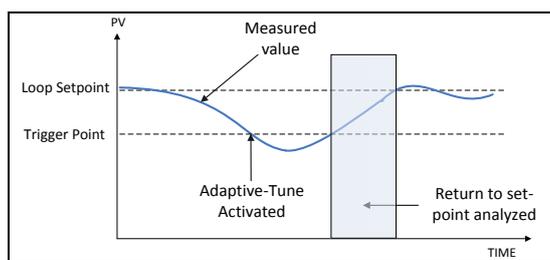


圖 C-9 典型 Adaptive-tune 演算程序

C-3-5 【手動(Manual)設定 P/I/D】

P/I/D 參數亦可藉由 Ziegler-Nichols 方法手動設定。如要手動設定請依序執行下列 8 點步驟。

1. 在執行手動設定 PID 值之前，在溫控器處於閒置狀態下，先按下前置面板"Scroll"按鍵數次，跳至 ti 及 td 參數選單，並將 ti/td 參數設定為 Off。
2. 載入 "PID Auto-tune" 的 (.txt) 檔，待控制程式中狀態描述 (State Description) 視窗出現 "System is ready for PID Auto-tune." 時，開啟 RF 電源。(使用者可根據其需求事先更動菜單內的預設參數值，如載流氣體總類、通入腔體的總氣體流量、腔體壓力等參數。)
3. 調整前置面板△或▽鍵，任意設定 SP1 溫度值(ex：600°C)，待溫度讀取值到達 SP1 設定值時，使用者可藉由溫控器溫度偏差值(PV-SP)或 RF 輸出功率比例變化，來觀察此時加熱系統是否處於不穩定狀態(即溫度持續發生震盪而不能穩定在設定值)。
4. 按下"Scroll"按鍵約 3 秒後進入手動設定選單，再按下"Scroll"按鍵數次跳至"Pd"設定選單，按下△或▽鍵，記錄下目前 Pb 值；及記錄下此時溫度變化的震盪週期(Oscillation period, T)，結束後關閉 RF 電源並按下△或▽鍵將溫控器 SP1 設定值設為 5°C。
5. 待溫度降至低於 300°C 時，按下系統控制程式前置面板中"ABORT PROCESS"按鈕，強制系統載入安全模式(Safety state)。此時系統載流氣體切換成 N₂/3SLM。
6. 中止系統控制程式，載入"Purge recipe(N2)"的(.txt)菜單。待菜單中預

設時間執行完畢，按下控制程式前置面板中"Main Pump switch"按鈕，關閉真空泵浦開關。

7. 待溫度降至室溫，使用者可根據 PID 控制需求(i.e. P/I or P/D or PID Control)，利用表 C-6 所列參數設定其對應的 P/I/D 值。
8. 手動輸入 PID 值方法為按下"Scroll"按鍵約 3 秒後進入手動設定選單，按下"Scroll"鍵跳至 Pd 選單，再按下△或▽調整鍵將其 Pb 數值輸入，再按下"Scroll"鍵跳至 ti、td 選單中將 I、D 值輸入。

Final control loop type	Set-point of controller parameters for critical damping		
	Proportion band(Pb)	Integral time constant(ti)	Derivative time constant(td)
P Proportional only	2XP1	--	--
P+I Proportional plus integral	2.2XP1	0.8T	--
P.I.D Three terms	1.67XP1	0.5T	0.12T

表 C-6 手動設定 P/I/D 參數對應表

C-3-6 【Cutback 參數】

Eurotherm 818P 提供上述 3 種 PID 演算控制，即自動演算(St)、被動演算(At)、手動 PID 值輸入等溫度控制方法。如果在上述 PID 控制中未能有效降低溫度震盪幅度或在 PID 演算控制後仍產生無法接受的過衝量(Overshoot)或下衝量(Undershoot)^註，如圖 C-10 所示；此時可藉由調整 Cutback 輔助參數來達到最佳的穩定狀態控制。

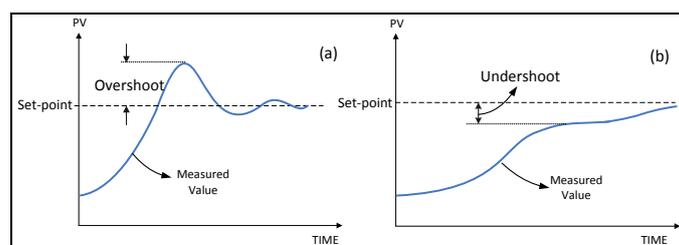


圖 C-10 溫度過衝(Overshoot)(a)及下衝(Undershoot)(b)現象

在溫控程序的控制演算中，為求快速到達設定溫度，若讀取溫度與設定

溫度的偏差量(即 $|PV-SP|$ 值)過大時，溫控器通常會以最大輸出功率(100%)加熱或以最低輸出功率(0%)降溫；而當讀取溫度逐漸靠近設定溫度，即溫度偏差值變小，此時控制進入 PID 演算控制區間。由於 PID 控制是根據輸入/輸出誤差值以決定降低誤差值的輸出量，故當溫度偏差值縮小至某一範圍時，溫控器會開始修正其輸出功率，而不再以最大輸出功率升溫或最低輸出功率降溫，如此藉由 ON/OFF 及 PID 演算控制來達到快速且精準的溫度控制。硬體作 PID 演算時，即會定義該 PID 演算溫度區間，當讀取溫度與設定溫度之偏差值在此定義的區間內，溫控器即作 PID 演算控制；若偏差值在此區間以外則為 ON/OFF 控制。圖 C-11 即顯示該 ON/OFF 配合 PID 演算的溫度控制模式。

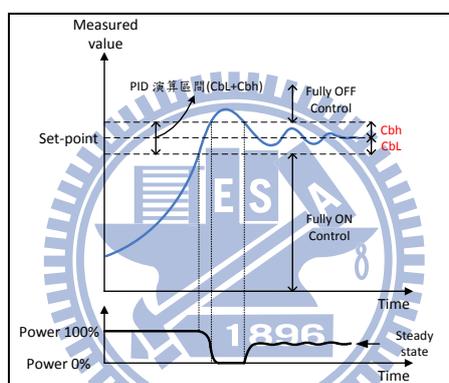


圖 C-11 典型 ON/OFF 配合 PID 演算方式的溫度控制模式

若溫控器 PID 演算控制產生過量的溫度過衝量或下衝量時，一般可能原因為進入 PID 演算控制的定義溫度區間過小，以致於 ON/OFF 控制致使溫度產生過大的過衝量或下衝量，而溫控器內部所提供的 Cutback 參數即為方便使用者彈性設定該 PID 演算區間。在溫控器中，Cutback 參數定義為溫控器開始修正(Cutting back)其輸出功率(即進入 PID 演算)的溫度偏差值上/下限區間，使用者可藉由修正該 PID 演算控制區間(即 Cutback 參數)來改善溫度過衝量或下衝量過大的問題。如果溫度控制產生較大的過衝或下衝量，則可將此 PID 演算溫度區間擴大；不過相對地，擴大 PID 演算區間可能會導致溫度變化較為緩慢。在溫控器硬體執行 Self-tune PID 演算後，硬體會自動獲得 1 組 CbL/Cbh 參數，其中 CbL 參數即為讀取溫度與設定溫度偏差值的下限區間；而 Cbh 參數即為讀取溫度與設定溫度偏差值的上

限區間，所以(CbL+Cbh)值即為溫度 PID 演算控制區間，如圖 C-11 所示。

Eurotherm 818P 硬體 Cutback 參數分為 CbL 及 Cbh 等 2 種設定參數。若使用者在調升溫度過程產生如圖 C-10 中的過量溫度過衝或下衝現象時，則可修正 CbL 參數；反之若在調降溫度過程產生過量溫度過衝或下衝現象，則可修正 Cbh 參數。兩者參數設定條件不同，詳細設定如下文所述。

註：過大的過衝量(Overshoot)或下衝量(Undershoot)一般發生於讀取溫度值第 1 次由起始值靠近其設定值(Approach set-point from large offset)，亦即震盪的最大振幅。

【Cutback 參數初步設定】

若在調升或調降溫度時產生溫度過衝或下衝現象，可先初步設定 $cbL=cbh= 0.01 \times Pb(\%) \times \text{Instrument span}(1600^\circ\text{C})$ 。其中 Pb(%)值即為此時 Self-tune PID 控制中的 Pb 參數。Cutback 參數初步設定即為更新原先 Self-tune PID 演算所得的溫度演算控制區間(CbL+Cbh)。如果上述的 CbL 及 Cbh 新設定值在溫度控制上仍產生不可接受的過衝量或下衝量，使用者可根據當下狀況個別設定 CbL 或 Cbh 參數。若為溫度調升過程，則參考下文中[CbL 參數設定方法]；若為溫度調降過程，則參考下文中[Cbh 參數設定方法]。

註：Instrument span 為溫控器硬體輸入端的熱電偶最大可測定溫度值，WK2008 加熱系統所使用的熱電偶為 R-Type，其硬體最大 Span 為 1600°C。

【CbL 參數設定方法】

CbL 參數為在溫度調升過程中可供使用者作設定的參數，其中設定狀況可分為當溫度控制發生過衝或下衝等 2 種現象，而 CbL 參數值針對這 2 種現象個別有其設定條件及方法，詳細內容如下文所述。

『溫度過衝(Overshoot)』

在溫度調升過程中，若使用者在初步設定完 CbL 及 Cbh 參數後若仍發生如圖 C-10(a)的溫度過衝(Overshoot)現象，則可將 CbL 參數重新設定為： $CbL= 0.01 \times Pb(\%) \times \text{span}(1600) + \text{overshoot}(^\circ\text{C})$ ，亦即修正 PID 演算的溫度下

限值，俾使溫度控制能及早進入 PID 演算控制區間，以抑制溫度過衝量。在該狀態下的 CbL 設定如圖 C-12 所示，當讀取溫度上升到與設定溫度的偏差值進入 CbL 所設定的溫度下限區間內，溫控器即開始作 PID 演算控制。而 PID 演算控制的溫度區間上限值(Cbh 參數)則維持先前的初始設定。

註：Overshoot 定義為設定溫度與讀取溫度的最大偏差量，也就是設定溫度減去讀取溫度的最大絕對值， $|SP-PV|_{max}$ ；圖 C-12 為 Overshoot 及 CbL 參數設定值範圍示意圖，CbL 值大於 Overshoot 量。

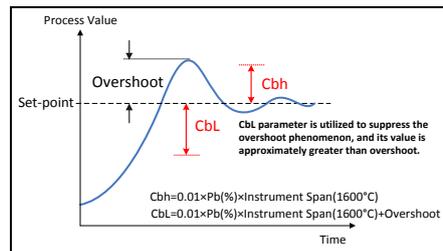


圖 C-12 溫度控制產生過衝(Overshoot)現象時 CbL 參數設定值示意圖

『溫度下衝(Undershoot)』

在溫度調升過程中，若在初步設定完 CbL 及 Cbh 參數後若仍發生如圖 C-10(b)的下衝(Undershoot)現象，即讀取溫度遲遲未能到達設定溫度值；此時使用者可將 CbL 參數值重新設定為： $CbL=0.01 \times Pb(\%) \times span(1600) - undershoot(^{\circ}C)$ ，亦即修正 PID 演算的溫度下限值，延緩溫度控制進入 PID 演算控制區間，利用 ON/OFF 控制加速升溫，以抑制溫度下衝現象。在該狀態下的 CbL 設定如圖 C-13 所示，當讀取溫度與設定溫度偏差值進入 CbL 所設定的溫度下限區間內溫控器即開始作 PID 演算控制。而 PID 演算控制的溫度區間上限值(Cbh 參數)則維持先前的初始設定。

註：Undershoot 也定義為設定溫度減去讀取溫度的最大絕對值，即 $|SP-PV|_{max}$ ；不過此時設定溫度高於讀取溫度，圖 C-13 為 Undershoot 及 CbL 參數設定值範圍示意圖，CbL 值一般低於 Undershoot 量。

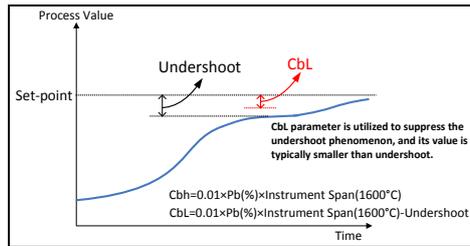


圖 C-13 溫度控制產生下衝(Undershoot)現象時 CbL 參數設定值示意圖

【Cbh 參數設定方法】

Cbh 參數為在溫度調降過程中可供使用者作設定的參數，其中設定狀況可分為當溫度控制發生過衝或下衝等 2 種現象，而 Cbh 參數值針對這 2 種現象個別有其設定條件及方法，詳細內容如下文所述。

『溫度過衝(Overshoot)』

在溫度調降過程中，若使用者在初步設定完 CbL 及 Cbh 參數後若仍發生如圖 C-14(a)的溫度過衝(Overshoot)現象，則可將 Cbh 參數重新設定為：
 $Cbh = 0.01 \times Pb(\%) \times span(1600) + overshoot(^{\circ}C)$ ，亦即修正 PID 演算的溫度上限值，在該狀態下的 Cbh 設定範圍如圖 C-14(a)所示，當讀取溫度下降到與設定溫度的偏差值進入 Cbh 所設定的溫度上限區間內，溫控器即開始作 PID 演算控制。而 PID 演算控制的溫度區間下限值(CbL 參數)則維持先前初始設定。

『溫度下衝(Undershoot)』

在溫度調降過程中，若在初步設定完 CbL 及 Cbh 參數後若仍發生如圖 C-14(b)的下衝(Undershoot)現象，此時使用者可將 Cbh 參數值重新設定為：
 $Cbh = 0.01 \times Pb(\%) \times span(1600) - undershoot(^{\circ}C)$ ，亦即修正 PID 演算的溫度上限值，延緩溫度控制進入 PID 演算控制區間，利用不輸出加熱功率(0%)的方式加速降溫，以抑制溫度下衝現象；在該狀態下的 Cbh 設定範圍如圖 C-14(b)所示。而 PID 演算控制的溫度區間下限值(CbL 參數)則維持先前初始設定。

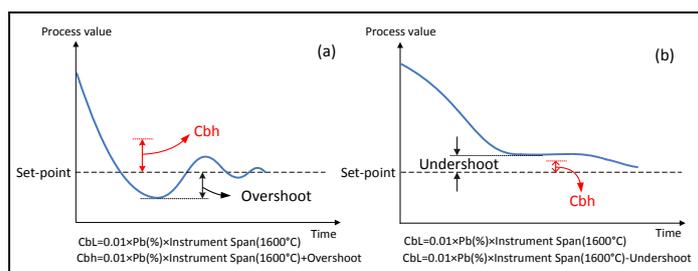


圖 C-14 起始溫度高於設定溫度時的 Cbh 設定示意圖

WK2008 加熱系統中上下 2 台 Eurotherm 818P 溫度控制器皆使用 Self-tune 的 PID 演算方式來達到溫度控制，其上(↑)溫度控制器最大 Overshoot 為 4°C，下(↓)溫度控制器最大 Overshoot 為 4°C；系統中個別硬體參數設定如表 C-7 所列。

WK2008 磊晶系統中溫度控制器相關硬體參數設定		
Parameters	Temp.controller ↑	Temp.controller ↓
Atr	5.00°C	25.28°C
Pd	3.6%	4.2%
Ti	22sec	31sec
Td	3.7sec	5.1sec
CbL	50.7°C	38.4°C
Cbh	OFF	58.7°C
Hl	80%	80%
Cr	10	0.2
CL	0%	0%
Cc	1.8sec	0.5sec
Sbr	0%	0%
SP1	5°C	5°C

表 C-7 WK2008 加熱系統上下溫度控制器相關硬體參數設定值

註：表 C-7 中的硬體參數除了 Hl、CL、Sbr、SP1 等值為固定預設值外，其餘參數僅供參考，使用者可根據 Self-tune 將 PID 控制參數做更新。

C-4 Eurotherm 818P 硬體內部組態功能設定

Eurotherm 818P 硬體前置面板基本手動操作主要為調整內部硬體的程式設定，包含控溫程式中所有參數、PID 控制及輔助參數、輸出上下限功率比例、預設溫度(SP1)等參數設定；至於硬體輸入(溫度計)設定、輸出(加熱器/冷卻器)電壓/電流範圍、輸出埠加熱/降溫為 ON/OFF 或 PID 控制設定、

警告函數定義、升/降溫速率單位設定、硬體可供設定及顯示的溫度範圍設定、通訊協定模式(RS-232/RS-485)設定、通訊格式編碼設定(Message format)等內部組態參數；需在特殊硬體變更狀態(Configuration modification Enable switch)下，使用者方能手動調整之。

C-4-1 【Eurotherm 818P 內部組態檢視】

Eurotherm 818P 硬體內部組態參數 C1~C8 是利用記憶字元(Mnemonic character)以"ABCD"這 4 個字元依序呈現，個別字元代碼有其相對應的特定代表意義；使用者可透過 Eurotherm 818P 硬體前置面板的"Scroll"按鍵來檢視內部組態參數 C1~C8，在該檢視模式下，C1~C8 字元為唯讀(Read only)狀態，使用者不可任意更動 ABCD 參數，檢視方法如下 4 點所示。

1. 按下前置面板"Scroll"按鍵數次，跳往 Sbr(Sensor break)設定選單。
2. 此時次螢幕出現 Sbr 字樣，同時按下"Scroll"及▽按鍵，此時次螢幕即出現組態參數記憶字元"C1"字樣，進入硬體組態參數檢視選單。
3. 按下△或▽按鍵，即可檢視 C1 記憶字元的 ABCD 值。
4. 如要檢視 C2~C8 值再按下"Scroll"按鍵即可，相同地，按下△或▽按鍵即可檢視記憶字元的 ABCD 設定值。

表 C-8 列出 Eurotherm 818P 內部硬體中個別組態記憶字元 C1~C8 所對應的設定功能。

註：相關 C1~C8 之 ABCD 參數個別意涵，請參閱 EUROTHERM 818 Controller-Programmer 文件中 p.34~p.42 內容；其餘的組態記憶字元請逕自參閱 EUROTHERM 818P Engineering Manual 文件。

MNEMONIC	FUNCTION
C1	Input, CJC, units and ti+td times
C2	VP, PID or on/off, outputs and power feedback
C3	Alarm definitions
C4	Digital inputs, ADC and security definition
C5	Communications
C6	Controller options
C7	Communications type and input output

C8	Programmer options
idn	Output hardware definition
dsL	Low limit of display range
dsh	High limit of display range
SPL	Low limit of main set-point
SPh	High limit of main set-point
S2L	Low limit of second set-point
S2h	High limit of second set-point
Ah1	Alarm hysteresis AL1
Ah2	Alarm hysteresis AL2
Add	Instrument address
C1L	Low calibration of output 1 when analogue
C1h	High calibration of output 1 when analogue
C2L	Low calibration of output 2 when analogue
C2h	High calibration of output 2 when analogue
C3L	Low calibration of output 3(alarm 1) when analogue retransmission.
C3h	High calibration of output 3(alarm 1) when analogue retransmission.
rOL	Low calibration of analogue comms. outputs.
rOh	High calibration of analogue comms. outputs.
rrL	High limit of retransmission output (Eng units)
rrh	Low limit of retransmission output (Eng units)

表 C-8 Eurotherm 818P CONF 可作變更的參數功能說明

C-4-2 【Eurotherm 818P 內部組態變更的硬體設定步驟】

Eurotherm 818P 硬體提供多組可變更的內部組態(Configuration)供使用者設定，如需變更組態，請依序執行下列 8 項步驟。

1. 切斷 110VAC 交流電源，由硬體側邊將 818P 模組從外框架移除，拆開後硬體後視圖如圖 C-15 所示(圖為 Temp.(Ref)溫控器)；

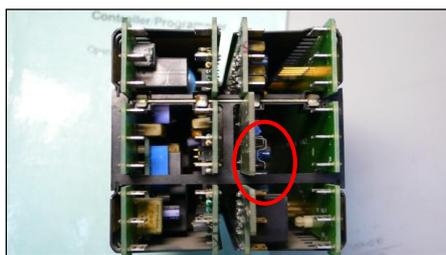


圖 C-15 Eurotherm 818P 硬體後視圖(Temp.(Ref))

Eurotherm 818P 共有 4 張 IC 板構成，由左至右分別為電源供應板(Power supply board)、通訊傳輸板(Communication board)、微處理器板(Microprocessor board)、標準選購板，其中溫控器輸出埠 1 嵌在電源供應板上；Eurotherm 818P 個別 IC 板功能如圖 C-16 所示。

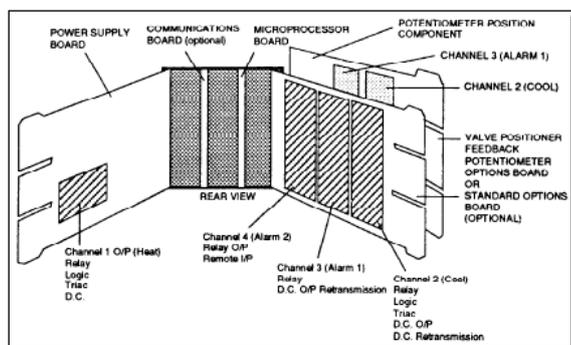


圖 C-16 Eurotherm 818P 硬體內部 IC 板配置及功能示意圖(後視)

- 圖 C-15 中紅色圓圈處即為位於微處理器板上的藍色組態鉤環 (Configuration switch)，將其鉤環勾上，如圖 C-17(b)所示；即進入硬體內部組態變更模式。



- 將 Eurotherm 818P 硬體裝上外框架，開啟 110VAC 交流電源。
- 此時顯示螢幕上方出現"CONF"字樣，次螢幕出現記憶字元 C1，如圖 C-18，按下△或▽鍵即可開始調整 C1 的 ABCD 值^{註1}。



圖 C-18 Eurotherm 818P 進入組態變更視窗

- 按下"Scroll"按鍵跳到下一組參數做變更，RUN/HOLD 按鍵為跳往上一組參數。
- 如有外加輸出模組(Optional module)或通訊介面模組時，請按下

"Scroll"按鍵跳到"idn"^{註2}設定，並同時按下△及▽按鍵。

7. 當所有參數已變更完畢，按"Scroll"按鍵數次跳到"CLr"參數，並同時按下△及▽鍵，次螢幕中 CLr 字樣右上方會有綠色點閃爍，代表硬體參數變更完畢且已儲存；此步驟至為重要，如沒有執行此步驟，當 818P 回復至不能變更組態模式(組態環未勾上)時，818P 顯示幕會出現閃爍的"C En"錯誤訊息^{註3}。



圖 C-19 Eurotherm 818P 組態變更儲存視窗

8. 切斷 110VAC 電源，將 818P 硬體模組從外框架移除，勾開組態鉤環 (Configuration switch)，組態變更完畢^{註4}，Eurotherm 818P 硬體回復至內部組態參數唯讀模式。

表 C-9 列出 WK2008 加熱系統中 Eurotherm 818P 溫控器硬體內部設定的 C1~C8 參數，及其他記憶字元個別對應的 ABCD 組態代碼。

溫控器 ID	Temp.↑	Temp.↓
組態代碼	ABCD	ABCD
C1	0004	0004
C2	0002	0002
C3	0000	0000
C4	1155	1155
C5	0000	0000
C6	1100	1100
C7	0100	0100
C8	1004	1004
dsL	0	0
dsh	1600	1600
SPL	0	0
SPh	1200	1200
idn	0004	0004

表 C-9 Eurotherm 818P C1~C8 組態記憶字元設定

註 1：記憶字元 C1~C8 之參數以"ABCD"字元呈現，個別參數值有其特定代表意義，且在 CONF 模式下無設定時間的限制，參數會持續保留直到切換到下一組參數。如果有無效的參數輸入，次螢幕字幕會顯示"E"字樣，直到變更為有效參數。

註 2："idn"組態參數為硬體輸出模組定義，idn 記憶字元 ABCD 代碼意義請參閱 EUROTHERM 818 Controller-Programmer 文件中 p.34 內容。

註 3：相關錯誤訊息判定及排除請參閱 C-4-4【錯誤碼】。

註 4：相關 C1~C8 之 ABCD 參數個別意涵，請參閱 EUROTHERM 818 Controller-Programmer 文件中 p.34~p.42 內容。

註 5：Eurotherm 818P 組態記憶字元 C2(D)設定為 2，即 PID heat/PID cool(Non-linear)；當系統配置有水冷冷卻系統(Water cooling system)，則將 PID cool 設定為 Non-linear 模式。

註 6：WK2008 加熱系統中，上、下 2 台溫控器輸出端熱電偶為 R Type，Eurotherm 818P 硬體組態參數 C1(CD)即為調整輸入端型態，(04)→R。

註 7：WK2008 系統中上、下 RF 加熱的 Eurotherm 818P 硬體皆沒有配置 "Optional board"(位於最右邊的插槽)，所以硬體並不提供 2 組警告函數輸出、輸出埠 2 輸出設定等功能。

註 8：Eurotherm 818P 原廠相關硬體資料存放於系統工業電腦 D 槽：磊晶系統資料\WK2008 System Files\WK2008--系統溫度控制器 EUROTHERM 818P 的資料夾中。

C-4-3 【Eurotherm 818P 硬體輸入(溫度計)組態設定】

Eurotherm 818P 硬體中的輸入組態設定，即設定輸入端的熱電偶為 K、R、T、S 等型態或為其他種類的光學溫度計(Optical Pyrometer)等。WK2008 加熱系統中溫控器所使用的輸入源為 R Type 的熱電偶，即為將 C1 組態記憶字元代碼設定成 0004。詳細的硬體輸入端組態記憶字元代碼 C1 設定請逕自參閱 EUROTHERM 818 Controller-Programmer 文件中 p.34 內容。表 C-10 列舉出數樣輸入硬體(熱電偶與光學溫度計)與組態記憶字元 C1(CD)

代碼對應。

Eurotherm 818P			
硬體輸入(溫度計)組態參數 C1(CD)的設定值與其硬體對應表			
C1(CD)代碼	硬體(熱電偶)	C1(CD)代碼	硬體(光學溫度計)
00	J	35	IVD1
01	J DIN	36	FP/GP 10
02	K	37	FP/GP 11
03	T	38	FP/GP 12
04	R	39	FP/GP 20
05	S	40	FP/GP 21
06	T		

表 C-10 Eurotherm 818P 硬體輸入組態參數 C1(CD)設定值與其硬體對應表

C-4-4 【Eurotherm 818P 硬體直流輸出參數變更設定】

WK2008 磊晶系統中 Eurotherm 818P 溫控器硬體預設輸出型態為直流電壓輸出，其範圍為 0~10V。在 Eurotherm 818P 硬體組態參數中，C1L 及 C1h 這 2 個記憶字元(Mnemonic)與溫控器的直流輸出範圍設定有關。由於個別系統中所使用的加熱器/冷卻器有其獨特的輸入控制訊號格式(電壓或電流控制)^註及操作範圍，使用者可藉由調整 C1L 及 C1h 記憶字元參數值，針對其加熱/冷卻系統中的硬體直流輸入控制訊號作範圍校正，俾使加熱/冷卻系統正常運作。

由於 WK2008 磊晶系統中所使用的 RF 高週波加熱器有最小輸入工作電壓限制，約為 0.2VDC，而 RF 高週波加熱器於全功率(100%)輸出的輸入控制電壓為 5VDC，所以必須調整 818P 的最低/最高輸出範圍(Low/High output range)，又 818P 只有 1 組輸出，且為直流電壓輸出，所以使用者只需調整輸出埠 1(Output 1)的輸出電壓範圍。Eurotherm 818P 硬體中 C1h 及 C1L 組態參數提供溫控器硬體輸出埠 1 的高/低輸出位準校正功能，且 C1L 及 C1h 皆定義為硬體最高輸出電壓/電流的百分比例(%)，以溫控器 0~10VDC 的輸出組態而言，根據系統 RF 高週波加熱器直流輸入電壓需求 Min：0.2V、Max：5V，則設定溫控器的組態參數 C1h=50%，C1L=2%。

註：Eurotherm 818P 溫控器硬體代碼(0V10)代表輸出直流電壓範圍為 0~10VDC，

詳細 C1h、C1L 參數設定請參閱 EURO THERM 818P Engineering Manual 文件中 Chapter 4-6 To Change the Heat or Cool Output；此外在該文件中 4-6 節中也有提到改變輸出模式為直流電壓或電流的方法，其方法為更動位於電源供應板上的 LK1V 及 LK2V 指撥開關，如圖 C-20(a)~(b)所示，實際接腳位置如圖 C-20(c)所示。且注意若將 4mA20 輸出更換成直流電壓輸出，滿刻度電壓需再重新量測，一般約為 15V，不過其類比輸出線性關係仍然存在，使用者可藉由調整 C1h、C1L 參數來調整之。

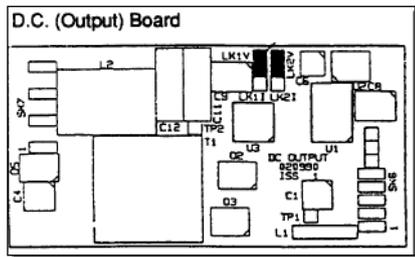


圖 C-20(a)輸出為直流電壓

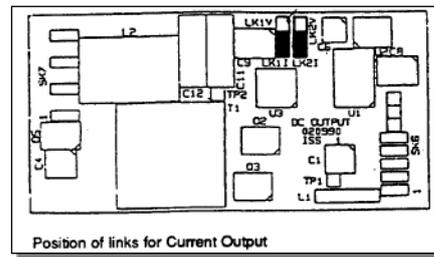


圖 C-20(b)輸出為直流電流



圖 C-20(c)實際接腳位置(紅色圈選處)，目前為電壓輸出

C-4-5 【Eurotherm 818P 數位通訊組態設定】

WK2008 加熱系統中 Eurotherm 818P 硬體配置有通訊傳輸板，與通訊設定相關的記憶字元包括 C5(A)、C6(D)；Eurotherm 818P 硬體預設的數位通訊波特率為 9600bps，通訊編碼為 ASCII Bi-Synch 格式。

Eurotherm 818P 硬體提供 RS-232 及 RS-485(422)兩種通訊協定，而這 2 種通訊協定可透過通訊傳輸板上的接腳短路切換做設定，如圖 C-21 中紅色圓圈所示；

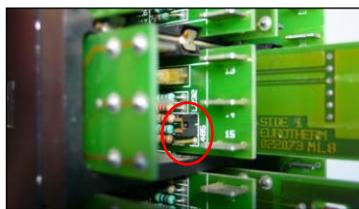


圖 C-21 Eurotherm 818P 硬體通訊板上通訊協定切換腳位

WK2008 系統中 Eurotherm 818P 硬體預設通訊協定為 RS-232，即將最上方

相鄰的 2 個接腳短路，圖 C-22 為 Eurotherm 818P 硬體 RS-232/RS-485 通訊協定切換相對應的短路腳位設定。

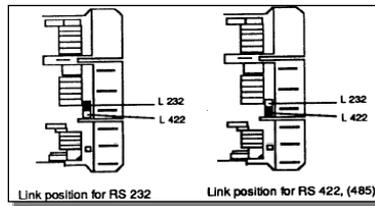


圖 C-22 Eurotherm 818P 硬體 RS-232/485 切換對應短路腳位示意圖

C-4-6 【Eurotherm 818P 錯誤碼】

表 C-11 列出 Eurotherm 818P 溫控器硬體的內部錯誤碼代表意義及其錯誤更正動作，一般較常發生 "Or" 及 "C En" 錯誤狀況。

錯誤碼	意義	更正動作
Or	熱電偶斷路或短路	檢查熱電偶電路正負端接點是否正常。
C En	組態變更結尾錯誤	在組態變更狀態下切換至 "CLr"，再同時按下 Δ 和 ∇ 按鍵。
C Er	組態參數值設定錯誤	重新輸入符合格式的組態參數值。
C ch	組態參數 checksum 值錯誤	重新輸入符合格式的組態參數值。
H Er	硬體本體錯誤 (Identity error)	確認輸出模組確實安裝，之後組態變更模式下切換至 "idn"，再同時按下 Δ 和 ∇ 按鍵。
P ch	參數之 checksum 值錯誤	重新輸入符合格式的組態參數值。

表 C-11 Eurotherm 818P 錯誤碼一覽表

註：除了 "Or" 錯誤碼外，其餘所有的錯誤更新必須在組態變更狀態下重新設定組態參數，且完成設置後，需切換至 "CLr"，再同時按下 Δ 和 ∇ 按鍵，以確定完成組態變更設置。

C-5 Eurotherm 818P 溫度控制器之 RS-232 通訊

C-5-1 【Eurotherm 818P 遠端電腦控制】

使用者除了透過前置面板手動設定 Eurotherm 818P 相關硬體控溫參數外，亦可透過 RS-232 通訊介面藉由通訊指令對溫控器作寫入及讀取動作。在寫入指令的部份，一般來說，控溫參數包含升/降溫速率 (Ramping rate)、設定溫度 (Ramp level)、停留時間 (Dwell time) 都是經由遠端通訊寫入硬體中，在

遠端通訊的模式下，由於可重複寫入控溫參數，所以溫控器就無可供設定程式數目限制(在手動模式下溫控器最多提供120組控溫參數設定)，所以使用者可更有彈性得設定控溫參數。此外不同的工作溫度區間有其最佳的PID演算控制參數，以獲得溫度穩定控制，使用者可事先藉由溫控器手動模式執行自動PID演算(Self-tune)，用以擷取特定溫度工作點的P/I/D值及Cutback輔助參數，之後可再利用遠端通訊將這些PID演算控制參數依序寫入溫控器中，以便利用遠端通訊達到在整個製程過程中的穩定溫度全自動控制。不過需注意的是Self-tune及Adaptive-tune這2樣溫控器PID演算控制執行只能透過前置面板手動操作。

在讀取指令部份，一般來說，目前設定溫度(Set-point, SP)、目前操作溫度(Process value, PV)、目前輸出功率(Output power)等3個參數最需要受到監控，故在WK2008系統控制程式中，溫控程式只單讀取這3樣參數數值。此外，溫控器也提供許多指令供使用者利用，在使用前指令前須先確定其指令屬性為可供讀取/寫入(Read/Write)或唯讀屬性(Read only)，詳細之Eurotherm 818P硬體提供的指令及其屬性請參閱表C-12 Eurotherm 818P 通訊指令碼。

【寫入P/I/D值參數】

在 WK2008 磊晶製程中，若使用者給定特定的升/降溫速率，此時溫度控制為使用先前執行 Self-tune 過程中所獲得 P/I/D 值及輔助參數，然而這些參數值已儲存於溫控器中，故在該情形下並不需要再度將 PID 演算控制參數寫入溫控器中。但在某些製程溫度控制上，例如成長量子井(Quantum Well)結構中的覆蓋層(Barrier)時，為降低主動層的脫附(Desorption)效應，通常會要求以最快速率升溫，如綠光 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QWs： $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0.2-0.3$) Active layer 成長溫度約為 600~800°C，GaN Barrier layer 成長溫度約為 700~850°C；為配合此特殊製程過程，使用者必須在實際成長前，預先模擬該製程條件並利用手動方式執行 Self-tune PID 演算^{註1}，以獲得相關穩定溫度控制的 PID 演算參數，由於 Self-tune 的 PID 演算參數為符合快速到

達並穩定於設定溫度的最佳控制參數，故使用者可利用 Self-tune 演算法獲得該條件下的最佳 PID 參數。使用者可透過磊晶菜單中的 Step 控制指令^{註2}，在該設定溫度條件下將已獲得的 P/I/D 值及 Cutback 參數寫入溫控器中，以獲得快速且穩定的最佳溫度自動控制。詳細菜單中溫度控制指令設定請參閱 B-4 菜單編譯程式。

註1：執行Self-tune方式請參閱C-3-2執行Self-tune章節內容。此外在執行完PID自動演算後，需將Pd、Ti、Td、CbL、Cbh、Cr、Cc等7樣參數記錄下來供後續程式寫入PID控溫參數用。

註2：菜單中溫度控制Step指令嵌於菜單指令欄(Command column)中，其中分為上/下溫控器個別溫度控制Step指令，詳細菜單指令設定請參閱B-4 菜單編譯程式。當使用者下達設定溫度Step指令，系統程式會將升/降溫率(Ramp rate)設定為Step，並將需求溫度值寫入設定溫度值(Ramp level)，停留時間(Dwell time)設定為0；除了控溫參數外，系統程式也會將使用者輸入的PID控溫參數再依序寫入硬體中，詳細溫控程式設計請參閱附錄B 附錄B-8 VIIA-2-6 溫度控制器 (Eurotherm)溫控程式設計。

C-5-2 【Eurotherm 818P 通訊指令格式】

WK2008加熱系統中Eurotherm 818P是利用RS-232做為硬體的通訊介面，且資料是以16位元(Bit)的ASCII code編碼來做傳輸，當控制電腦端(Master)透過LabVIEW作業平台經由RS-232通訊介面傳送0/1訊號給Eurotherm 818P溫控器(Slave)時，其建立的通訊格式如下：

C-5-3 【讀取指令】

讀取指令格式：

(EOT) (GID) (GID) (UID) (UID) (C1) (C2) (ENQ)

指令格式分為8個字元，且字元需以16進位的表示方式作為傳輸，以下將就各別字元代表意義做說明。

1. (EOT)-- (EOT)控制字元主要為重置所有在連結上的硬體起始位元；並檢查(EOT)之後連續的4個字元(GID)(GID)(UID)(UID)，這是程式與溫

控器之間核對彼此的裝置硬體代碼是否正確，即是核對溫控器的群編號(Group ID)和位址編號(Unit Address ID)和程式上定義的是否相同。

2. (GID)-- (GID)字元代表溫控器的群編號(Group ID)，其中重複(GID)字元是作為程式重複確認用。
3. (UID)-- (UID)字元代表溫控器的位址編號(Unit Address ID)，其中重複(UID)字元是作為程式重複確認用^註。
4. (C1)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)為要下達Eurotherm 818P映體的 control 指令，其中指令代碼及其對應的功能請參閱【Eurotherm 818P指令碼】。
5. (C2)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)為要下給Eurotherm 818P之 control 指令，其中(C1)(C2)皆是以16進位的ASCII碼(HEX ASCII Code)表示之。
6. (ENQ)-- (ENQ)為整體訊息的結尾字元，代表指令下達完畢。

註：利用(GID)(UID)兩個字元組成之群編號與位址編號，可以個別定義不同的溫控器；例如：GID=3，UID=4；則該溫控器可被定義為編號34；WK2008加熱系統中2台Eurotherm 818P硬體的GID及UID編號皆為0(Chr)，Hex：30。

C-5-4 【有效的硬體回覆訊息】

當Eurotherm 818P接收到系統端的讀取指令時，Eurotherm 818P(Slave)會回傳回覆訊息(Response messages)給系統端(Master)，其有效的訊息格式如下：

有效的回覆訊息格式：

(STX) (C1) (C2) (D1) (D2) (D3) (D4) (D5) (ETX) (BCC)

1. (STX)-- 起始字元(Start of Text)。
2. (C1)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)為溫控器回覆給系統的控制指令。
在Eurotherm 818P的控制指令中，有分為唯讀指令及可供讀寫的複合指令，指令屬性請參閱表C-11 Eurotherm 818P硬體通訊指令碼中的指令屬性(Attribute of mnemonic parameters)。
3. (C2)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)字元為溫控器回覆給系統的控制

指令。

4. (D1 to D5)-- Eurotherm 818P回覆系統指令的相關數值(可能會到(D6)字元)^註。
5. (ETX)-- 終止字元(End of Text)。
6. (BCC)-- 驗證字元(Block Check Character)；(BCC)該驗證字元為(C1)(C2)(D1)(D2)(D3)(D4)(D5)(ETX)所有位元的16進位ASCII碼的互斥或(EOR)邏輯，以下為其邏輯表示： $(BCC) = (C1) \text{ EOR } (C2) \text{ EOR } (D1) \text{ EOR } (D2) \text{ EOR } (D3) \text{ EOR } (D4) \text{ EOR } (D5) \text{ EOR } (ETX)$ where EOR = Exclusive OR)。

註：程式中須將讀取的16進位(Hex.)ASCII碼數值轉換成10進位(Dec.)。

C-5-5 【寫入指令】

寫入訊息指令格式：

(EOT) (GID) (GID) (UID) (UID) (STX) (C1) (C2) (D1) (D2) (D3) (D4) (D5)
(D6) (ETX) (BCC)

1. (EOT)-- (EOT)控制字元主要為重置所有在連結上的硬體起始位元；並檢查(EOT)之後的4個字元(GID)(GID)(UID)(UID)，這是要使程式與溫控器之間核對之間的裝置硬體代碼是否正確，即是核對溫控器的群編號(Group ID)和位址編號(Address ID)和程式上定義的是否相同。
2. (STX)-- 起始字元(Start of Text)。
3. (C1)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)字元為要下達溫控器的控制指令。在EUROTHERM 818P的控制指令中，有分為唯讀指令及可寫可讀的複合指令，指令屬性請參閱表C-11 Eurotherm 818P 通訊指令碼列表中的指令屬性(Attribute of mnemonic parameters)。
4. (C2)-- (C1)與(C2)組合成的(C1)(C2)字元為要下達給Eurotherm 818P之控制指令，其中(C1)(C2)皆是以16進位的ASCII碼(HEX ASCII Code)表示之。
5. (D1 to D5/6)-- 要下達給Eurotherm 818P控制指令的相關對應數值(可

能會用到(D6)字元)。例如：SP 550，即設定溫度點為550°C。(C1)=S
(C2)=P (D1)=5 (D2)=5 (D3)=0。

6. (ETX)-- 終止字元(End of Text)。

7. (BCC)-- 驗證字元(Block Check Character)。

該驗證位元為(C1)(C2)(D1)(D2)(D3)(D4)(D5)(ETX)所有字元的16進位ASCII碼的互斥或(Exclusive OR)邏輯，該位元須由系統程式端驗證後送出給Eurotherm 818P硬體。

C-5-6 【硬體回覆指令】

(1) Positive acknowledgement(ACK)

當Eurotherm 818P接收到指令後，會依以下6點作指令確認動作：

1. 確認在傳送訊息中的極性錯誤(Polarity error)是否存在。
2. 驗證傳送訊息中的(BCC)字元是否正確，溫控器內部自我演算(BCC)邏輯。
3. 驗證(C1)(C2)組合字元是否為可寫入溫控器的有效指令。
4. 驗證(D1 to D5)是否為有效數值，及是否超出可供設定的範圍。
5. 更新訊息中指令所給定的新設定值至Eurotherm 818P溫控器。
6. 當上述5點依序確認完畢後，Eurotherm 818P會傳送(ACK)訊息給系統控制端，回覆訊息代表指令格式正確，且已輸入硬體。

(2) Negative acknowledgement(NAK)

如果訊息未通過以上確認流程，Eurotherm 818P會傳送(NAK)訊息給系統端，當Eurotherm 818P回覆(NAK)訊息時，代表傳達之訊息有誤，且Eurotherm 818P中的相關參數設定值未被更新。

註：可能的錯誤為未將指令記憶字串轉換成16進位之ASCII碼，或是系統端傳達不正確的(BCC)字元(不正確的互斥或邏輯運算)。

(3) No reply

在某些情況下，系統端會沒接收到Eurotherm 818P所傳送的回覆訊息，可能的原因如下：

1. 系統程式端與Eurotherm 818P之間的群編號(Group ID)或位址編號(Unit Address ID)確認出錯。
2. 傳送的字串中有錯誤，可能為極性錯誤(Polarity check error)。
3. 硬體通訊介面出錯，可能為雜訊干擾或是未建立起通訊(例如：程式中的波特率，極性，停止位元等設定和Eurotherm 818P內部硬體設定不符)。
4. 硬體故障(Hardware Failure)。

註：在LaBVIEW程式設定中，當等待Eurotherm 818P回應時間大於160毫秒(系統程式內部預設值為145ms)，會判定為"Time-out"，亦即硬體沒回應。

C-5-7 【Eurotherm 818P指令碼】

表C-12為Eurotherm 818P硬體內部所提供的所有通訊指令碼，其中"ASCII/HEX"為指令記憶字元(MNEMONIC)的16進位ASCII碼^註，參數(PARAMETER)為說明該指令的功能，而該指令由記憶字元代替；而屬性(ATTRIBUTE)為定義該指令為唯讀(Read/Only)或為可供讀寫(Read/Write)的指令型態。

註：相關字元(Chr)的16進位(Hex)轉換對照請參閱圖C-23 HEX-ASCII Code。舉

PV來說，P的16進位ASCII代碼為50，V的16進位ASCII代碼為56。

ASCII/HEX	MNEMONIC	PARAMETER	ATTRIBUTE
50 56	PV	Measured Value	Read/Only
53 50	SP	Working Set-point	Read/Only
4F 50	OP	Output	Read/Write (R/O In AUTO)
53 57	SW	Status Word	Read/Write
4F 53	OS	'Optional' Status Word	Read/Write
58 53	XS	Extended Status Word	Read/Write
31 41	1A	Alarm 1	Read/Write
32 41	2A	Alarm 2	Read/Write
45 52	ER	Error	Read/Only
53 4C	SL	Local set-point (set-polnt1)	Read/Write
53 32	S2	Set-point 2	Read/Write
4F 31	01	Digital Output Status Word 1	Read/Write
4F 32	02	Digital Output Status Word 2	Read/Write

4F 33	03	Digital Output Status Word 3	Read/Write
4F 34	04	Digital Output Status Word 4	Read/Write
54 4D	TM	Time remaining in current program segment	Read/Only
4C 52	LR		
72 31	r1	Loops remaining for current program	Read/Only
6C 31	l1		
74 31	t1	Ramp rate 1	Read/Write
		Ramp level 1	Read/Write
		Dwell time 1	Read/Write
72 32	r2	Ramp rate 2	Read/Write
6C 32	l2	Ramp level 2	Read/Write
74 32	t2	Dwell time 2	Read/Write
72 33	r3	Ramp rate 3	Read/Write
6C 33	l3	Ramp level 3	Read/Write
74 33	t3	Dwell time 3	Read/Write
72 34	r4	Ramp rate 4	Read/Write
6C 34	l4	Ramp level 4	Read/Write
74 34	t4	Dwell time 4	Read/Write
72 35	r5	Ramp rate 5	Read/Write
6C 35	l5	Ramp level 5	Read/Write
74 35	t5	Dwell time 5	Read/Write
72 36	r6	Ramp rate 6	Read/Write
6C 36	l6	Ramp level 6	Read/Write
74 36	t6	Dwell time 6	Read/Write
72 37	r7	Ramp rate 7	Read/Write
6C 37	l7	Ramp level 7	Read/Write
74 37	t7	Dwell time 7	Read/Write
72 38	r8	Ramp rate 8	Read/Write
6C 38	l8	Ramp level 8	Read/Write
74 38	t8	Dwell time 8	Read/Write
48 62	Hb	Holdback value	Read/Write
4C 63	Lc	Loop count	Read/Write
52 52	RR	Ramp rate	Read/Write
52 49	RI	Remote input	Read/Only
48 4F	HO	Max. Heat	Read/Write
4C 4F	LO	Max. Cool	Read/Write
52 48	RH	Remote Heat Limit	Read/Only
52 43	RC	Remote Cool Limit	Read/Only

48 53	HS	Set-point 1 maximum	Read/Only
4C 53	LS	Set-point 1 minimum	Read/Only
32 48	H2	Set-point 2 maximum	Read/Only
32 4C	L2	Set-point 2 minimum	Read/Only
43 48	CH	Cycle time for channel 1	Read/Write
58 50	XP	Proportional Band	Read/Write
54 49	TI	Integral Time	Read/Write
4D 52	MR	Manual Reset	Read/Write
54 44	TD	Derivative Time	Read/Write
48 42	HB	Cutback High	Read/Write
4C 42	LB	Cutback Low	Read/Write
52 47	RG	Relative Cool Gain	Read/Write
48 43	HC	Heat Cool Dead-band	Read/Write
43 43	CC	Cool Cycle Time	Read/Write
48 32	C2	Channel 2 Cycle Time	Read/Write
50 45	PE	Pyrometer Emissivity	Read/Write
42 50	BP	Power level at sensor break	Read/Write
56 30	V0	Software Version	Read/Only
49 49	II	Instrument identity	Read/Only
31 48	1H	Display maximum	Read/Only
31 4C	1L	Display minimum	Read/Only

表C-12 Eurotherm 818P 通訊指令碼

僅部份硬體內部組態設定參數可透過RS-232通訊介面經由遠端電腦作讀取動作(Read/Only)，可供讀取的參數包含可供設定的最高/低溫度值(1H/1L)、螢幕顯示的最高/低溫度值(HS/LS)、硬體特性參數(II)等；上述讀取參數括號中英文字母代表硬體指令記憶碼(Mnemonic)。

C-5-8 【Status Word】

狀態字元(Status Word)是讀取Eurotherm 818P硬體狀態的指令，其字元大小為16位元(bit)，其指令之屬性有唯讀(Read/Only，R/O)，可供讀寫(Read/Write，R/W)及供讀取或清除用(Read/Clear，R/C)，相同的，指令也以16進位(Hexadecimal) ASCII碼傳送(0-9, A-F)。而指令格式如下所示：

SW=>ABCD

Status Word(SW)in the format(>ABCD)

DIGIT	BIT	FUNCTION	ATTRIBUTE	CLEAR/SET
D	0	Data Format	R/W	Free/Fixed
D	1	Sensor Break	R/O	No/Yes
D	2	Key Lock	R/W	Keys Enabled/Disabled
D	3	N/A	--	--
C	4	N/A	--	--
C	5	Parameter Changed via keys	R/C	No/Yes
C	6	N/A	--	
C	7	N/A	--	
B	8	Alarm 2 State	R/O	Off/On
B	9	N/A	--	
B	10	Alarm 1 State	R/O	
B	11	N/A	--	Off/On
A	12	Alarm Active	R/O	No Alarm/New Alarm 1 or 2
A	13	SP 2 Active	R/W	SP1/SP2
A	14	Remote Active	R/W	Local/Remote
A	15	Auto/Manual	R/W	Auto/Manual

表C-13 Eurotherm 818P Status word指令

C-5-9 【Eurotherm 818P程式控制】

Eurotherm 818P的程式控制，也就是溫控器程式的執行(Run)，重置(Reset)，及暫停(Hold)，皆可藉由傳送狀態字元(Optional Status Word, "OS")指令來達到程式之執行控制，表C-14列出不同D值對應的指令功能及其屬性。

Optional Status Word(OS) in the format(>ABCD)

D value	Function	Attribute
D=0	Reset Programmer/Ramp Function.	Read/Write
D=1	N/A	
D=2	Run Programmer/Ramp Function.	Read/Write
D=3	Hold Programmer.	Read/Write
D=4	End Programmer.	Read/Only
D=5	RMP Engaged.	Read/Only
D=6	Program in Holdback.	Read/Only

表C-14 Eurotherm 818P Status word 'D'字元對應的程式控制

下例為其寫法說明：

對Eurotherm 818P寫入OS= >ABCD，代表意涵如下：

OS = >0000 代表中止並重置(RESET)程式，亦即設定溫度點為SP1。

OS =>0002 代表執行寫入Eurotherm 818P的控溫指令參數。

OS= >0003 代表暫時停止程式時脈(Hold Program)，直到下達執行(Run, OS=>0002)程式指令方才繼續程式執行，此時程式暫且不動作，圖C-23為多種字元(Char)與其10進位(Dec)，16進位(Hex)，8進位(Oct)的轉換對應碼對應表。

Dec	Hx	Oct	Char	Dec	Hx	Oct	Html	Chr	Dec	Hx	Oct	Html	Chr	Dec	Hx	Oct	Html	Chr	
0	0	000	NUL	(null)	32	20	040	Space	64	40	100	0	96	60	140	0	120	0	120
1	1	001	SOH	(start of heading)	33	21	041	!	65	41	101	A	97	61	141	1	121	A	121
2	2	002	STX	(start of text)	34	22	042	"	66	42	102	B	98	62	142	2	122	B	122
3	3	003	ETX	(end of text)	35	23	043	#	67	43	103	C	99	63	143	3	123	C	123
4	4	004	EOT	(end of transmission)	36	24	044	\$	68	44	104	D	100	64	144	4	124	D	124
5	5	005	ENQ	(enquiry)	37	25	045	%	69	45	105	E	101	65	145	5	125	E	125
6	6	006	ACK	(acknowledge)	38	26	046	&	70	46	106	F	102	66	146	6	126	F	126
7	7	007	BEL	(bell)	39	27	047	'	71	47	107	G	103	67	147	7	127	G	127
8	8	010	BS	(backspace)	40	28	050	(	72	48	110	H	104	68	150	8	130	H	130
9	9	011	TAB	(horizontal tab)	41	29	051	{	73	49	111	I	105	69	151	9	131	I	131
10	A	012	LF	(NL line feed, new line)	42	2A	052	*	74	4A	112	J	106	70	152	10	132	J	132
11	B	013	VT	(vertical tab)	43	2B	053	+	75	4B	113	K	107	71	153	11	133	K	133
12	C	014	FF	(NP form feed, new page)	44	2C	054	,	76	4C	114	L	108	72	154	12	134	L	134
13	D	015	CR	(carriage return)	45	2D	055	-	77	4D	115	M	109	73	155	13	135	M	135
14	E	016	SO	(shift out)	46	2E	056	.	78	4E	116	N	110	74	156	14	136	N	136
15	F	017	SI	(shift in)	47	2F	057	/	79	4F	117	O	111	75	157	15	137	O	137
16	10	020	DLE	(data link escape)	48	30	060	0	80	50	120	P	112	76	158	16	138	P	138
17	11	021	DC1	(device control 1)	49	31	061	1	81	51	121	Q	113	77	159	17	139	Q	139
18	12	022	DC2	(device control 2)	50	32	062	2	82	52	122	R	114	78	160	18	140	R	140
19	13	023	DC3	(device control 3)	51	33	063	3	83	53	123	S	115	79	161	19	141	S	141
20	14	024	DC4	(device control 4)	52	34	064	4	84	54	124	T	116	80	162	20	142	T	142
21	15	025	NAK	(negative acknowledge)	53	35	065	5	85	55	125	U	117	81	163	21	143	U	143
22	16	026	SYM	(synchronous idle)	54	36	066	6	86	56	126	V	118	82	164	22	144	V	144
23	17	027	ETB	(end of trans. block)	55	37	067	7	87	57	127	W	119	83	165	23	145	W	145
24	18	030	CAN	(cancel)	56	38	070	8	88	58	130	X	120	84	166	24	146	X	146
25	19	031	EM	(end of medium)	57	39	071	9	89	59	131	Y	121	85	167	25	147	Y	147
26	1A	032	SUB	(substitute)	58	3A	072	:	90	5A	132	Z	122	86	168	26	148	Z	148
27	1B	033	ESC	(escape)	59	3B	073	;	91	5B	133	[	123	87	169	27	149	[	149
28	1C	034	FS	(file separator)	60	3C	074	<	92	5C	134	\	124	88	170	28	150	\	150
29	1D	035	GS	(group separator)	61	3D	075	=	93	5D	135	]	125	89	171	29	151	]	151
30	1E	036	RS	(record separator)	62	3E	076	>	94	5E	136	^	126	90	172	30	152	^	152
31	1F	037	US	(unit separator)	63	3F	077	?	95	5F	137	_	127	91	173	31	153	_	153



註：詳細 Eurotherm 818P 通訊指令請參閱 EUROTHERM 800-RS-232 Communication 手冊。

C-6 Eurotherm 818P 硬體資料附錄

【Eurotherm 818P 硬體規格代碼】

Temperature Controller Device00 :

818P15/TC/0V10/NONE/NONE/NONE/232/96/SN/03/0/1200/C/RR/RH/E/IN/S/N/MN/MN/H

Temperature Controller Device01 :

818P15/TC/0V10/NONE/NONE/NONE/232/96/SN/03/0/1200/C/RR/RH/E/IN/S/N/MN/MN/H

Temperature Sensor Device02 :

818P15/TC/0V5/NONE/NONE/NONE/232/96/SN/03/0/1200/C/RR/RH/E/IN/S/N/MN/MN/H

註：相關硬體代碼意涵，請參照EUROTHERM 818 Controller-Programmer Manual 文件中 P.44~P.51 818P Controller Coding 及 EUROTHERM 818 Engineering Manual 文件中 Chapter 3.0-Coding。

【熱電偶(Thermocouple)規格】

Eurotherm 818P硬體的輸入熱電偶(Thermocouple)為R Type。

R Type：(鉑銠合金)Platinum+13% Rhodium / (鉑)Platinum

可供量測溫度範圍：-50~1767°C

建議測溫範圍：0~1600°C

Min span：600°C

【Eurotherm 818P 輸入/輸出規格】

表 C-15 列出 Eurotherm 818P 詳細的硬體輸入/輸出規格。

INPUTS	
All inputs	
Calibration accuracy	0.25% of recommended span
Sampling frequency	8Hz
Maximum sensor break reaction time	30s
Sensor break output level adjustment range	-100 to 100.0%
Maximum common-mode voltage @ 50160Hz	264Vac,rms (with respect to neutral)
Common mode rejection @ 50160 Hz	>134dB
Series mode rejection @ 50160 Hz	>60dB
Resolution	Input <20mV, 0.67μ V; input >20mV, 1.67μ V
Thermocouples	
Number of thermocouple types	17 (see Product Code for types)

Thermocouple linearization accuracy	±0.2°C
Cold junction compensation rejection ratio	20:1(with internal detector)
Differential thermocouple input range	-8 to +8mV
Resistance temperature detector	
Device	1000 Pt (DIN 43760/BS 1904), 3-wire connection
Resistance at 0°C	100Ω
Resistance at 100°C	138.5Ω
Linearization accuracy	±0.2°C
Linear inputs	
Linearity	0.1 % of span
Resolution (without input adapter)	1.67μ V
Base range	-10 to +50mV
Other ranges (requiring an input adapter)	0-20mA, 4-20mA, 0-5V, 1-5V and 0-10V
OUTPUT DEVICES	
Triac module (isolated from all other circuits)	
Maximum load current (resistive load)	1A _{rms}
Logic module (isolated from all other circuits)	
Output	20mA (15Vdc compliance)
Relay module (isolated from all other circuits)	
Output contacts	Form C, isolated
Maximum load voltage	264Vac
Maximum load current (resistive load)	2A _{rms}
Minimum load voltage	30V _{rms} Or 30V _{peak}
DC module (isolated from all other circuits)	
Current output ranges	0-10mA, 0-20mA and 4-20mA (12Vdc compliance)
Voltage output ranges	0-5V, 1-5V and 0-10V (20mA _{dc} max.)
Resolution	<0.024%
Linearity	0.5%

表 C-15 Eurotherm 818P 硬體細部規格表

【Eurotherm 818P RS-232 通訊協定設定】

表 C-16 列出 Eurotherm 818P 的 RS-232 序列傳輸通訊協定的相關規範參數設定。

【WK2008--Equipments RS-232 Protocol Parameters Setting】					
Eurotherm	Baud Rate	Data Bits	Stop Bit	Polarity Check	Flow Control
818P	9600 bps	7	1	Even	None

表 C-16 Eurotherm 818P RS-232 通訊協定設定

【Eurotherm 818P 硬體尺寸及背後接腳定義圖】

Eurotherm 818P 機殼背後共有 36 個接腳，接腳定義如圖 C-24 所示。

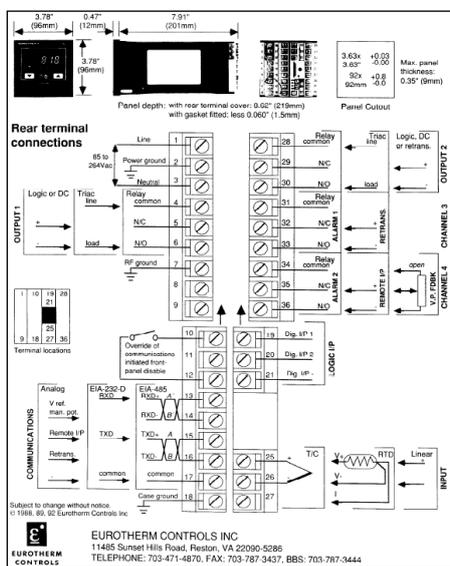


圖 C-24 Eurotherm 818P 硬體背部接腳定義

在 WK2008 加熱系統中，Eurotherm 818P 溫控器硬體所使用的接腳及其功能對應如表 C-17 所示。

項目	外部訊號	Eurotherm 818P
電源 110V/60Hz 交流電源	火線(Line)	Pin1
	中性線(Neutral)	Pin3
接地	電源地端	Pin2
	RF 地端	Pin7
	Eurotherm 機殼接地	Pin8
RS-232 通訊埠	Rx(Pin2)	Pin13
	Tx(Pin3)	Pin15
	Com(Pin5)	Pin17
熱電偶(Thermocouple)	正端(+)	Pin25
	負端(-)	Pin26
輸出埠 1(Output 1) 0~5V 電壓輸出腳位	正端(+)	Pin5
	負端(-)	Pin6

表 C-17 WK2008 控制系統中 Eurotherm 818P 所利用的接腳腳位說明

附錄 D MKS 腔體壓力控制器

MKS--Type 651C pressure controller

MODEL : Controller: 651C, Throttle valve: 253B Fast, Transducer: 628B

在 MOCVD 系統中，腔體壓力控制為一項重要磊晶參數，而大多數磊晶系統中，為提高晶片製程的均勻性(提升良率)及降低副反應發生率(降低分子間碰撞機率)，通常會選擇低壓系統作為生成反應的環境設定；此外低壓系統尚有提高反應分子流速、反應分子源的擴散速率，及避免反應分子源向外在環境擴散等優勢；其中提高氣流流速有助於層流(Laminar flow)形成，利於磊晶層厚度控制、降低高溫時氣體對流(Convection)發生等。基於上述，WK2008 磊晶系統即選擇低壓環境作為其生成反應的條件，一般操作壓力範圍為 200~1000mbar。為達到腔體低壓環境，在其真空管路末端配置有真空泵浦(Vacuum Pump)，而腔體壓力即透過壓力控制系統來達到穩定壓力控制。

WK2008 磊晶系統的腔體壓力控制是利用 MKS 651C 壓力控制器、MKS 628B 壓力傳感器(Transducer)、MKS 253B 節流閥(Throttle valve)等 3 樣元件來達到壓力控制。在 WK2008 真空系統配置中，如 D-1 節中的圖 D-1 真空系統管路所示。由於腔體末端連結至真空泵浦(Mechanical Pump)，而節流閥則置於腔體與真空泵浦間，壓力控制器根據壓力傳感器的回朔訊號(腔體壓力值)來控制其開口度；藉由控制腔體內氣體的排放流速，即可間接控制腔體內部壓力。

本章節為針對 WK2008 磊晶系統中反應腔體壓力控制器的完整說明，文章大致可分為硬體功能說明、RS-232 通訊指令集介紹，及指令格式和寫法說明等內容。

MKS 651C 腔體壓力控制器硬體功能說明部份包含 MKS 651C 壓力控制器基本手動設定說明和真空系統參數校正/零點壓力校正功能等 2 大部分。在 MKS 651C 壓力控制器基本手動設定內容包含：前置面板按鍵功能介紹、硬體後置接腳位說明、節流閥型號設定、壓力控制器基本參數設定，包含

壓力控制模式設定、RS-232 通訊協定定義、壓力感測範圍設定、顯示壓力單位設定、數位設定點 A~E 控制模式(壓力控制/閥開口度位置控制)設定等項；後續文章將針對這些手動設定方法作詳細介紹。而 MKS 651C 壓力控制器的真空系統參數校正、壓力傳感器零點壓力校正等功能則需藉由特定菜單配合系統控制程式連同執行，文章也將詳細介紹壓力控制器校正手續的操作步驟。

MKS 651C 壓力控制器 RS-232 通訊指令集介紹部分，內容僅包含系統控制程式最常用的 MKS 壓力控制器之 RS-232 通訊指令介紹，其中包括指令格式(Message format)、指令功能說明、及壓力設定/讀取值轉換方法等項。設定/寫入(Write)指令僅包含設定壓力、指定設定點、強制閥關閉等 3 項；而讀取(Read)指令則僅有讀取壓力值、讀取節流閥開口度等 2 項，該節最後列出數十項常用的設定(寫入)/讀取指令供使用者參考。

本附錄最後 1 節則為 MKS 651C 壓力控制器硬體附件，包含 MKS 651C 控制器詳細硬體規格列表，及 MKS 628B 壓力傳感器和 MKS 253B 節流閥的詳細硬體規格及腳位功能定義等項，使用者可根據其需求查閱之。

D-1 腔體壓力控制機制介紹

D-1-1 【WK2008 真空系統設計】

WK2008 真空系統主要由真空連結管件(Vacuum Fittings)、氣動閥(Pneumatic valve)、粒子過濾器(Particle trap)、節流閥(Throttle valve)、真空壓力計(Manometer)、逆止閥(Check valve)、真空泵浦(Vacuum pump)等元件所構成，其硬體配置如圖 D-1 簡圖所示。

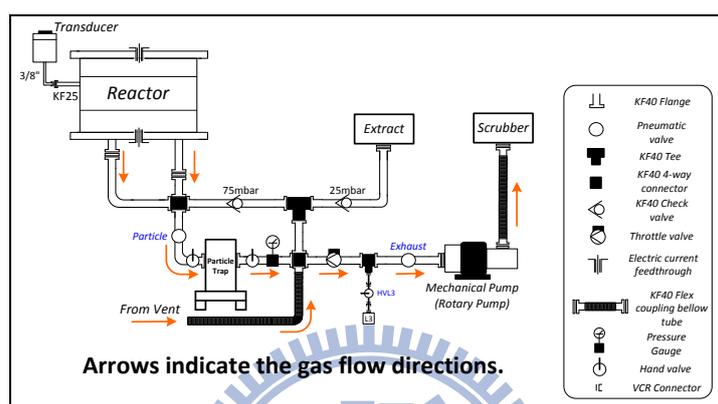


圖 D-1 WK2008 系統在磊晶(低壓)狀態時，真空系統管路內氣體流向

真空系統中連結管路由不銹鋼真空管件^{註1}所組合而成，其中包含直通管(Full nipple straight)、阻隔套管(Blank off)、4通管(4-way)、3通管(Tee)、90°彎頭肘管(90° Elbow)、雙頭固定波紋管(Flex coupling bellow tube)等管件；真空管件接合處採用襯墊封合(Spacer seal)，由迫緊法蘭(Flange, KF40)、中心固定環(Center retainer ring, KF40)^{註2}、鋁製夾緊環(Aluminum made clamp, KF40)等所構成。

真空系統操作分為系統閒置及低壓磊晶狀態，不同狀態下的氣流走向請參閱 A-1-2 真空系統管路 章節。圖 D-1 顯示當系統處於低壓磊晶狀態時的氣體流向(箭號方向)。反應腔體末端出口連結至真空系統管路，而從反應腔體流出的氣流經過粒子過濾器過濾掉氣流中體積較大的粉塵或粒子，旋即透過節流閥調節流量後再接至真空泵浦進口端，氣流經過真空泵浦壓縮氣體程序後即經由其出口端通往洗滌槽(Scrubber)內，待完成酸鹼中和反應^{註3}程序後再排至大氣中。

如圖 D-1 所示，反應腔體(Reactor)壓力控制主要為透過調節位於真空泵浦進口端的節流閥開口度，經由改變真空系統管路中的氣導(Conductance)參數，意即變化單位時間內、單位壓力差條件下的氣流排放通量，來改變真空泵浦對腔體的有效抽氣速率^{註4}，達到腔體內部壓力控制。

註 1：WK2008 真空系統所使用不銹鋼真空管件(Stainless steel fitting)規格：

口徑：NW40/KF40，內徑(Inner diameter, I.D.)：41mm face seat，外徑(Outer diameter, O.D.)：55mm。

材質：Stainless steel 304L (Cr：18%，Ni：8%，Mn：2%，Si：0.75%，N：0.1%，S：0.03%，C：<0.03%，P：0.045%)。

註 2：真空系統中不銹鋼真空管件的襯墊接合口徑規格皆為 NW40，中心固定環(Center retainer ring)規格亦為 NW40(O.D.：41mm, I.D.：40mm)/SUS-304，接合方式如圖 D-2 所示。

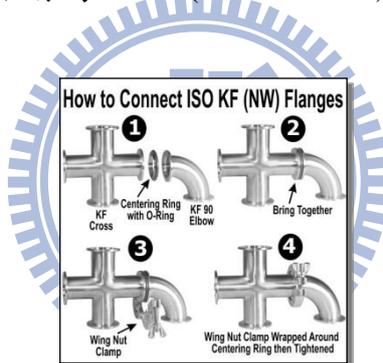


圖 D-2 襯墊接合(Spacer seal)

O-ring 墊圈材質為氟橡膠(Fluoropolymer elastomer, Viton, FPM)，典型工作溫度為-20~250°C，不耐酮類(丙酮 Acetone)、酯類。

註 3：系統洗滌槽(Scrubber)內備有高純度硫酸(H₂SO₄)溶液，用以中和弱鹼性的 NH₃。且內部利用類似蓮蓬頭(Shower head)結構，用以增加硫酸溶液與 NH₃ 氣體分子中和反應效率。

註 4：真空技術中，氣流通量(Flux, Q)定義為在某一特定的溫度下，每單位時間內通過真空系統某一部份(如管路等)的斷面上氣體分子數量，即為氣體壓力與其體積之乘積(PV)；而氣導(Conductance, C)參數即定義為穩定狀態時，在單位壓差下(Unit pressure difference)的氣流通量。如某一管路在其兩斷面 1 及 2 處的氣壓各為 P₁ 及 P₂，若在該兩處的抽氣率(單位時間內排除氣體的體積)各為 S₁

及 S_2 ，由於氣體連續性可得式(D-1)，氣導 C 定義如式(D-2)所示。

$$Q = P_1 S_1 = P_2 S_2 \quad (D-1)$$

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (D-2)$$

氣導與導通單元(Fittings)之幾何形狀、接合配置方式、操作壓力有關。此外，真空泵浦對真空室(腔體)的有效抽氣速率，除了由泵浦大小規格所決定外，並受連接管件(管路、閥門等)氣導大小之影響，其關係如下：

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (D-3)$$

S_{eff} ：真空室端的有效抽氣速率(Effective pumping speed)

S_p ：真空泵浦抽氣速率(Mechanical pump pumping speed)

C ：管路整體氣導(Overall conductance)

D-1-2 【腔體壓力控制機制】

WK2008 真空系統腔體壓力控制硬體配置如圖 D-3 所示，圖 D-3 中簡單畫出 MKS 651C 壓力控制器、MKS 628 壓力傳感器(Transducer)、MKS 253 節流閥(Throttle valve)、系統工業電腦之間的連接關係。使用者經由 RS-232 通訊介面下達控制器壓力設定指令，而控制器則藉由分析壓力傳感器回傳的電壓訊號，經控制器演算後，再給定節流閥上的微型馬達電壓訊號控制其開口度；利用調節單位時間內氣體排放流量的方式來達到壓力控制。

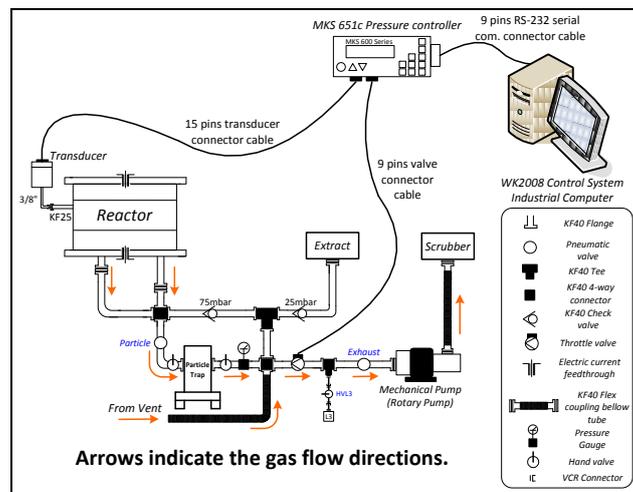


圖 D-3 MKS 651C 腔體壓力控制相關硬體配置圖

在感測壓力部分，由於反應腔體內部分為上、中、下三層，如圖 A-1 中

反應腔體(Reactor)圖示，在腔體中層與層之間利用石英板做為主要區格，而壓力傳感器的感測頭(Sensor head)透過外接不銹鋼管($\frac{3}{8}$ " VCR 轉 KF25)接至反應腔體的中間層內(如圖 D-1 中所繪的虛線部分空間)，其主要量測不銹鋼外腔體壁與石英內襯層(Quartz liner)之間的絕對壓力值。此外系統中真空泵浦抽氣速率無法控制，開啟後泵浦葉片即維持固定轉速(1800rpm)，在 0.1~1000mbar 的操作壓力範圍內，真空泵浦抽氣速率約固定為 $16 \text{ L}/\text{sec}$ (Max.)，而真空泵浦本身極限操作壓力約為 $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ($< 2.8 \times 10^{-3} \text{ L}/\text{sec}$)^{註1}；在 WK2008 磊晶系統一般製程操作 5~10SLM 的氣體流量下，腔體壓力控制範圍可達到 0.7~1000mbar^{註2}。

註1:WK2008 系統中所使用的真空泵浦為雙級氣鎮式旋片泵浦(2-stage Rotating vane pump with gas ballast device)，型號為：TRIVAC D65 BCS；在 0.1~1000 mbar 的操作壓力範圍內，其抽氣速率(Pumping speed)約固定為 $16 \text{ L}/\text{sec}$ (Max.)，而泵浦本身極限壓力(Ultimate pressure)約為 $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ，此時泵浦抽氣速率低於 $2.8 \times 10^{-3} \text{ L}/\text{sec}$ 。真空泵浦的抽氣速率與其操作壓力關係如圖 D-4 所示。

註2：MKS 628 壓力感測器(Transducer)壓力感測範圍為 0.5~1000Torr。

註3：腔體壓力負壓(壓力低於 1 大氣壓)控制僅於真空泵浦開啟有效。

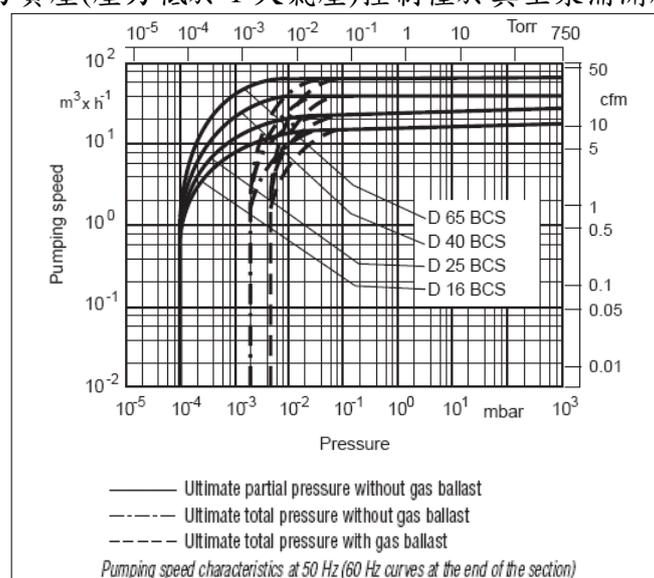


圖 D-4 真空泵浦(D-65)抽氣速率與其操作壓力關係圖

D-2 MKS 651C 腔體壓力控制器介紹

本章節為 MKS 651C 腔體壓力控制器使用介紹，文章將先敘述控制器的前置面板按鍵功能，後置面板接線配置等，再來針對與系統電腦遠端通訊之前的基本控制器內部硬體參數手動設定做完整說明，而當使用者設定完本章節所陳述的基本參數後，即可與系統電腦做遠端通訊。此外在實際腔體壓力控制之前，控制器需連同程式配合執行真空系統參數校正、及零點壓力校正等功能，詳細內容及操作步驟則於 D-3 節說明。

D-2-1 【MKS 651 壓力控制器前置面板(Front panel)】

圖 D-5 為 MKS 651C 腔體壓力控制器前置面板示意，其按鍵對應功能說明如表 D-1 所列。

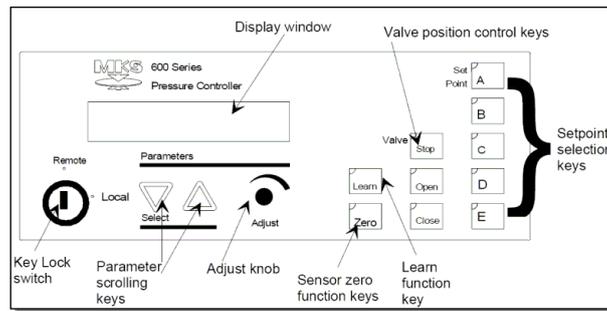


圖 D-5 MKS 651C 前置面板功能說明

前置面板功能簡易說明	
前置面板按鍵	功能
<i>Key Lock switch</i>	Local(front)/Remote(rear)切換。 Local 為前置面板參數控制，Remote 為遠端電腦參數控制(透過 RS-232 通訊介面)。 <u>注意：如為電腦程式控制，務必確保在程式執行前該鍵切換為 Remote，在 Remote 模式下，仍可藉由按△或▽鍵，讀取個別設定(set point A~E)的相關參數。</u> <u>註：需切換至 Remote 方可將鑰匙拔除。</u>
<i>Display Window</i>	液晶顯示視窗顯示目前之壓力值及節流閥的目前位置比率。(100%→全開，0%→全關；Valve Direction：Direct。)

<i>Parameter scrolling keys</i>	參數選單按鈕，可供 set-point A~E，及 Analog set-point 的各別設定參數切換。
<i>Adjust knob</i>	可旋轉該旋鈕調整參數設定。
<i>Learn function key</i>	該按鈕為執行 Learn 功能。 註：在正流率的壓力控制系統中，執行該功能可使控制器獲得該真空系統相關參數。
<i>Sensor Zero function key</i>	該按鈕為執行壓力感測元件(Monometer)歸零功能。
<i>Valve position control keys</i>	閥動作控制按鈕，可強制閥開啟(Open)，閥關閉(Close)，及閥暫停(Stop)等功能。
<i>Set point selection keys(A to E)</i>	選擇 Set point A~E 函數按鈕。
<i>Light</i>	當某函數功能執行時，對應的燈號亮起。
<p>註：</p> <ol style="list-style-type: none"> MKS 651C 壓力控制器中，可選定利用壓力值或節流閥開口位置比例作為控制參數，其控制指令皆為送出全量(Full Scale)的百分比(%F.S.)，也就是可控制壓力範圍的百分比率，或節流閥的全開/全關閉狀態下的開口度比率。 在 MKS 651C 壓力控制器中，控制器可藉由下列 2 種 PID 演算方式來達到真空系統的精確壓力控制。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 自我 PID 演算(Self-tuning, adaptive)：控制器基於系統特性，透過獨特的控制演算法，使用者不需輸入 Lead 及 Gain 值即可達到穩定壓力控制功能。如要選擇該自動 PID 控制，可在"Setup"選單中設定。如要進入 Setup 選單請參閱 D-2-3 章節內容。 ➤ PID 演算(PID)：控制器需個別手動輸入 PID 數值以達到壓力控制之目的。在使用 PID 控制前，使用者需要事先試出(Try and error)最佳穩定控制的 Lead 及 Gain 參數值，再將 Lead/Gain 值輸入所使用的設定點中，以達到壓力設定點至壓力設定點(Set point to Set point)的最佳控制。 ➤ Lead 值(sec)代表設定節流閥在某一壓力值時的擺幅穩定度，一般 Lead 值越大，節流閥的擺動幅度越大，愈不穩定。 	

- Gain(%)值代表控制器到達設定壓力值時的回朔(feed-back)反應速率。Gain 值愈大，壓力反應愈快，但可能會有過衝現象。此外 Lead/Gain 值皆不會影響節流閥微型驅動馬達的實際轉速。
- Soft-start rate 為直接控制節流閥驅動馬達的轉速，並無參數回朔問題，而 rate 值越大，閥動作越快；一般設定為 100%。

表 D-1 MKS 651C 控制器前置面板細部功能說明

D-2-2 【MKS 651C 壓力控制器後置面板(Rear panel)】

MKS 651C 控制器背後主要有 4 個 D 型接頭介面，分別為節流閥控制介面(Valve connector)、壓力傳感器類比訊號輸入介面(Transducer connector)、I/O 控制介面(I/O connector)、序列通訊埠傳輸介面(Serial interface connector)，及單相線電壓輸入選擇(Line voltage selector switch)等接頭，其中單相線電壓調整為 115V(~)，詳細硬體接頭介面配置如圖 D-6 所示。

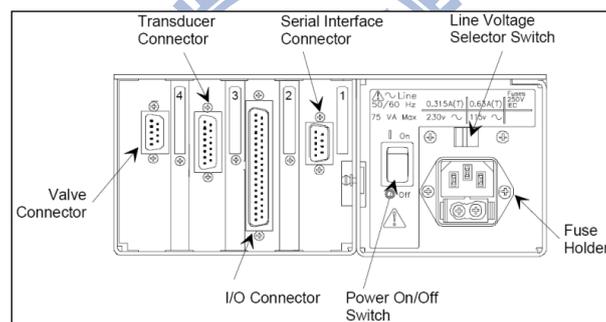


圖 D-6 MKS 651C 壓力控制器背部接頭介面配置

D-2-3 【MKS 651C 壓力控制器基本參數手動設定(選取)】

MKS 651C 壓力控制器與 Eurotherm 818P 溫度控制器類似，分為手動操作及遠端電腦指令控制。由於系統程式對 MKS 651C 控制器下達設定壓力指令後，僅對控制器做目前壓力值、節流閥開口度等 2 項資訊的讀取動作，除此之外並未再對壓力控制器做任何設定，所以使用者在作遠端指令控制之前，需針對控制器內部諸多參數事先做好手動設定，其中包含控制模式選擇，即選定硬體自動 PID 演算(Self-tuning, adaptive)或需要使用者輸入 Lead/Gain 值的 PID 演算控制(PID)、RS-232 通訊協定設定、壓力傳感器之壓力偵測範圍設定、數位設定點 A~E 控制模式(壓力控制/閥開口度位置控

制)等；而本節主要內容即為描述在遠端電腦控制之前，使用者需對 MKS 控制器所做的基本手動設定。

此外 MKS 651C 壓力控制器之真空系統參數校正、壓力傳感器零點校正等 2 項功能，使用者則需藉由程式執行特定校正菜單("MKS Learn function execution.txt" recipe)，連同手動操作 MKS 控制器來配合完成，詳細內容將於 D-3 MKS 651C 控制器真空系統參數校正/零點壓力校正功能 小節中做完整操作介紹。

【節流閥型號設定(安裝於真空系統前設定)】

在執行 MKS 651C 壓力控制器的初始設定前，使用者須先將節流閥連接上控制器，並選定節流閥型號。其操作步驟如下 3 點：

1. 確認節流閥已連接上控制器硬體背後 9 pin Valve connector 連接頭，並將 Key lock switch 切換至 "Local"。
2. 同時按下前置面板上 "△" 鍵及節流閥控制 "Close" 按鍵約 3 秒。
3. 利用 Adjust knob 旋鈕調整節流閥型號為 253 Fast^註，待顯示螢幕出現 253 Fast 時，按下 "Stop" 按鈕，控制器即會對節流閥執行確認功能，此時節流閥狀態會由全開啟至全關閉數次。

註：MKS 651C 壓力控制器原廠節流閥預設型號為 653，WK2008 磊晶系統中，MKS 節流閥型號為 253 Fast。

【控制器內部參數基本設定(選取)】

MKS 651C 液晶顯示視窗一般顯示目前壓力(Torr)及目前節流閥開口度(%)，MKS 控制器預設壓力顯示單位為 Torr，如圖 D-7 所示。

PRES	755.24 Torr
POS	0.1%

圖 D-7 MKS 651C 控制器於閒置狀態下的液晶螢幕顯示狀態

使用者可將前置面板上 Key lock switch 切換至 "Local"，再同時按下前置面板上的 △ 及 ▽ 按鍵約 3 秒後即可進入硬體參數設定選單，選單中首先出現節流閥種類(Valve type)設定，使用者可利用 Adjust knob 旋鈕調整參數值；待完成相關設定後，再按下 △ 或 ▽ 按鍵進入硬體參數設定選單中的下一個

參數設定選項^{註1}。MKS 控制器硬體參數手動設定選單內容如下依序所列，後續文章將依序說明個別設定意義，其中無論使用者控制模式選擇為何，皆需定義後續所列設定；此外選單中若有(I/O)字樣代表相關設定與控制器 I/O 設定有關，使用者需額外連接控制器後方的 I/O 連接埠，詳細內容請參考註 2，若使用 RS-232 通訊介面作為和控制器之間的信息傳輸方式，相關 I/O 設定可忽略。

- 控制模式選擇(Adaptive/PID Control mode)
- RS-232 通訊協定設定
- 壓力感測範圍、壓力顯示單位設定
- (I/O)節流閥、壓力傳感器在控制器端的輸出電壓範圍設定
- 設定點 A~E 控制模式選擇(壓力控制/節流閥開口度位置控制)
- (I/O)類比信號設定點的輸入電壓訊號範圍設定
- 設定點 A~E、類比設定點、閥強制動作之 Soft-start rate 設定
- 節流閥順/逆操作方向設定(Direct/Reverse action)

『控制模式選擇(Adaptive/PID Control mode)』

如同表 D-1 中註解 2 所敘述，MKS 控制器的壓力控制分為自動 PID 演算(Self-tuning, adaptive)和需要手動輸入 Lead/Gain 參數值的 PID 演算(PID)等 2 種模式；在自動 PID 演算模式下，使用者在操作上僅需給定控制器壓力設定值或節流閥開口度即可，無須再額外輸入 PID 演算參數，控制器即會自我演算出適合該狀態下快速且穩定壓力控制所需的最佳 PID 參數。無論使用者選定哪種 PID 演算作為其控制模式，在手動設定完本節所述的基本參數後，控制器需針對該真空系統執行學習致能(Learn)功能，以獲得真空系統相關特性參數，詳細內容請參閱 D-3 節。

若使用者選擇 PID 演算作為其壓力控制模式，在使用 PID 演算控制前，需事先嘗試出(Try and error)最佳穩定控制的 Lead 及 Gain 參數值，再將 Lead/Gain 值輸入所使用的設定點中，以達到設定點至設定點(Set point to Set point)的最佳控制，詳細操作如下文中數位設定點(A~E)的 Lead/Gain 等

PID 參數值設定內容所述。

『RS-232 通訊協定設定』

MKS 控制器提供 RS-232 作為遠端通訊介面，使用者可根據需求設定相關通訊協定參數，包含波特率(Baud rate)、極性檢查(Polarity check)、資料位元(Data bits)、定義符號(Delimiter)等，詳細設定如表 D-2 最後 1 項所列。

『壓力感測範圍、壓力顯示單位設定』

系統中選用的真空壓力傳感器型號為 MKS 628B，該壓力傳感器為電容式真空壓力計(Capacitance manometer)，而該傳感器感測壓力滿刻度值(Full scale)為 1000Torr，感測壓力範圍為 0.5~1000Torr，詳細內容請參閱 D-5 附錄中表 D-8 MKS 628B 傳感器技術規格內容。該壓力傳感器的感測壓力動態涵蓋範圍(Pressure sensor dynamic coverage, $\frac{\text{Full scale range}}{\text{min. range}}$)約為 10^3 ，使用者需針對所使用傳感器的感測壓力滿刻度值來定義控制器的感測壓力範圍，在控制器中使用者僅需定義滿刻度值即可，而系統中即將控制器滿刻度值設為 1000Torr(1333.2mbar)。

MKS 651C 壓力控制器提供多項壓力顯示單位供使用者選擇，其中包含 Torr, mTorr, mbar, μ bar, Pascal, kPa 等單位；控制器預設壓力顯示單位為 Torr(mm-Hg)，若選擇其他單位表示，使用者需針對特定選用單位做相關轉換係數設定，詳細內容請參閱下文註 8。

『(I/O)節流閥、壓力傳感器在控制器端的輸出電壓範圍設定』

MKS 651C 壓力控制器與節流閥、壓力傳感器之間是以電壓作為硬體之間的溝通訊號，亦即 I/O(Input/Output)介面訊號；而節流閥開口度、傳感器壓力感測值等資訊也是由電壓訊號來呈現，控制器擷取節流閥與壓力傳感器的輸出訊號，經由內部電路運算透過外接式 I/O 介面端子以電壓訊號輸出(如圖 D-6 I/O Connector 所示)，其中 I/O 端子輸出電壓與節流閥開口度、傳感器感測壓力值之間為線性對應關係，使用者可透過擷取該 I/O 端子輸出電壓訊號來作開口度、壓力值等資訊轉換。而控制器本身提供該 I/O 端子輸出電壓滿刻度值設定，其中控制器上的壓力傳感器輸出電壓滿刻度值

有 1V/5V/10V^{註2} 等 3 項可供設定，使用者需針對傳感器上的硬體輸出電壓規格來做設定。系統中 MKS 628B 壓力傳感器輸出電壓規格為 0~10V，故將控制器上的(Sensor signal)選項設為 10V 即可(舉 1000Torr 傳感器來說，0~10V 代表~0V 對應最低感測壓力值(<0.5Torr)，10V 對應滿刻度值(1000Torr)，壓力與電壓之間轉換為線性關係)；此外使用者亦可直接透過擷取壓力感測器上(Pressure out)腳位來獲得該電壓值，MKS 628B 壓力傳感器之詳細腳位說明請參閱表 D-9。

控制器上節流閥輸出電壓滿刻度值有 5V/10V 等 2 項可供設定，而節流閥開口度類比輸出電壓範圍有 0~5V/0~10V 可供選擇^{註2}(以順向動作(Direct action)節流閥來說，0~10V 代表 0V 對應節流閥全關閉，10V 對應節流閥全開啟，節流閥開口度比例與控制器上輸出電壓之間轉換為線性關係)。此外節流閥上並未提供開口度比例的輸出腳位，故仍需透過控制器後端的 I/O 接腳來獲得該電壓。

『設定點 A~E 控制模式選擇(壓力控制/節流閥開口度位置控制)』

MKS 651C 壓力控制器提供 6 組可供使用者自訂的設定點(Set point)，其中 6 組設定點包含 A~E 共 5 組控制器內部電路給定訊號的數位信號設定點(即為前置面板上 A~E 設定點)，及 1 組需使用者透過控制器外部 I/O 介面給定電壓訊號的類比信號設定點(Analog set point, I/O)。所謂設定點即提供使用者輸入製程所需的設定壓力值或節流閥開口度值(Throttle position, %) ^{註3}，而每組設定點皆可各自定義為壓力控制(Pressure control)或節流閥開口度 ^{註4} 控制；使用者在輸入設定值之前，需在基本參數設定選單中定義好個別設定點的控制模式。

『(I/O)類比信號設定點的輸入電壓訊號範圍設定』

在上文中所提到的類比信號設定點屬於 I/O 控制，使用者需額外連接如圖 D-6 中所示的控制器後方 I/O 接頭(37 Pin I/O Connector)，而類比信號設定點為電壓訊號控制，使用者需先行定義滿刻度電壓(Full scale Voltage)，控制器提供 5V/10V 共 2 種滿刻度電壓值；之後再利用類比設定值與輸入

電壓之間的線性關係來做壓力或節流閥開口度控制，若類比信號設定點選擇為壓力控制模式^{註4}，而輸入電壓與壓力感測器的有效感測範圍之間以線性關係對應；例如：選擇 5V 為滿刻度電壓值，1000Torr 為感測壓力滿刻度值 (Min：0.5Torr)，5V→1000Torr，2.5V→500Torr，0V→0.5Torr。若選擇節流閥開口度控制(順向)，5V→100%，2.5V→50%，0V→0%。此外控制器尚提供類比設定點輸入電壓滿刻度(Span)及零點校正(Zero)等功能，詳細設定請參閱 651C Pressure Controller Manual 手冊中的 P.56~P.57 內容^{註5}。

『設定點 A~E、類比設定點、閥強制動作之 Soft-start rate 設定』

節流閥旋轉是透過位於其本體上的馬達所驅動，而馬達轉速與節流閥旋轉速率之間為線性對應關係。MKS 651C 控制器中 Soft-start rate 參數即提供使用者調整不同狀態下的節流閥驅動馬達(Driving motor)轉速，其中 Soft-start rate(%)數值定義為節流閥本體驅動馬達最高轉速的百分比比例(%F.S.)。MKS 651C 控制器提供使用者個別設定數位信號設定點(Set point A~E)、類比信號設定點、閥強制動作(開啟/關閉)等 8 種不同操作狀態的節流閥轉速；使用者可透過 Soft-start rate 參數設定選項來定義個別操作狀態下的節流閥轉速，一般皆調整為 100%F.S.，詳細設定請參閱 651C Pressure Controller Manual 中 P.47。

『節流閥順/逆操作方向設定(Direct/Reverse action)』

節流閥操作分為順向(Direct)及逆向(Reverse)模式，順向操作即定義節流閥全開啟(90°)對應 100%的閥轉動位置滿刻度(100% of valve position's full scale)，全關閉(0°)對應 0%的閥轉動位置滿刻度(0% of valve position's full scale)。相反地，逆向操作即定義節流閥全開啟對應 0%的閥轉動位置滿刻度，全關閉對應 100%的閥轉動位置滿刻度。

控制器基本設定選單中可供設定的參數範圍、原廠預設值，及系統中 MKS 651C 控制器相關設定如表 D-2 所示，其中表 D-2 也附上 MKS 651C Pressure Controller Manual 手冊對應頁碼，方便使用者查閱。

MKS 651C 壓力控制器硬體基本參數設定選單				
參數	原廠預設值	選項	WK2008 系統 中 MKS 651C 控制器的相關 參數設定	651C Pressure Controller Manual 對應 頁碼
節流閥型號	653	653/253 Fast/ 253 Standard	253 Fast	64
控制模式 ^{註6}	PID	PID/Adaptive	Adaptive	41
設定點 A~E 的控制 模式選擇 ^{註7} (選擇壓力值或節流 閥開口度位置比例作 為控制參數) Gain 和 Lead 值	A Pressure B Pressure C Pressure D Pressure E Pressure A Gain=100% Lead=10sec B Gain=100% Lead=10sec C Gain=100% Lead=10sec D Gain=100% Lead=10sec E Gain=100% Lead=10sec	Pressure/Position Pressure/Position Pressure/Position Pressure/Position Pressure/Position 使用者自訂 Gain=0~150% Lead=0~50sec Gain 解析度： 0.1% Lead 解析度： 0.01 秒	Pressure Pressure Pressure Pressure Pressure	74
A~E 數位設定點及類 比設定點的節流閥反 應速率 Set point soft-start rates	A 100% B 100% C 100% D 100% E 100% Anlg. 100%	0.1~100% 解析度：0.1%	A 100% B 100% C 100% D 100% E 100% Anlg. 100%	47
節流閥開啟/關閉的 反應速率 Valve Open/Close soft-start rate	Open 100% Close 100%	0.1~100% 解析度：0.1%	Open 100% Close 100%	47
壓力傳感器的滿刻度 值(Torr) ^{註8}	100	0.1, 1, 2, 10, 100, 1000, 5000,	1000	66

		10000		
壓力顯示單位	Torr	Torr, mTorr, mbar, µbar, Pascal, kPa, cmH ₂ O, inH ₂ O	mbar	44
(I/O 控制) 類比設定點(Analog set point)輸入電壓滿 刻度值 (Min: 0V)	5V	5V , 10V	10V	56
(I/O 控制) 壓力偵測器輸出電壓 滿刻度值 (Min: 0V)	10V	1V , 5V , 10V	10V	44
電容式壓力傳感器 (Transducer) 電壓訊號擷取方式	ABSOLUTE	ABSOLUTE/ Differential	ABSOLUTE	44
(I/O 控制) 壓力傳感器、節流閥 的類比輸出電壓範圍	壓力感測器： 0~10V 節流閥開口度： 0~10V	0~1V , 0~5V , 0~10V 0~5V , 0~10V	0~10V 0~10V	45
節流閥控制模式	Direct	Direct/Reverse	Direct	48
(RS-232 通訊協定) Baud Rate(bps) ^{註9} Parity check/Data bits Delimiter	9600 None/8 CRLF (Carriage Return, Line Feed)	9600,4800,2400, 1200,300 None, 8/Even, 7 CR/CRLF	9600 None/8 CRLF	42,120

表 D-2 MKS 651C 基本參數設定選單中可供設定的參數範圍及控制器預設值

註 1：離開設定選單，只需按下除了△ 或▽按鍵以外的任意按鍵即可。

註 2：上述所有與類比電壓範圍相關的設定皆屬 I/O 設定，使用者需額外連接控制器後方的 I/O 連接埠；其中類比設定點輸入電壓與 Pin 10 有關、壓力傳感器電壓輸出與 Pin 36 腳位有關、節流閥開口度位置與 Pin 37 腳位有關，詳細腳位功能對應請參閱 MKS 651C Pressure Controller Manual 手冊中 P.34~P.35 I/O 連

接埠引腳分配表(I/O Connector Pinout)。

註 3：控制器上節流閥開口度是百分比(%F.S.)來表示，解析度為 0.1%F.S.。在順向動作的節流閥中，當節流閥全開啟(角度為 90°)時定義為 100%F.S.；而節流閥全關閉(角度為 0°)時定義為 0%F.S.，其中節流閥張角(°)與百分比(%F.S.)之間為線性轉換關係。

註 4：MKS 控制器內建選單中並無提供類比設定點的控制模式選擇(Pressure/Position)，使用者需透過控制器背後的 I/O 腳位(Pin6&Pin11)來定義類比設定點的控制模式，詳細內容請參閱 MKS 651C Pressure Controller Manual 手冊中 P.34 內容。

註 5：MKS 控制器相關文件存放於系統工業電腦，路徑為 D:\磊晶系統資料\WK2008 System files\WK2008--反應腔壓力控制器 MKS Type 651C。

註 6：系統中 MKS 651C 壓力控制器的壓力控制選擇 **Self-tuning(Adaptive)** 為其控制模式，主要為利用硬體自動獲得的 PID 演算參數來做壓力控制，不需再額外設定 Lead/Gain 參數。使用者需利用前置面板中 "Learn" 按鍵功能使控制器獲得真空系統特性參數，以達到不同壓力變化下快速且穩定的最佳控制，詳細硬體操作請參閱 D-3 節 內容。

註 7：MKS 651C 壓力控制器的數位信號設定點(Set point A~E)皆設定為壓力控制模式。

註 8：MKS 651C 壓力控制器預設壓力顯示單位為 Torr，使用者可任意選定顯示單位，再輸入該單位與 Torr 的轉換係數。表 D-3 為 MKS 651C 壓力控制器不同壓力感測範圍滿刻度值與 mbar 顯示單位之間的轉換係數列表，其中不同壓力感測範圍其解析度不同，表 D-3 中壓力感測範圍所顯示的數值亦包含解析度，例如感測範圍設定為 1000.0Torr，其解析度即為 0.1Torr。此外使用者需先根據其所使用的傳感器滿刻度壓力值，設定控制器感測壓力滿刻度值，再根據所使用的壓力顯示單位輸入轉換係數。

由於 WK2008 系統中壓力控制是以 mbar 為腔體壓力顯示單位，一般操作壓力範圍為 200~1000mbar，傳感器的感測壓力滿刻度值為 1000Torr。當選定好 mbar

為顯示單位後，在"Sensor range"選單下利用 Adjust Knob 旋鈕選擇輸入"1333.2"的壓力單位轉換係數即可(1000.0Torr=1333.2mbar)；詳細內容請參閱 MKS 651C Pressure Controller Manual 手冊 P.43~44。

MKS 651C 壓力控制器不同感測壓力滿刻度值及其與 mbar 的轉換係數列表	
感測壓力滿刻度值 (Torr)	預設顯示單位(Torr)與 mbar 之間的轉換係數
1.0000	1.3332
2.0000	2.6664
10.000	13.332
100.00	133.32
1000.0	1333.2
5000	6666
10000	13332

表 D-3 MKS 651C 控制器不同感測壓力滿刻度值及其與 mbar 的轉換係數列表

註 9: MKS 651C 壓力控制器 RS-232 序列通訊傳輸協定的波特率設定為 9600bps，由於通訊傳輸線長度與傳輸速率呈現負相關關係，故在設定波特率時須考量實際傳輸線長。9 Pin RS-232 傳輸介面使用 9600bps 傳輸速率的最大線長為 500 呎(150 米)，而系統中 RS-232 傳輸線長約為 2 米，遠低於最大傳輸線長，故波特率 9600bps 為合理的傳輸速率設定。詳細 RS-232 序列通訊傳輸線長考量請參閱 附錄 G 中 G-B RS-232 序列通訊傳輸簡介。

D-2-4 【數位信號設定點之相關數值手動輸入】

使用者在完成 D-2-3 節中所述的所有基本參數設定後，即可開始與電腦做遠端通訊。給定控制器數值方式有 2 種，一為透過遠端通訊介面輸入，另一種方式則為透過控制器前置面板介面來手動輸入；該 2 種方式皆為給定設定點壓力值或節流閥開口度。若不透過遠端通訊來給定數值，而是藉由手動輸入方式，則需在製程程序開始之前，將特定壓力值或節流閥開口度等數值逐一輸入數位設定點 A~E 中。數位設定點 A~E 等設定值手動輸入(已選擇好壓力或節流閥開口度控制的前提下)，可在 MKS 控制器於閒置狀態下(如圖 D-6 所示)，按下△或▽按鍵即進入 A~E 數位設定點設定選單；

相同地，利用△或▽按鍵來選擇設定點，旋轉 Adjust Knob 來調整所需的參數值^{註1}。

該設定選單提供下列參數設定及檢視：

- 數位設定點(Set point A~E)的設定值輸入
- 數位設定點(A~E)的 Lead/Gain 等 PID 參數值輸入
- 控制器內部繼電器動作的上/下限壓力範圍設定
- 檢視目前類比設定點的輸入電壓比率

『數位設定點(Set point A~E)的設定值輸入』

該選單提供個別數位設定點(Set point A~E)的設定值輸入，若已選擇為壓力控制，利用 Adjust Knob 調整所需壓力值；若為節流閥開口度控制，則調整所需的開口度比率(%)。此外使用者可於前置面板上將 Key lock switch 切換至"Local"後，按下前置面板上 A~E 設定點按鈕來選擇需要的設定點。詳細手動設定請參閱 MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中 P.50，Chapter Five：Local Operation 的 How to View and Adjust Set Points 內容。

『數位設定點(A~E)的 Lead/Gain 等 PID 參數值輸入』

注意：Lead/Gain 參數設定僅限於選擇 PID 演算(PID)及數位設定點定義為壓力控制模式下有效。

如同表 D-1 中註 2 及基本參數設定的控制模式選擇內容所述，若使用者選擇需要自行輸入 Lead/Gain 參數值的 PID 演算控制，需事先試出(Try & Error)符合特殊製程需求(如限定壓力變化在指定時間內完成)的壓力設定點到壓力設定點過程之 Lead/Gain 值^{註2}。此外每組數位設定點皆可各自定義 Lead/Gain 等參數值，設定意義及方法如下文中註 3 例子所述。詳細 Lead(sec)/Gain(%)值設定請參閱 MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中 P.58，Chapter Five：Local Operation 的 How to Set Lead And Gain Parameters 內容。

註 1：如要進入該設定選單，不需將 Key lock switch 切至"Local"亦可做設定點

數值設定；如要離開設定選單，只需按下除了 Δ 或 ∇ 按鍵以外的任意按鍵即可。

註 2：Lead 值大小與穩定度有關，Gain 值大小與壓力變化速率有關。

註 3：例如在某特定製程程序中，假定壓力變化過程為1000→800→500→200→1000mbar，則可將設定點 A~D 設定為壓力控制，且將壓力值依序寫入各別設定點中(1000→A、800→B、500→C、D→200)。設定點 Lead/Gain 值意義為到達該設定點所設定壓力值的變化過程中所相關的 PID 控制參數，而需將這變化過程中的 Lead/Gain 值輸入要到達的那個設定點參數裡。例如由 1000→800mbar 的過程(A→B)中，即需調整設定點 B 中的 Lead/Gain 值；以此類推，500→200mbar(C→D)，則需調整設定點 D 中的 Lead/Gain 值。Lead 預設值為 10sec，Gain 預設值為 100%。

註 4：控制器選單並無提供類比設定點 Lead/Gain 參數值輸入，使用者僅能透過背後 I/O 腳位設定來選擇數位設定點 A~E 中任一組 Lead/Gain 值；若要選擇 Lead C 和 Gain C 作為類比設定點的 PID 值，則將 Pin14 腳位維持低電壓(0~0.8VDC)即可，詳細 I/O 腳位請參閱手冊中 P.34。而若 Pin12~16 腳位中無任何腳位維持在低電壓態，則類比設定點預設 PID 值為 Lead A 和 Gain A，詳細內容請參閱手冊中 P.58 說明。

『控制器內部繼電器動作的上/下限壓力範圍設定』

MKS 651C 控制器內部提供 2 組繼電器(Relay)供外接電路利用，而使用者可在該選單模式下設定繼電器動作的上下限壓力值(Process limit, PLO)；此外使用者可根據外接電路設計需求選定常態開路(Normally Open, N.O.)或常態導通(Normally Closed, N.C.)的繼電器，繼電器 I/O 腳位對應如表 D-5 所示，詳細內容請參閱 MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中 P.55，How to Set Process Limit Relay。

MKS 控制器繼電器動作的邏輯設計為：

- 如果壓力在設定的壓力範圍內($Pl1 < P < Ph1$)，繼電器動作(N.C.→Open, N.O.→Closed)。
- 如果壓力超出設定壓力範圍($P < Pl1, P > Ph1$)，繼電器回復常態。

MKS 651C Process limit relay I/O port		
	Pin	Function
Process limit relay 1 (PLO relay #1)	1	N.C. contact
	2	N.O. contact
	20	Com. contact
Process limit relay 2 (PLO relay #2)	3	N.C. contact
	22	N.O. contact
	21	Com. contact

表 D-5 Process limit relay contact Pinout

『檢視目前類比設定點的輸入電壓比率』

該選單中提供目前類比設定點之輸入電壓比率檢視，其表示方式為現前輸入電壓為滿刻度輸入電壓的多少百分比(% of input voltage full scale)，其中類比設定點輸入電壓滿刻度設定請參閱 D-2-3 節，類比設定點輸入電壓滿刻度及零點校正請參閱手冊中 P.56~57 內容。為避免使用者混淆操作選單，茲將進入操作選單方式整理於表 D-4 中。

MKS 651C 壓力控制器所有參數設定選單	
進入選單的操作方式	基本參數設定選單功能列表
在控制器閒置狀態下(如圖 D-7 所示)，將 Key lock switch 切換至"Local"，再同時按下△和▽按鍵約 3 秒鐘後進入該選單，利用 Adjust knob 旋鈕調整參數值，按下△或▽按鍵進入下一功能選項。 按下除了△和▽以外的任一按鍵離開選單。	控制模式選擇、RS-232 通訊協定設定、壓力感測範圍設定、壓力顯示單位設定、(I/O)節流閥、壓力傳感器的硬體輸出電壓範圍設定、設定點 A~E 控制模式選擇、(I/O)類比設定點的輸入電壓訊號範圍設定、Soft-start rate 設定、閥操作方向設定等功能設定。
進入選單的操作方式	數位信號設定點(A~E)相關參數設定選單功能列表
在控制器閒置狀態下(如圖 D-7 所示)，按下△或▽按鍵即可進入該選單，利用 Adjust knob 旋鈕調整參數值，按下△或▽按鍵進入下一功能選項。 按下除了△和▽以外的任一按鍵離開選單。	A~E 個別數位信號設定點的設定值、A~E 個別數位設定點的 Lead/Gain 等 PID 參數值設定、控制器內部繼電器動作的上下限壓力範圍設定、檢視目前類比信號設定點設定電壓比率。

表 D-4 MKS 651C 壓力控制器所有參數設定選單

【節流閥強制控制按鍵】

當系統發生突發狀況時，使用者可透過前置面板上的節流閥控制按鍵，來強制節流閥動作。強制動作包含強制開啟、強制關閉、即強制閥停止(Halt)動作等 3 樣控制，使用者如需強制閥動作，須先將 Key lock switch 切換至 "Local"，再按下前置面板上的相對應功能鍵。待節流閥動作完成後，再將 Key lock switch 切換至 "Remote"。

Stop	節流閥停在目前所設定之位置(%F.S.)。
Open	節流閥全開(100%F.S.)。
Close	節流閥全閉(0%F.S.)。

註：程式因應系統突發緊急狀況所做的安全模式，節流閥預設狀態為強制關閉。

D-3 MKS 651C 真空系統參數校正/零點壓力校正功能

控制程式透過 RS-232 序列通訊作為和 MKS 壓力控制器的信息傳輸介面，由於使用數位通訊傳輸介面，所以 MKS 控制器的類比 I/O 介面並不使用之，包含類比設定點輸入電壓值(Analog set point input voltage)，壓力傳感器、節流閥的類比輸出電壓範圍(Analog output range)等，所有包含 I/O 介面的相關設定皆與遠端通訊無關。此外由於系統中 MKS 控制器使用自動 PID 演算模式(Self-tuning, adaptive)，所以個別數位設定點(Set point A~E)的 Lead/Gain 值不需額外設定。

當使用者設定完上文所述的壓力控制器基本參數，包含控制模式設定、設定點控制模式設定、通訊協定、壓力顯示單位等參數後，此時需再針對控制器執行真空系統壓力控制參數校正及傳感器之壓力零點校正(Zero calibration)，這 2 項功能需各別透過控制器前置面板上的學習致能(Learn)和零點校正(Zero)功能鍵，且需配合控制程式來手動操作控制器執行，本章節後續將詳細介紹其個別操作方法。

注意：以下功能需在 key lock switch 切換至 "Local"，才可執行個別功能。

D-3-1 【學習致能(Learn)功能】

Learn

無論 MKS 651C 控制器控制模式選定為何(Adaptive or PID)，控制器必需取得真空系統特性參數作為腔體穩定壓力控制所需的 PID 相關演算參數值設定。而 Learn 按鍵即為下達控制器執行自動 PID 演算參數抓取功能，當 MKS 控制器執行 Learn 功能時，系統壓力會在整個 Learn 過程中持續反覆改變，而控制器即利用調節節流閥的開口度來偵測壓力傳感器的回朔訊號，藉以記錄在設定壓力範圍內(節流閥全開時真空系統所對應的極限低壓值，到節流閥全關時真空系統對應的穩定壓力值)的相關控制參數，包含節流閥開口度與腔體壓力對應關係，節流閥的開口度變化(時變率)與壓力值變化關係等。故 Learn 過程中的壓力變化範圍即為該真空系統中可設定的操作壓力範圍，在 WK2008 系統中，MKS 壓力控制器執行 Learn 過程的壓力變化範圍約為 0.7mbar(節流閥全開)~室壓(節流閥全關)，且整個 Learn 過程會持續數分鐘。當 Learn 程序完成後，MKS 651C 壓力控制器會將壓力控制的相關 PID 演算參數及系統特性儲存於控制器硬體中。

一般來說新安裝真空系統(Refurnish pumping system)或改變通入腔體內部的氣體流率、新安裝或整修真空泵浦、更動系統管路設計等改變壓力控制的相關因素，MKS 651C 壓力控制器皆須執行 Learn 功能以獲得最佳的穩定壓力控制參數。

註：若壓力控制產生震盪、不穩定，或發生過衝量等情形，須對 MKS 壓力控制器再次執行真空系統參數校正，一般來說約 30~50 次磊晶程序(Epitaxy Run)後需執行 1 次校正功能。此外，若發生壓力讀值異常，則可執行壓力零點校正功能，先判斷零點是否已經漂移。

【執行 Learn 功能】

MKS 651C 壓力控制器在手動執行 Learn 功能前，使用者需先透過控制程式的預設菜單對腔體流量做設定，待氣流穩定後即可手動執行 MKS 控

制器的 Learn 功能。在執行 Learn 功能前，需確定系統處於閒置狀態、腔體壓力為室壓(~1060mbar)、節流閥關閉(Close 燈號亮起，Pos.顯示 0.0%)，且壓力控制器前置面板上的 Key lock switch 鍵切換至"Remote"。

執行 Learn 功能的做法如下 10 項步驟所列，使用者可依序執行之：

1. 按下程式操作介面上的"Program Stop"鈕，關閉程式。
2. 將位於系統工業電腦 D 槽中檔名為"MKS Learn function execution"的(.txt)菜單載入系統控制程式中，其菜單路徑為 D(Epitaxy Documents):\WK2008 System epitaxy recipes\System calibration Recipes\MKS Learn function execution.txt，菜單中設定的載流氣體種類為 H₂，總流量為 10.5SLM，壓力維持在 1000mbar，菜單預設對應於硬體執行 Learn 功能的程式執行時間約 15 分鐘。
3. 待程式控制面板 "State Description" 顯示 "System flow keeps 10.5L/H₂ in total." 字樣，確認此時腔體壓力應約為 1000mbar，通入腔體的總氣體流量應為 10.5SLM/H₂。
4. 手動將 MKS 控制器的 Key lock switch 切換成"Local"。
5. 待腔體氣流穩定後(即系統中流量計訊號穩定)，按下前置面板上 "Learn" 按鍵約 3 秒後硬體即執行 Learn 功能，此時 Learn 功能指示燈亮起。
6. 控制器會設定節流閥開口狀態由全開啟至全關閉數次，此時壓力值也會隨開口度變化而變動，當節流閥開口度變大，腔體壓力值則隨之降低。壓力控制器此時即記錄真空系統特性參數，整個 Learn 程序約需數分鐘(菜單中對應於硬體執行 Learn 功能的預設時間為 15 分鐘)。
7. 待 Learn 功能執行結束(指示燈熄滅)，控制器會將壓力值設定回到初始壓力值(1000mbar)，Set-point B 的燈號亮起。

8. 手動將 Key lock switch 切換成 "Remote"。
9. 待菜單執行結束(執行至指令字元為 e)，按下程式操作面板中 Main Pump 開關控制鈕，將系統真空泵浦關閉，腔體壓力回升至室壓 (~1060mbar)，確定系統此時處於 N₂ Purge 的閒置狀態。
10. MKS 原廠執行 Learn 功能介紹請參閱手冊 P.53 內容。

註：如在製程中有多種不同狀況使用的氣體流量，一般使用最大的氣體總流量。在 WK2008 真空系統中，MKS 壓力控制器執行 PID 演算時所用氣體總流量為 7~11 liters/min(H₂)。

D-3-2 【壓力值零點校正(Zero calibration)】

Zero

MKS 651C 壓力控制器提供壓力傳感器零點校正功能，使用者可利用該歸零(Zero)功能校正壓力傳感器的零點偏差值(Zero span)。系統中所使用的壓力傳感器其感測壓力範圍為 0.7~1333.2mbar，而真空泵浦在 0.1~1000mbar 的操作壓力範圍內，其抽氣速率約固定為 16 L/sec，在節流閥全開(氣導值最大~50 L/sec)的條件下，腔體壓力值應可低於 0.7mbar(傳感器的最低感測壓力值)；但若在封閉腔體進氣，真空泵浦開啟，節流閥全開的情況下，腔體極限低壓值仍無法低於壓力傳感器最大感測壓力值的 0.1%(0.1%F.S.)以下，即低於 1.3mbar，若已確認過無腔體外漏現象^{註1}或真空系統管路襯墊封合處的 O 型環墊圈(位於連結迫緊法蘭的中心固定環上)無接合不良等情況，則需對傳感器作零點校正，執行方式如下文所述。

註：MKS 628B 電容式壓力傳感器建議適合歸零壓力值為低於 0.07mbar。

【執行壓力值零點校正】

使用者若要執行壓力零點手動校正，在執行該程序前，須確認系統處於閒置狀態下，腔體壓力應為室壓(~1020mbar)，節流閥關閉，Key lock switch 切換至 "Remote"。其執行步驟如下 12 點所列：

1. 先將所有進入腔體(Chamber)氣體切斷。操作者可於系統閒置狀態下按下控制程式操作面板上的"System idle" state Pneumatic valves on Reactor inlet control button"按鍵，將按鍵切換成粉紅色的"保壓"狀態；此時連結至腔體進口端的 Run V-1/Run V-2、Run III、Graphite purge、Liner Purge 等 5 個氣動閥會強制關閉，由於程式設計關係，使用者需再手動強制關閉 Run III 氣動閥，強制關閉方式為手動調整 Run III 電磁閥(EM44)為強制供氣模式，將電磁閥上橘色手動撥把往下扳，如圖 D-8(b)所示。再來將氣體傳輸管路位於 *Rotation* 流量計後端及 *Heating RF Purge metering* 流量計後端藍色的 HVR、HVP 手閥關閉。

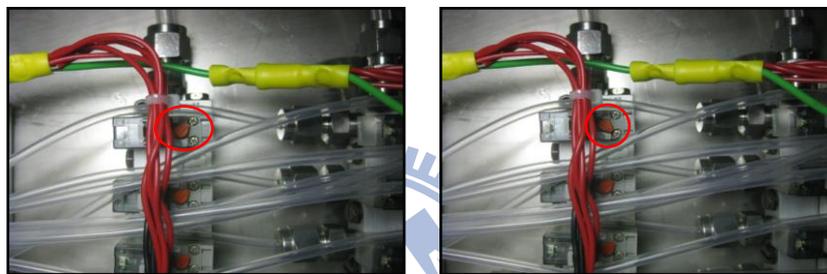


圖 D-8(a) 電磁閥訊號控制模式 圖 D-8(b) 電磁閥強制供氣模式

2. 靜候約 1 分鐘，於程式操作面板視窗觀察除了 *Vent* 流量計及 *TMI_n*、*TMGa* 等 III 族 MO 分子源流量計外，確定所有流量計皆出現流量異常警示的紅色燈號。
3. 按下程式操作面板上的 Main Pump 開關控制鈕，開啟系統真空泵浦開關。
4. 將 MKS 控制器的 Key lock switch 切換成"Local"。
5. 將節流閥設定全開，即按下"Open"按鍵。
6. 靜候約 25~40 分鐘後待系統壓力抽至低壓^{註2}，一般低壓定義為小於壓力傳感器感測範圍下限 1 個數量級，以系統中使用的感測器為例，其下限值為 0.5Torr，所以建議適合歸零的壓力值為 0.05Torr。如果此時最低壓力值(或稱極限壓力)尚未到達壓力傳感器的感測範圍下限(<0.7mbar)，表示壓力傳感器的零點已經漂移(Zero Shift)，需經由控制器校正其零點。
7. 按下 Zero 鍵^{註3}約 3 秒，此時 Zero 按鍵燈號持續亮起，直到零點

校正完畢。若要移除該零點，同時按下前置面板上 Stop 及 Zero 鍵約 3 秒，直到液晶螢幕中壓力值由 0.1mbar 顯示回未校正前的壓力讀值。

8. 注意此時 MKS 顯示視窗中壓力值是否已低於 0.7mbar(一般顯示 0.1mbar)，若仍大於該值，重複步驟 7，但若重複幾次後仍無法顯示 <0.1mbar，表示傳感器可能已受汙染，需送修。
9. Zero 校正結束，按下節流閥"Close"按鍵，關閉真空泵浦開關。按下制程式操作面板上的""System idle" state Pneumatic valves on Reactor inlet control button"按鍵，將按鍵切換成綠色的"Purge"狀態；將 EM44 電磁閥手動切換成如圖 D-8(a)的訊號控制模式，開啟 HVR、HVP 手閥。
10. 將 MKS 控制器的 Key lock switch 切換成"Remote"。
11. 此時腔體壓力會逐漸回至室壓(~1020mbar)，零點校正完成。
12. 原廠建議歸零操作請參閱手冊中 P.54。

註 1：腔體極限低壓(Ultimate low pressure)需考慮諸多因素，包含因為腔體製造瑕疵(焊接缺陷)或組裝不正確(O 型環不當封合)所造成的外部大氣進入真空系統內、真空泵浦之油蒸氣回流、腔體內部逸氣(Out-gassing, 氣體由真空系統內物件表面逸出統稱)等；而這些因素因不同真空度討論的層級也不同，一般來說腔體逸氣僅在高度真空狀態(10^{-3} ~ 10^{-7} Torr)才需考量該效應。而就系統所操作的 0.5~752 Torr 粗略真空壓力範圍，若排除油氣回流效應，則僅需考慮腔體焊接瑕疵或封合處洩漏等問題。系統反應腔的外腔體壁是由不銹鋼(SUS316L)所構成，接合處是利用 O 型環墊圈(O-ring, Viton)封真空，一般 O 型環封合處洩漏率為 10^{-6} ~ 10^{-7} atm·cc/sec，若安裝得當，其洩漏量極微小可忽略。WK2008 反應腔體在起初建構時所測得的氬氣洩漏率為： 1.0×10^{-10} Torr·liter/sec，在該測漏環境下腔體壓力為 5×10^{-3} Torr(6.7×10^{-3} mbar)；故就系統所使用的真空泵浦規格(本身極限壓力 5×10^{-3} mbar，0.1~1000mbar 的操作壓力範圍內，其泵浦抽氣速率約固定

為 16 L/sec)，腔體壓力應可低於傳感器的感測壓力下限值($\sim 0.7\text{mbar}$)。

註 2：真空泵浦將腔體抽至極限低壓所需的抽氣時間(Pumping duration)可藉由腔體體積、泵浦抽氣速率、管路氣導、真空室有效抽氣速率(式 D-3)、腔體本身極限壓力、欲抽至的終端壓力等參數所決定。本論文參考實用真空技術及真空技術等書籍內容估算出約略抽氣時間，使用者可逕自參考實用真空技術中 P.349，及真空技術 P.17 內容，以下列出估算所需參數。

腔體體積(V)：29 Liter。

泵浦抽氣速率(S)： 16 L/sec 。

真空管件口徑：NW40，內徑 4cm。

黏滯流管路氣導(C)： 0.34 L/sec 。

(粗估真空管件長度 $\sim 2\text{m}$ ，使用 N_2 計算，分子量(M)： 28 g/mole ，管路操作溫度

約為 45°C ，黏滯係數(Viscosity in poise)： $1.86 \text{ g/cm}\cdot\text{sec}$)

節流閥氣導(C_t)： 50 L/sec (全開啟)。

整體管路氣導($\left(\frac{1}{C_t} + \frac{1}{C}\right)^{-1}$)： 0.34 L/sec 。

真空室端有效抽氣速率(S_{eff})： 0.33 L/sec 。

腔體極限(Ultimate)壓力： $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ 。

腔體終端(End)壓力：0.07mbar(0.05Torr)。

腔體起始壓力： 1013 mbar 。

估算的理想抽氣時間： **$\sim 17 \text{ min}$** (實際時間較估計值為長)。

由於管件排列方式及粒子過濾器皆會影響整體管路氣導估算，而管件串接方式會使整體氣導值愈串愈低，進而導致真空室有效抽氣速率(S_{eff})降低，故實際抽氣時間應會較估算值為長。

註 3：壓力傳感器上方有一個 Zero Adjust 旋鈕，如圖 D-9 所示，該旋鈕與控制

器上"Zero"按鍵功能相同，皆可做歸零動作，只不過使用者需在控制器"Zero"與傳感器上"Zero Adjust"其中擇一項執行。此外 Zero Adjust 旋鈕上可針對特定壓力作校正，例如對室壓(~1013mbar)做校正，在 1 大氣壓下轉動 Zero Adjust 旋鈕將壓力值調教為 1013mbar，需再次執行歸零動作；一般來說，以腔體極限低壓定義為零點準位。

D-4 MKS 651C 壓力控制器 RS-232 序列通訊

使用者在與 MKS 651C 壓力控制器建立 RS-232 序列通訊前，須先初步完成 D-2-3 節所述的 MKS 控制器基本參數設定，MKS 控制器通訊協定設定請參閱表 D-2 中最後 1 項。控制程式的通訊協定(Protocol)必須與 MKS 控制器內部的通訊協定設定相同(9600/8/None/CRLF，Stop bit=1)。

控制程式執行僅將菜單中的壓力設定值寫入 MKS 651C 壓力控制器的設定點 B(Set-point B)中，之後旋即持續讀取腔體壓力值(mbar)及節流閥開口度(%)；除此之外並未再對壓力控制器做任何設定，即事後不理，故程式僅使用數樣 MKS 通訊指令，即指定設定點、設定壓力、讀取壓力、讀取節流閥開口度、強制閥動作等 5 樣指令，餘指令皆透過上述手動設定取代。

MKS 651C 壓力控制器可透過 RS-232 序列通訊埠和電腦作遠端通訊，在通訊連結前使用者必須確認下列 2 項。

1. 將前置面板上 Key lock switch 切換至"Remote"，即將 MKS 651C 控制器切換成"Remote Operation"模式^註。
2. 確認控制器背後的 RS-232 9Pin 通訊接腳已連接上系統工業電腦的特定通訊埠，在 WK2008 磊晶系統中 MKS 651C 預設的連結通訊埠編號為 COM24。

註：在"Remote Operation"模式下，所有前置面板上的按鍵操作皆為無效，可避免不正常之誤動作。

MKS 651C 壓力控制器 RS-232 通訊指令包含設定及讀取等指令，其指令格式皆相同。以下僅列出系統控制程式所用到的控制指令，即設定及讀取壓力、指定設定點、讀取節流閥開口度、強制閥關閉等 5 項。常用設定

指令集請參閱表 D-5，常用讀取指令集請參閱表 D-6。

D-4-1 【指令格式(Command Format)】

【設定數值指令】

Command *value* 【CR】 【LF】

Command 為要下達的指令字元，格式為字串(String)，例如S1、S1(Set level of set point A)，T1(Set point A Control type)等。此外Command與*value*之間有1空字元。

value 為對應該指令的設定數值或指令代碼，格式為字串(String)。例如S1對應之*value*值即為% of F.S.，T1對應之*value*為代碼，0→position，1→pressure。

【CR】為遊標回頭(Carriage Return)，定義指令到此結束，後續為空位元(Empty space)，不屬指令範圍。

【LF】為換行(Line Feed)，即為ENTER(↵)，輸入指令的意思。

MKS設定指令需在數值後端使用【CR】【LF】作為中止字元(End-of-line delimiter)。當程式對MKS控制器下達設定指令後，控制器並不會再回傳確認訊息(Confirm message)給遠端電腦。

『設定Set point B壓力值為500mbar』

MKS 651C壓力控制器中，每組設定點控制模式皆可任意設定為壓力控制(Pressure)或為節流閥位置(Position)控制，其指令數值(*value*)皆為設定滿刻度的百分比率(%F.S.)，亦即壓力滿刻度的百分比率或節流閥全開時的百分比率(Direct control, Fully open→100%，Fully closed→0%)。

系統中MKS壓力控制器預設的設定點B (Set point B)為壓力控制，而控制器所定義的壓力傳感器滿刻度值為1333.2mbar(1000Torr)，故500mbar為滿刻度的37.5%。

下達的設定指令如下：

S2 37.5 【CR】 【LF】

意即為將設定點B壓力值設定為滿刻度值的37.5%，即500mbar。

D-4-2 【設定 MKS 動作指令】

設定 MKS 動作即為下達硬體執行特殊動作的指令，例如強制閥動作(C/O/H)、選定設定點(D1、D2...)等，該指令不需再給定數值。

Command 【CR】 【LF】

Command 為要下達之指令，形式為字串。

【CR】 為遊標回頭(Carriage Return)

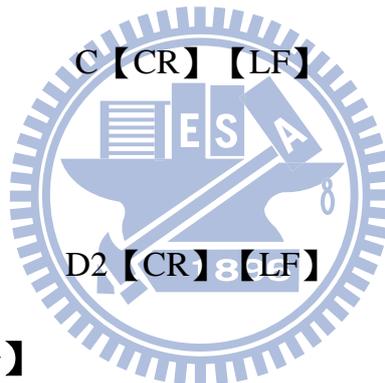
【LF】 為換行(Line Feed)

『強制節流閥關閉』

下達指令如下：

『選定設定點B』

下達指令如下：



D-4-3 【讀取數值指令】

Command 【CR】 【LF】

Command 為要讀取數值之指令

【CR】 為遊標回頭(Carriage Return)

【LF】 為換行(Line Feed)

MKS 651C 壓力控制器讀取指令提供遠端電腦讀取諸多硬體設定，包含讀取壓力、讀取目前設定點的設定值、各個設定點為壓力控制或節流閥開口度控制等，其中硬體回覆值型式可分為滿刻度百分率(% of F.S.)或代碼形式，詳細的 MKS 651C 壓力控制器讀取值指令內容可參閱 MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中第 134~139 頁，Appendix F：Request And Response Reference。

『讀取目前壓力』

指令如下：

R5【CR】【LF】

MKS 651C回應：

P value

MKS 651C控制器讀取壓力值的數值格式和設定壓力值的數值設定格式相同，皆為滿刻度的百分比率(%F.S.)。如果硬體回覆指令為P 75.5，代表目前壓力值為感測壓力滿刻度的75.5%(75.5 %F.S.)，亦即壓力值為 $75.5\% \times 1333.2\text{mbar} = 1006.5\text{mbar}$ 。

『讀取目前節流閥開口度』

指令如下：

R6【CR】【LF】

MKS 651C回應：

V value

硬體回覆指令為V 36.8，代表目前節流閥開口度為全開狀態的36.8%(36.8% of fully open)。

MKS 651C所有RS-232相關的通訊指令請參閱MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中第128~139頁，Appendix F: Command and Request Reference 部分。

表D-6列出MKS 651C壓力控制器的常用的RS-232設定指令集，表D-7則列出MKS 651C壓力控制器的常用的RS-232讀取指令集。詳細指令集請參閱MKS-Type 651C Pressure controller Manual 文件中第127~139頁，Appendix F: Command and Request Reference。

MKS 651C RS-232 序列通訊常用設定指令集	
S1 value	Set level of set point A; where value is the % of F.S. pressure for pressure set points; position for position set points. % of open for direct direction control % of closed for reverse direction control

S2 value	Set level of set point B; where <i>value</i> is the % of F.S. pressure for pressure set points; position for position set points. % of open for direct direction control % of closed for reverse direction control
S3 value	Set level of set point C; where <i>value</i> is the % of F.S. pressure for pressure set points; position for position set points. % of open for direct direction control % of closed for reverse direction control
S4 value	Set level of set point D; where <i>value</i> is the % of F.S. pressure for pressure set points; position for position set points. % of open for direct direction control % of closed for reverse direction control
S5 value	Set level of set point E; where <i>value</i> is the % of F.S. pressure for pressure set points; position for position set points. % of open for direct direction control % of closed for reverse direction control
D1	Select set point A
D2	Select set point B
D3	Select set point C
D4	Select set point D
D5	Select set point E
E value	Sensor range <i>value</i> 0=0.1 10=1000 1=0.2 11= 5000 2= 0.5 12= 10000 3= 1 13= 1.33 4= 2 14= 2.66 5= 5 15= 13.33 6= 10 16= 133.3 7= 50 17= 1333 8= 100 18= 6666 9=500 19= 13332
F value	0=Torr 1= mTorr 2= mbar 3μbar 4= kPa 5= Pa

	<p>6= cmH₂O 7= inH₂O</p> <p>Note : The F command merely assigns a label to the pressure unit. It doesn't convert pressure reading.</p> <p>Pressure readings are % of F.S.</p>
O	Open valve
C	Close valve
H	Hold valve
T1 value	<p>Set point A type where <i>value</i> is:</p> <p>0= Position</p> <p>1= pressure</p>
T2 value	<p>Set point B type where <i>value</i> is:</p> <p>0= Position</p> <p>1= pressure</p>
T3 value	<p>Set point C type where <i>value</i> is:</p> <p>0= Position</p> <p>1= pressure</p>
T4 value	<p>Set point D type where <i>value</i> is:</p> <p>0= Position</p> <p>1= pressure</p>
T5 value	<p>Set point E type where <i>value</i> is:</p> <p>0= Position</p> <p>1= pressure</p>

表 D-6 MKS 651C RS-232 序列通訊常用設定指令集

MKS 651C RS-232 序列通訊常用讀取指令集		
Request message	Information Requested	Request message
R1	Set point A value	<p>S1 <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of F.S.</p>
R2	Set point B value	<p>S2 <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of F.S.</p>
R3	Set point C value	<p>S3 <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of F.S.</p>
R4	Set point D value	<p>S4 <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of F.S.</p>
R5	System Pressure value	<p>P <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of F.S.</p>
R6	Throttle valve position	<p>V <i>value</i></p> <p>Where <i>value</i> is % of Fully open.</p>
R10	Set point E value	S5 <i>value</i>

		Where value is % of F.S.
--	--	--------------------------

表 D-7 MKS 651C RS-232 序列通訊常用讀取指令集

D-5 MKS 651C 壓力控制器硬體附件&參考資料

在壓力控制器的背面有該機器的型號，本機型為 651CD2S1N，無備用電池(Backup battery)，無使用 I/O 介面。詳細代碼請參閱 MKS-Type 651C Pressure controller Manual, Appendix B：Model Code Explanation, p. 115.

【MKS 651C 壓力控制器硬體規格】

MKS 651C Pressure controller hardware specification	
工作溫度(Ambient temperature)	15 to 40°C
類比輸出訊號(Analog output signal)	0 to 5 V or 0 to 10V, Selectable
閥位置控制(Position)	0 to 100%F.S. pressure, same range as sensor
壓力數值控制(Pressure)	
Controller repeatability	±0.1%F.S.
硬體重複性 (重覆控制在相同條件下的偏差值)	
連接頭(Connectors)	
閥(Valve)	9-Pin Type "D" female(母頭)
I/O 介面(I/O)	37-Pin Type "D" female(母頭)
壓力傳感器(Transducer)	15-Pin Type "D" female(母頭)
RS-232 介面(RS-232 Serial)	9-Pin Type "D" male(公頭)
顯示(Display)	2 line LCD with 4 1/2 place readout
可顯示單位(Display units)	Torr, mTorr, mbar, μbar, Pascal, kPa, cmH ₂ O, inH ₂ O
外部設定訊號 (External Sep-point signal)	0 to 5 V or 0 to 10V, Selectable
電源線規格(Fuse)	
Low power unit: 90 to 132VAC	0.63A(T), 250V, 5×20 mm
180 to 264VAC	0.315A(T), 250V, 5×20 mm
High power unit: 90 to 132VAC	1.25A(T), 250V, 5×20 mm
180 to 264VAC	0.63A(T), 250V, 5×20 mm

輸入電壓(Input power) 低功率型(Low power unit) 高功率型(High power unit)	90 to 132 or 180 to 264 VAC @50/60Hz 75VA (Max) 90 to 132 or 180 to 264 VAC @48/62Hz 150VA (Max)
介面(Interface) RS-232 Analog Digital	Input(16): HCMOS pulled high with a 4.7k resistor to be TTL compatible. Driver must sink 1mA and hold low for >50ms to select function. Output(6): HCMOS with 240Ω series protection resistor. Will sink& source 1 TTL load. Time constant< 500ns.
輸出功率(Output power) Low power unit High power unit	±15 VDC@0.5A(max) ±15 VDC@1.5A(max)
超過壓力感測範圍* (Over-range pressure)	±10.5V
壓力感測輸入訊號 (Pressure input signal)	-10 to 10V
Process limit 繼電器規格 (Process limit relays)	24V AC/DC@ 1A resistive(Constant ratings)
設定值(Set-points) 內部設定函數(Internal) 外部訊號設定(External)	5, each one pressure or position selectable 1, position selectable
大小(Size)	8.9cm(H)×24.1cm(W)×22.9cm(D)
重量(Weight) Low power unit High power unit	3.26Kg 2.04Kg
註：壓力傳感器輸入訊號限制上下限為±10V，如當輸入電壓為±10.5V，控制器判定為超出壓力偵測範圍，此時顯示螢幕上壓力數值將顯示+++++狀態。	

表 D-8 MKS 651C 壓力控制器硬體規格

【壓力傳感器(Transducer)規格】

MKS 651C 壓力控制器中壓力傳感器的型號為 628B，詳細型號為 628B18TBE1B。感測壓力滿刻度值為 1000Torr。其接腳腳位功能定義如表 D-9 所列，硬體規格如表 D-10 所列，由於該壓力感測器滿刻度值為 1000Torr，故僅需注意粗體字部份：

Baratron ^R Absolute Capacitance Manometers Type : 628B	
Specification	628B18TBE1B
Output	0 -10 VDC
Electrical connector	15 pin "D " connector
Full scale range (Torr)	0.05 0.10 1 2 10 20 50 100 1000
Ambient operating temperature (°C)	15~50 °C
Sensor operating temperature (°C)	Temperature-con trolled to 100°C
Accuracy in % of reading	0 .25% (1 Torr and greater) 0 .5% (less than 1 Torr)
Lowest suggested reading (Torr)	$2.5 \times 10^{-5} \rightarrow 0.05$ $5 \times 10^{-5} \rightarrow 0.10$ $5 \times 10^{-4} \rightarrow 1$ $1 \times 10^{-3} \rightarrow 2$ $5 \times 10^{-3} \rightarrow 10$ $1 \times 10^{-2} \rightarrow 20$ $2.5 \times 10^{-2} \rightarrow 50$ $5 \times 10^{-2} \rightarrow 100$ $5 \times 10^{-1} \rightarrow 1000$
	$2.5 \times 10^{-4} \rightarrow 0.05$ $5 \times 10^{-4} \rightarrow 0.10$ $5 \times 10^{-3} \rightarrow 1$ $1 \times 10^{-2} \rightarrow 2$

Lowest control pressure (Torr)	$5 \times 10^{-2} \rightarrow 10$ $1 \times 10^{-1} \rightarrow 20$ $2.5 \times 10^{-1} \rightarrow 50$ $5 \times 10^{-1} \rightarrow 100$ $5 \rightarrow 1000$
Proper zero adjust pressure (Torr)	$< 2.5 \times 10^{-6} \rightarrow 0.05$ $< 5 \times 10^{-6} \rightarrow 0.10$ $< 5 \times 10^{-5} \rightarrow 1$ $< 1 \times 10^{-4} \rightarrow 2$ $< 5 \times 10^{-4} \rightarrow 10$ $< 1 \times 10^{-3} \rightarrow 20$ $< 2.5 \times 10^{-3} \rightarrow 50$ $< 5 \times 10^{-3} \rightarrow 100$ $< 5 \times 10^{-2} \rightarrow 1000$
Initial warm-up time	2 hours for > 1 Torr range 4 hours for < 1 Torr range
Input power requirements or interface	± 15 VDC($\pm 5\%$) @ 600mA

表 D-9 MKS 628B 壓力傳感器規格表

MKS 628B 壓力傳感器接腳定義	
Pin number	Function
1	At temp status (Optional)
2	Pressure out
3	Reserved
4	At temp status Rtn (Optional)
5	Power return
6	-15VDC Supply
7	+15VDC Supply
8	Reserved
9	Htr Fail status (Optional)
10	Htr Rtn status (Optional)
11	Digital ground
12	Pressure output Rtn
13	Reserved
14	Reserved
15	Chassis ground

表 D-10 MKS 628B 壓力傳感器接腳定義

【節流閥(Throttle valve)規格】

MKS 651C 壓力控制器中節流閥型號為 253B-1-40-1，其法蘭(Flange)規格為 KF-40(I.D.=40mm)，接腳位功能定義/硬體規格如表 D-11/D-12 所列。

MKS 253B 節流閥接腳位定義	
Pin number	Function
1	Motor windowing A low
2	Motor windowing A high
3	Limit switch ground
4	Open limit switch signal
5	Closed limit switch signal
6	Motor windowing B high
7	Motor windowing B low
8	+15V @25mA (for Opto switches)

表 D-11 MKS 253B 節流閥接腳定義

MKS 253B throttle valve specification	
Valve type number	253B-1-40-1
Inside diameter(A)* inches(mm)	1.27(32.3)
Mounting flange	KF-40
Outside diameter(B)* unheated inches(mm)	2.75(69.9)
With heater <i>option</i> inches(mm)	3.00(76.2)
Controllable conductance(liter/sec)	
Min	0.2
Max	50
Closed leakage(Torr · Liter/sec)	<10 ⁻⁷
Flapper seal	Viton
Thickness(C)* inches(mm)	2.25(57.2)
Overall height unheated inches(mm)	8.64(219.5)
With heater <i>option</i> inches(mm)	8.81(223.8)
No. of bolt holes	N/A
Bolt hole diameter (D)*	N/A

Bolt circle diameter	N/A
Flange O-ring groove ID	N/A

表 D-12 MKS 253B 節流閥硬體規格

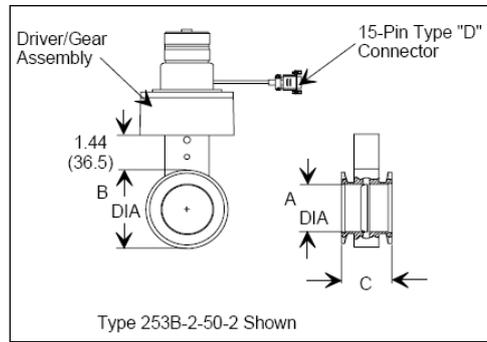
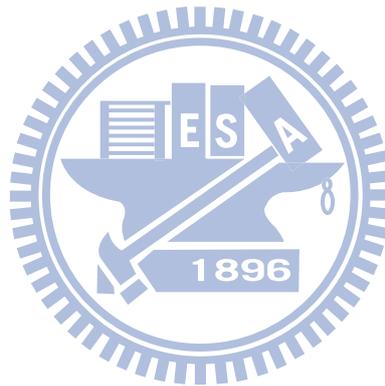


圖 D-10 MKS 253B Throttle Valve diameters with a KF style ISO flange

【參考資料】

1. 蘇青森著，真空技術 4th edition，台北市，台灣東華書局，1990。
2. 呂登復著，實用真空技術，新竹市，國興出版社，1993。



附錄 E SIC 數位式氣體質量流量控制器

SIC--Digital Mass Flow Controller

MODEL：MC-2100NC

本章節為針對 WK2008 系統中所使用的啟成(SIC)數位式氣體質量流量控制器之完整說明；章節架構主要分為流量計硬體設計介紹、流量計 RS-232 序列通訊指令說明、廠商提供之測試軟體使用說明、及硬體附錄等 4 大項，其中附錄內容尚包含控制中所遇到的軟硬體問題說明和觀念澄清，便於使用者查閱。

流量計硬體設計介紹內容包括流量計硬體簡介，包括氣體流量單位介紹、流量感測原理及感測電路設計理念說明等，再來針對啟成數位流量計基本機械結構設計概念、外部接線定義等作簡單說明，相關內容置於 E-1 流量計硬體設計介紹 小節中；再來則針對啟成數位式氣體流量計內部硬體功能及其相對應的參數預設值做完整介紹，主要包含內部警告函數、流量響應模式、平面閥動作模式等功能設定，其中所有硬體功能參數設定使用者需透過 RS-232 通訊介面來下達指令完成，相關內容置於 E-2 流量計基本硬體參數設定 小節中。

流量計 RS-232 序列通訊說明內容主要為流量計所有硬體設定參數所個別對應的指令碼功能、指令屬性及格式、指令寫法及硬體回傳值意義等作完整介紹，指令碼包含通訊協定設定、硬體裝置編號設定、類比/數位流量控制模式切換、流量響應模式、流量設定/讀取、平面閥動作等功能設定，詳細內容置於 E-3 流量計 RS-232 序列通訊相關指令集 小節中；此外警告函數相關設定及其指令碼對應的硬體異常狀態則獨立於 E-4 流量計內部警告函數 小節中做完整介紹，使用者可根據需求選擇查閱之。

廠商提供之測試軟體使用說明內容，包含流量計所有的硬體參數設定變更，及控制指令功能測試等，其中包含了流量計內部硬體參數的進階設定，

包含提供讀取及寫入流量計內部資料、零點流量校正、平面閥反應校正、流量計PID值設定等；此外文章內容亦附上個別進階校正功能的操作說明，及流量計的原始出廠設定資料檔對照表，提供使用者在校正流量計時相關進階參數的參考設定依據，詳細內容於 E-5 啟成流量計之測試程式相關功能及操作 小節中做完整介紹；這些進階設定功能必須透過該測試程式才能執行，嵌於LabVIEW平台上的系統控制程式並無流量計進階設定的設計。

本附錄最後1節為啟成數位式氣體流量計硬體資料附件，內容包含流量計硬體規格、控制中所遇到的軟硬體問題說明和觀念澄清等；其中軟硬體問題說明則分為7點列於該節的流量計常見問題內容中；由於在WK2008磊晶系統所有的硬體設定中，我們在啟成流量計硬體上設定遇過最多麻煩，所以特別在E-6節最後列出協助廠商資料，提供諮詢管道之用。

E-1 流量計硬體設計簡介

本節內容為啟成科技流量計硬體設計簡介，文章將先由流量單位介紹作為起始，俾使使用者了解流量計所使用的體積流量單位與質量流量之間的轉換關係；再來針對流量計質流量感測原理、感測毛細管路設計、平衡電橋電路設計做簡單說明，俾使使用者對於質流量感測有概念性的了解，而後文章將簡單介紹啟成數位式流量計的內部硬體設計、機械結構等。再來將針對啟成流量計外部接線及接腳做完整定義，提供使用者完整的流量計正常供電、RS-232 通訊介面連結、流量類比電壓訊號控制硬體接腳位定義等資訊；而本節最後舉出數十樣流量計較不易控制之氣體，及不易控制的理由作列表整理。

E-1-1 【流量單位介紹】

質量流量控制器(Mass flow controller, MFC)，又稱為質流量控制器，一般簡稱流量計，它是一種流量感測元件與控制閥件的精密機電組合，與一般流量計最大的差別在於它是利用熱感溫差、非接觸的方式測量氣體的質量流速，不同於一般測量體積流速的方法，所以能夠避免環境壓力與氣體

體積變化的影響，非常適合用在動態氣體流量控制(Dynamic flow control)。質流量控制器為控制單位時間內的氣體質量流量(Mass flow, $\frac{g}{min}$)，換句話說質流量控制器能精確控制單位時間內流經的氣體，亦即莫耳流量($\frac{mole}{min}$)。然而，一般質流控制器並不使用莫耳數作為流量單位，而是以特定溫度、壓力條件下的質量流量以體積流量(Volume flow, $\frac{c.c.}{min}$)單位來表示流體流量。一般質量流量控制器所使用的氣體流量表示單位為SCCM(Standard c.c. per minute)，其定義為在標準狀態下(STP, 0°C, 1bar)，每分鐘流經的氣體體積(Gas volume, c.c.)；質流量(Mass flow, $\frac{g}{min}$)與體積流量(SCCM)轉換如式(E-1)所示， M 為特定氣體分子量；

$$Mass\ flow(\frac{g}{min}) = \frac{SCCM(\frac{c.c.}{min})}{22400} \times M(g) \quad (E-1)$$

由於1莫耳的理想氣體在標準狀態(STP)下佔有的體積為22.4升(Liter)，所以將流量單位(SCCM)除以22400(c.c.)即可換算出單位時間內流經的氣體莫耳數，再乘以分子量即可獲得質流量。

一般工業界在流量控制上分為控制體積流量或質量流量，表E-1即為體積流量(Q_v)與質量流量(Q_m)之間比較；兩者有式(E-2)的關係：

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_v \quad (E-2)$$

其中 ρ_v 為流體之密度。由於體積流量會隨壓力與溫度而改變，所以在控制上並不是很精準；半導體製程所用的氣體流量控制，則通常使用不受環境變異而改變的質量流量控制器；而在一般MOCVD系統運用中，通常使用 H_2 、 N_2 、 NH_3 、 AsH_3 、 PH_3 、 SiH_4 等氣體質流量控制器來精確控制氣體分子數。

Volume Flow Rate Q_v (c.c./min)	Mass Flow Rate Q_m (g/min)
1. Changed by pressure variance.	1. Unchanged by pressure variance.
2. Changed by temperature variance.	2. Unchanged by temperature variance.
3. Unit scale can be sensed by intuition.	3. Unit scale can not be sensed by intuition.
4. Improper unit for MFC.	4. Proper unit for MFC.
5. Improper unit for process design.	5. Proper unit for process design.

表 E-1 質量流量與體積流量比較

E-1-2 【質流量(Mass flow)感測原理】

流量計氣體質流量感測方式為加熱流經毛細管路內的微量氣體，並藉由偵測氣體在加熱前後的溫度變化(ΔT)，藉由熱敏電阻將溫度變化轉換成電壓訊號來測定流經的氣體質流量。

仔細說明流量感測原理之前，先考慮基本熱學原理，物質的溫度變化係與促成此溫度變化的熱量成正比，如式(E-3)所示，

$$Q = C\Delta T = C(T_f - T_i) \quad (\text{E-3})$$

在式(E-3)中， Q 為物質所吸收的熱量(J)，其比例常數 C 稱為該物質的熱容量($J/^\circ C$)， T_i 及 T_f 個別代表物質的初始溫度及終端溫度；物質熱容量與其質量成正比，因此可定義出一個與質量無關僅與該物質特性有關的物理量，即比熱 c ；比熱即為物質單位質量的熱容量，故式(E-3)可改寫為如式(E-4)表示，

$$Q = mc\Delta T = mc(T_f - T_i) \quad (\text{E-4})$$

在式(E-4)中， m 為物質質量(g)， c 為物質比熱($J/g^\circ C$)。在質流控制器運用中，若已知單位時間內加熱源所提供的熱量(Q)，及加熱源與管路之間的熱量逸散，在已知氣體比熱(c)條件下，即可藉由式(E-5)獲得單位時間內流經的氣體質流量($\Delta m/\Delta t$)。

$$k \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Delta m \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{E-5})$$

式(E-5)中的 k 與熱量逸散與介面熱能傳導有關， t 為時間(sec)。

質流控制器的質流量感測為利用熱敏電阻(Thermistor)所構成的惠斯同電橋電路(Wheatstone bridge)之輸出端電壓平衡原理，藉由平衡時溫度差來計算所流經氣體質流量，基本流量感測的硬體設計如圖E-1所示，在圖E-1中氣體經由紊流整流元件(Turbulence filter)將氣流整為層流後(整體氣流具有單一流向且流速均勻)，微量氣體流經口徑極小的毛細管路(Capillary conduit)內，且主管路口徑與毛細管路口徑比例為已知參數。在毛細管路外

圍的上、下游端各別纏繞 R_u 及 R_d 共2個熱敏電阻；在 R_u 及 R_d 熱敏電阻之間的管路外圍纏繞加熱線圈(Heating coil)，將經過此段管路的氣體均勻加熱，通過的微量氣體會吸收該熱量，置於上游端(Upstream)的熱敏電阻 R_u 感測加熱前的氣流溫度，而配置於下游端(Downstream)的熱敏電阻 R_d 則感測受熱後的氣流溫度，由於氣體量極少，故溫度變化較為明顯，這即為只需微量氣體通過毛細管路的原因；透過熱敏電阻阻抗改變可間接推得氣流受熱前後的溫度變化(ΔT)，利用式(E-5)，在已知氣體比熱、加熱源單位時間輸出熱量的條件下，即可獲得毛細管中單位時間內的氣體質流量，如式(E-6)所示；再由主管路與毛細管路口徑比算出整體氣流質流量。

$$\Delta m / \Delta t = k \cdot \Delta Q / \Delta t \cdot (c \cdot \Delta T)^{-1} \quad (E-6)$$

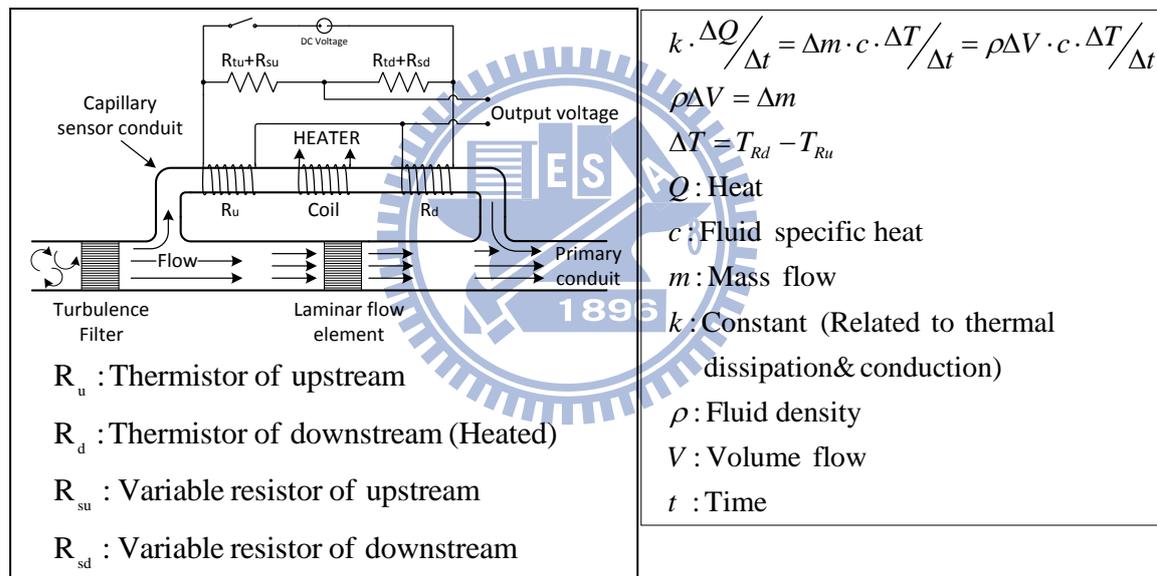


圖 E-1 流量計感測惠斯同電橋電路設計

圖 E-1 顯示流量計的流量感測電路設計， R_u 、 R_d 、 $R_{tu}+R_{su}$ 、 $R_{td}+R_{sd}$ 這 4 個電阻構成惠斯同電橋，其中 R_u 、 R_d 、 R_{tu} 、 R_{td} 為熱敏電阻， R_{su} 、 R_{sd} 為可變電阻，其阻抗不為溫度函數。此外電橋兩端外加直流電源(DC)，"Voltage output"即為電橋兩端的輸出平衡電壓。在惠斯同電橋結構中，毛細管路上游的 R_u 熱敏電阻偵測管路上游氣體溫度，而位於毛細管路下游的 R_d 熱敏電阻則偵測下游氣體溫度；另外有一組與毛細管路上 R_u 、 R_d 熱阻抗特性相同的熱敏電阻(R_{tu} 、 R_{td})，配置在有別於毛細管路的相對應上下游處，如圖

E-1 上方所示，其主要功用為感測周圍溫度，並作為溫度補償用；此即構成定溫電橋電路，而在電橋上 R_{tu} 、 R_{td} 熱敏電阻端分別串接阻抗值不隨溫度變化的可變電阻(R_{su} 、 R_{sd})，目的為使其電橋輸出端電壓恆定為 0V，故定溫電橋電路要隨時保持式(E-7)的阻抗匹配關係：

$$R_u(\text{gas flow}) = R_{tu} + R_{su}(\text{ambient sensor}) \quad (\text{E-7(a)})$$

$$R_d(\text{gas flow}) = R_{td} + R_{sd}(\text{ambient sensor}) \quad (\text{E-7(b)})$$

當沒有氣體流過毛細管路時， R_u 、 R_d 、 R_{tu} 、 R_{td} 的阻抗值相同，都為周遭溫度所反應的阻抗值，此時電橋平衡且輸出端電壓為 0V。

當有氣體流經毛細管路時， R_u 反應之阻抗為進口端氣體溫度，由於在 R_u 與 R_d 之間毛細管路纏繞加熱線圈用以加熱氣體(單位時間輸出熱量固定)，而當氣體吸收熱量後， R_d 所反應之阻抗即為氣體吸熱後的溫度；此時電橋輸出不平衡，且輸出電壓不為 0V，必須藉由調整 R_{su} 及 R_{sd} 的電阻值，以使電橋端電壓回復至原先未通氣體前的平衡輸出值($V_{out}=0$)；而可變電阻微調後的總電阻值($R_{tu}+R_{su}$ 、 $R_{td}+R_{sd}$)與毛細管路中的 R_u 、 R_d 阻抗值相互匹配(即滿足式(E-5))，使得電橋輸出電壓為 0V，可變電阻微調量(ΔR)代表毛細管內溫度與環境溫度偏差量，藉由阻抗匹配關係可獲得此時 R_u 、 R_d 等熱敏電阻阻抗值，如此即可得知目前在毛細管路中的上下游氣體溫度差(ΔT)，藉由式(E-6)(此時氣體比熱值採用條件為環境溫度所對應的比熱值)和管路口徑比，即可換算單位時間所流經的氣體總質流量；由於上下游的氣體溫度差變化甚小，藉由改變可變電阻方式可避免直接量測毛細管路上的熱敏電阻(R_u 、 R_d)，因為量測電流所產生的熱可能會使熱敏電阻溫度發生微量變化而使阻抗值誤判，間接造成流量誤差，故流量計利用致使電橋平衡的阻抗匹配方式來估算熱敏電阻(R_u 、 R_d)所對應的溫度差。

流量計內部控制晶片會整合並運算熱敏電阻溫度差所對應的氣體質流量、目前流量設定值、電橋端回饋電壓訊號等，電壓訊號經放大器放大為 0~5V 輸出，內部電路將該流量檢測電壓與設定電壓進行比較，再將電壓差值訊號(Differential signal)傳給管路後端的壓電致動器(Piezo actuator)來

驅動柱塞(Plunger)，藉以控制平面閥(Plane valve)的開口大小來控制所通過之氣體流量；詳細驅動方式不在本論文討論範疇。啟成科技數位式流量計的內部硬體設計及配置關係如圖 E-2 所示，其機械結構簡圖如圖 E-3。

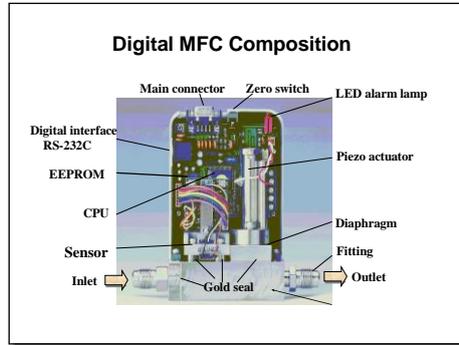


圖 E-2 數位式流量計內部電路

圖 E-3 為流量計出口端平面閥(plane valve)的機械結構設計，平面閥本體使用聚三氟乙烯(PCTFE)材質，可避免閥本體液化及降低其熱形變，詳細聚三氟乙烯特性請參閱 E-6 附件；流量計本體為 SUS-316L 不銹鋼材質，接合端則利用純金來封真空(Golden sealing)，可提高接合處的抗腐蝕性及降低外部洩漏率^註。

註：外部洩漏率定義為流量計本體與外在大氣環境的洩露程度。

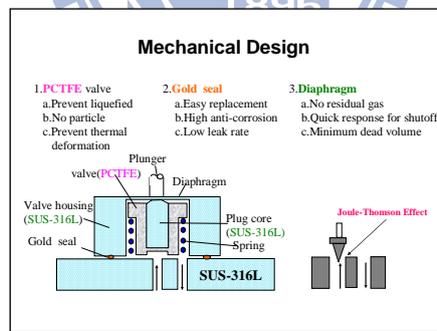


圖 E-3 流量計機械結構設計

圖 E-4 為啟成流量計的運作原理，主要由 RS-232 數位通訊介面、中央處理器、EEPROM 記憶體、12 bits A/D，D/A 轉換電路、感測電路，與平面閥本體驅動電路等硬體所組成，並藉由中央處理器整合訊號來達到流量控制；在圖 E-4 中可看到流量計進口端為感測電路所在，且僅由少部分氣體通過溫度感測(Temp. Sensor)毛細管路，而流量計出口端則由壓電致動器(Piezo actuator)來控制平面閥開口度，達到流量回溯控制。

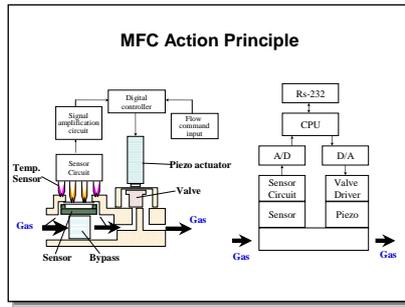


圖 E-4 流量計硬體作動原理

圖 E-5 為流量計平面閥的壓電致動器(Piezo actuator)簡單介紹，壓電致動為由壓電材料製成，該材料可藉由加在其上的電壓來改變伸長量，主要優點為有較快的反應速度，及較高的可控伸長量解析度。

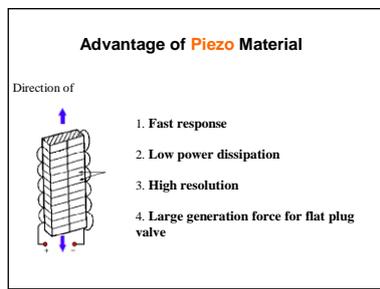


圖 E-5 流量計壓電致動器(Piezo Actuator)

圖 E-6 為啟成數位流量計的內部中央處理器(CPU)設計結構簡圖。

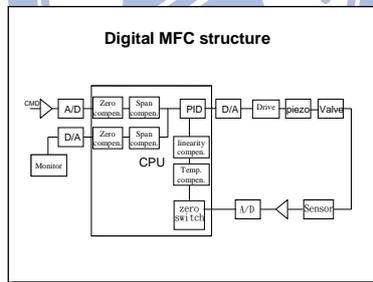


圖 E-6 數位流量計電路設計結構

E-1-3 【流量計 I/O 埠定義】

啟成科技所設計的類比流量計其 I/O 端子接線定義如圖 E-7 所示，包含了±15V 供電源(Pin 1, 3, 4)、設定流量所需的 0~5V 類比電壓訊號(Pin 2, 5, 6)，及直接控制平面閥開關動作的電壓訊號(Pin 8)。

啟成 *mc2100-NC* 系列流量計為常閉型(N.C.)數位式流量計，其為電壓訊號控制的類比式流量計內部嵌入數位訊號控制晶片改裝而成，故流量控制分為下達數位指令或給予類比電壓等 2 種方式來完成。

在數位流量計的 I/O 接線上，其中控制流量輸出(Pin2,5,6)及平面閥開關

控制(Pin8)的類比輸入電壓接腳位皆沒有再外接線路，而是由位於流量計側邊之圓形公接頭^{註1}所提供的 RS-232 通訊傳輸介面來達到流量計數位控制。位於流量計上方的 8 Pin D05 型公接頭(D-type male connector)內部則改裝成 3 條裸線，作為流量計硬體的直流±15VDC 供電；其中綠線(1：電源 0V)，紅線(3：正電源+15V)，黑線(4：負電源-15V)等 3 條線作為直流±15V 供電用，其餘腳位不外接任何線路。

如果使用者想利用類比介面來控制流量計，除了上述直流±15V 供電接線腳位外，8 Pin D05 型公接頭需再外接流量計類比控制電壓接腳，即 Pin2, 5, 6, 8;其中 Pin 2,5 腳位相接，Pin 6 則接至外部直流 0~5V 作為流量輸入(設定)類比電壓。Pin 8 接腳則為強制平面閥開關的控制輸入電壓，使用者可輸入 0 或 5V 直流電壓作為平面閥開關的控制訊號用。(Pin8 與 Pin2 短路→平面閥關閉，Pin8 接 5V→平面閥開啟；不接→平面閥受控。)

上述所提的腳位編號(Pin number)皆為流量計端 8 Pin D 型公接頭的接線定義，使用者真正連接的外部接線為圖 E-7 左方的 9 Pin D 型接頭(External signal 9 Pin D Connector)，必需根據內部接線連結來定義外部接線^{註2}，舉例來說-15V 供電源須接至外部 9 Pin D 型接頭的 Pin 5，再透過連接纜線(Cable)接至流量計 8 Pin D 型接頭中的 Pin4。

註 1：作為 RS-232 通訊傳輸線路接腳(Rx, Tx, Com)的圓形公接頭，與作為流量計 ±15VDC 供電的 9 Pin D 型公接頭相互為獨立線路。

註 2：外部接線的 Pin 4,7,8 需短路且接至電源 0V 端(Com)，Pin 9 不接。

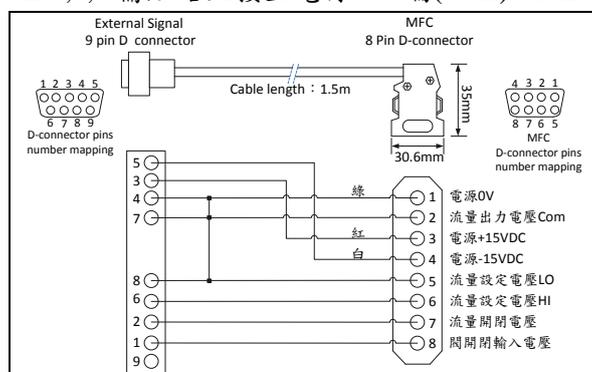


圖 E-7 流量計 I/O 端子接線圖

E-1-4 【流量計不易控制之氣體】

流量計對於具有下列 3 項特性的氣體特別不易控制：

- 易與水氣結合產生高腐蝕性的氣體，造成粒子(Particle)阻塞。
- 易液化之氣體，容易阻塞流量計。
- 易與殘留水氣或 O₂、N₂ 結合的氣體，產生粉末物阻塞流量計。

表 E-2 列出數種流量計不易控制的氣體及其不易受控制的氣體特性。

	NH ₃ (氨氣)	BCl ₃ (三氯化硼)	Cl ₂ (氯氣)	B ₂ H ₆ (乙硼烷)	SiH ₂ Cl ₂ (二氯二氫矽)	Si ₂ H ₄ (氧化矽烯)	HBr (溴化氫)	HCl (氯化氫)
易與水氣結合產生高腐蝕性，造成 particle 阻塞	V	V	V				V	V
易液化之氣體，容易阻塞 MFC					V	V		
易與殘留水氣或 O ₂ 、N ₂ 結合，產生粉末物阻塞 MFC				V				

表 E-2 流量計不易控制之氣體

	HF (氫氟酸)	SiH ₄ (矽甲烷)	WF ₆ (六氟化鎢)	CH ₃ CCl ₃ (三氯乙烷)	C ₂ H ₅ OSi	C ₄ F ₈ (八氟環丁烷)	C ₅ F ₈ (全氟化環戊烯)
易與水氣結合產生高腐蝕性，造成 particle 阻塞	V		V				
易液化之氣體，容易阻塞 MFC				V	V	V	V
易與殘留水氣或 O ₂ 、N ₂ 結合，產生粉末物阻塞 MFC		V				V	

表 E-2 流量計不易控制之氣體(續)

E-2 流量計基本硬體參數設定

E-2-1 【流量計基本設定參數功能介紹】

在使用啟成數位式氣體流量計之前，必需先針對流量計內部控制參數作初始設定。由於流量計內部並未提供手動設定功能，故使用者必須透過軟體指令經由通訊傳輸介面對流量計作相關參數設定；詳細的流量計內部硬體控制指令碼、指令功能意義、通訊訊息格式(Message format)等內容於E-3 流量計 RS-232 序列通訊相關指令集內敘述。

本小節為針對流量計內部硬體功能及其相對應的參數預設值做介紹，相關參數如以下 10 項所列，文章後續將分項做細部功能介紹；而流量計內部所有硬體功能及其預設參數值則分項列在表 E-5 供使用者參考。

- 流量計裝置編號設定(Device No.)
- 警告函數設定(Alarm function setting)
- 警告函數計時器設定
- 警告函數致能/禁止選擇
- 類比/數位控制選擇
- 平面閥控制模式
- 流量設定值低於全流量的 2%(2%F.S.)時，平面閥對應狀態設定
- 流量反應速率設定
- 氣體質量轉換係數設定(C.F. value)
- RS-232 通訊傳輸協定設定

以下 10 點內容為流量計提供的參數設定功能敘述。

(1) 流量計裝置編號設定(Device No.)

流量計裝置編號設定，有 00~99 共 100 組可供選擇，使用者可根據需求定義個別流量計編號。

(2) 警告函數設定(Alarm function setting)

啟成數位式流量計提供 2 組警告函數包含 Alarm A，Alarm B 可供使

用者設定，其中 Alarm A 的警告功能主要有供電源低電壓警示、RS-232 通訊協定錯誤警示、內部電子式可抹除可編程唯讀記憶體 (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM) 存取錯誤、流量偏差警示(Flow derivation)等；Alarm B 的警告功能則包含有非正確流量零點設定警示(Unauthorized Zero flow setting)、流量感測電橋電路中電壓、電流異常警示、平面閥電壓變化異常警示、流量感測電橋電路輸出電壓不平衡(Wheat stone bridge $V_{out} \neq 0$)等；使用者可設定個別警告函數的執行狀態(許可/禁止)，且警告函數的參數設定值範圍皆為 0~99%，Alarm A 預設值為 5%，Alarm B 預設值為 20%。

(3) 警告函數計時器設定(Alarm Timer)

使用者可任意設定警告函數的狀態觸發計時器(Trigger timer)，其單位為秒，預設值為 5 秒，即設定硬體每隔 5 秒偵測一次警告函數狀態是否被觸發。

(4) 警告函數致能/禁止選擇(Alarm Output disable & enable)

Alarm A 與 Alarm B 可個別設定其函數執行狀態為致能或禁止

(5) 類比/數位控制選擇(Analog/Digital Control)

啟成數位式流量計提供使用者 2 種流量控制模式，包含類比電壓訊號 (Analog) 及數位指令(Digital command) 控制；流量計原始設定為流量類比電壓訊號控制，使用者可透過 RS-232 通訊傳輸介面將其切換成數位指令控制，此時 9 Pin D 型公接頭不需額外變更接線；但如果硬體設定為類比電壓訊號控制，則使用者必須再額外更動流量計外部 9 Pin D 型公接頭的接線，詳細接線變更可參閱 E-1-3 流量計接線定義。使用者可透過 9 Pin D 型公接頭中的 Pin 6 腳位輸入 0~5V 直流電壓訊號來達到流量設定，Pin 7 腳位則為硬體目前實際流量所對應的直流輸出電壓，輸出電壓範圍仍為 0~5V^{註 1}；使用者可藉由流量計特殊指令來讀取該電壓值，詳細指令內容請參閱 E-3 流量計 RS-232 序列通訊相關指令集『SA (讀取類比流量直流電壓控制訊號)』。

流量計的流量控制訊號模式為下達數位指令還是給予類比電壓端視使用者的選擇，若流量控制設定為接收數位指令，則下達指令碼CD(Change to digital mode)；而若設定為給予類比電壓控制(0~5V)，則下達指令碼CA(Change to analog mode)，詳細CD/CA通訊指令寫法請參閱E-3-2 流量計基本RS-232通訊指令集的類比/數位流量控制模式切換內容。流量計之流量控制模式的快速檢視及變更請參閱E-5-1測試程式的基本流量計設定功能。如果流量計設定為數位控制，在啟成流量計的指令格式中，輸出流量的數位設定值與讀取值皆是以5個連續字元表示，其範圍為00000~10000，10000表示設定/讀取流量值為100%F.S.，00000則表示流量設定/讀取值為0%F.S.，其數位流量設定/讀取值與實際流量、類比輸入電壓間皆為線性比例對應關係，詳細對應關係如表E-3所示，表E-3列出流量計的數位指令(設定/讀取)與實際流量輸出、類比控制(輸入)電壓彼此之間的線性轉換關係。此外表E-3以全流量為5000sccm的流量計為例，流量計最高類比輸入直流電壓為5VDC。

實際流量值 (sccm)	數位(設定/讀取)的指令格式 (String)	類比(輸入)控制電壓 (VDC)
5000	10000	5
3000	06000	3
2500	05000	2.5
1000	02000	1
0	00000	0

表E-3 流量值與數位指令格式、類比(輸入)控制電壓對照表

註1:流量計輸入流量(%F.S.)與其直流輸入電壓為線性對應關係，即5V對應全流量、2.5V對應50%F.S.、1.25V對應25%F.S.、0V對應0%F.S。

註2:WK2008控制系統中所有流量計皆為數位通訊，故需要注意通訊方式有無被更動成CA模式。

(6) 平面閥控制模式(Plane Valve Forced Control)

流量計內部有4種平面閥強制動作可供使用者選擇；包含強制閥開啟，強制閥關閉，閥保持該狀態(Hold)，閥為受控狀態(Controllable, Servo state)，其中平面閥受控為預設狀態。

(7) 流量設定值低於全流量的 2%(2%F.S.)時，平面閥對應狀態設定

當流量設定值低於 2 % F.S.時，流量計提供下列 3 種平面閥狀態供使用者設定。

1. 【Normal】：

一般控制狀態(Ordinary Control Mode)，平面閥動作受流量回朔訊號控制。由於流量低於最低可控制流量範圍，故平面閥動作較不穩定。

2. 【2% Close】：

當設定流量值為 2 %F.S.或低於 2 %F.S.時，閥設定為自動關閉，此時平面閥動作不受流量回朔訊號控制。

3. 【2% Hold】：

當輸出流量為 2 % F.S 或低於 2 % F.S.，平面閥動作維持 2% F.S.狀態(2%F.S.流量對應之閥開口度)，平面閥動作不受流量回朔訊號控制。

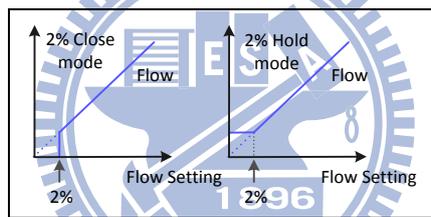


圖 E-8 閥控制輸出模式

(8) 流量反應速率設定(Flow Reaction Speed)

啟成流量計提供 2 種流量響應速率可供選擇，包含流量快速(Fast)及慢速(Slow)響應，快速響應可在 1 秒內到達設定流量值。

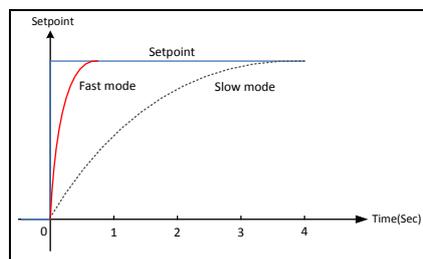


圖 E-9 流量反應時間比較圖

(9) 氣體質量轉換係數設定(C.F. value)

由於流量計在原廠校正時皆以 N_2 作為校正氣體，所以在實際通入應用氣體時需乘以質量轉換係數(Mass conversion Factor, C.F.)^註，藉以轉換通入的實際氣體質流量；詳細的氣體轉換參數對照表請參閱E-6 啟成(SIC)

氣體流量計硬體資料附件。WK2008 磊晶系統中所使用的流量計一般都是控制H₂為主，所以硬體內部預設的C.F.值為1.012，其中控制NH₃的流量計，NH₃(H)及NH₃(L)，C.F.值為0.77。此外由於在流量計出廠之前已將C.F.值寫入硬體中，故使用者不可再任意設定流量計的氣體質量轉換係數，僅能做讀取動作，詳細指令請參閱E-3-2流量計基本RS-232通訊指令集中氣體質量轉換係數(C.F.值)讀取內容。

註：【流量計流量設定】

由式E-4得知，經由加熱氣體前後端的溫度差(ΔT)，可以獲得流體流量，對於不同的氣流源有不同的溫度差，我們可以定義一個常數去推算正確的流體流量轉換。

【定義C.F.值(conversion factor)】

對同一流動區域，舉個例子，質量m₁的N₂消耗h₁的熱量，則對於消耗相同熱量(h₁)的NH₃氣體，需要多少質量(m₂)？

根據實驗，我們可得到各種氣體相對於N₂的轉換係數(conversion factor, C.F.)，如表E-4所列，NH₃的C.F.值為0.77，則m₂可以經由(E-8)得到：

$$m_2 = m_1 \times C.F. \quad (E-8)$$

簡單來說，C.F.值為因應不同氣體之間的比熱、密度等物理量差異，所得的氣體質量轉換係數，表E-4提供一些氣體相對於N₂的C.F.值。

Gas	C.F.	Gas	C.F.
N ₂	1.000	H ₂	1.010
Ar	1.400	WF ₆	0.240
BCl ₃	0.470	NH ₃	0.770
Cl ₂	0.860	AsH ₃	0.670
SiH ₄	0.645	B ₂ H ₆	0.440

表E-4 常見氣體之C.F.值

(10) RS-232 通訊傳輸協定設定

啟成數位式流量計 RS-232 通訊傳輸協定設定中，波特率預設值為1200bps、字元長度為7位元(bits)、停止位長度為2位元、無奇偶校驗位(Polarity check bit)；系統中除了波特率設定為9600bps外，其餘設定皆維持流量計預設值。

啟成數位式流量計內部提供的硬體設定功能列表、功能簡述、個別功能所對應的參數其可設定種類/範圍，及硬體參數初始設定值等資訊，如表E-5 所列。註：%F.S.代表全流量的百分比率(% of Full scale)。

流量計設定選單	功能簡述	可設定的種類/範圍	初始設定值
Device No.	MFC 硬體編號設定	00-99	00
Alarm-A	Alarm-A 範圍設定	0-99%	5%
Alarm-B	Alarm-B 範圍設定	0-99%	20%
Alarm Timer	Alarm Timer 範圍設定	0-99 秒	5 秒
Alarm-A 輸出禁止許可	Alarm-A 輸出(禁止/許可)設定	禁止\許可	許可
Alarm-B 輸出禁止許可	Alarm-B 輸出(禁止/許可)設定	禁止\許可	禁止
控制 A 或控制 D	流量控制(類比/數位) 模式切換	類比\數位	類比
平面閥狀態控制	Close, Open, Hold, Servo	C\O\H\S	Servo
響應速度	流量響應速度設定	Fast/ Slow	Fast
流量<2%F.S.，閥狀態 設定	流量低於 2%F.S.時， 平面閥對應狀態設定	2% Close / 2% Hold / Normal	Normal
轉換係數(C.F.)	氣體轉換係數設定	0.66-1.5	1.000
RS-232 通信協定	波特率	1200,2400,4800,9600	1200 bps
	起使位元	1 bit	1 bit
	字元長度 (ACSII CODE)	8 bit, 7 bit	7 bit
	同位檢查	奇數,偶數,無	None
	停止位元	1 bit, 2 bit	2 bit

表E-5 啟成數位式流量計相關預設參數對照表

E-3 流量計RS-232序列通訊相關指令集

由於啟成數位式流量計並無提供手動調整功能，故其硬體內部參數均需要透過數位通訊傳輸介面來做上述參數的寫入與讀取動作。本節即為介紹啟成數位式流量計其RS-232序列傳輸的完整通訊指令碼。指令碼功能包含變更通訊協定格式、硬體裝置編號設定、類比/數位流量控制模式切換、數位指令格式的流量值設定/讀取、類比電壓格式的流量值設定/讀取、流量響應模式設定、流量設定值低於2%F.S.時，平面閥對應狀態的設定指令、平面閥強制控制設定、讀取閥電壓值、氣體質量轉換係數(C.F.值)讀取、流

量零點設定、警告函數設定等。後續文章將依序介紹上述功能所對應的指令碼，及其指令寫法及格式、可供寫入的參數範圍、硬體回傳值意義、數位指令與其類比電壓轉換關係等項；警告函數相關設定及其指令碼對應的硬體異常狀態則獨立於E-4節介紹，使用者可根據需求選擇查閱之；此外本節所述的通訊指令為E-5節中廠商所附的測試程式相關功能及操作基礎，若使用者已熟悉相關指令意涵，往後流量計設定可直接利用該測試程式來執行，不過需另行更換流量計與系統工業電腦所連結之實體通訊埠，詳細設定請參閱E-5節內容。

E-3-1 【流量計RS-232序列通訊協定初始設定】

WK2008 磊晶系統中所使用的啟成數位式氣體流量計其型號為**SIC MC-2100NC**系列，該系列的數位式流量計可透過RS-232通訊介面和系統控制程式作連結。在和硬體作通訊前，使用者必須先瞭解其指令格式，及針對RS-232通訊協定作初始設定，其中包括波特率、指令位元長度、極性判定位元(奇偶校驗位)、停止位元等通訊參數設定。

【指令型式(Command Format)】

流量計通訊指令應為如下形式：

□□,○○ 【CR】 【LF】

□□ 為此MFC的硬體編號(Device number)，為字串(String)格式。

○○ 為對此MFC所下達的指令代碼(Command)，也為字串(String)格式。

【CR】為遊標回頭(Carriage Return)，定義指令到此結束，後續為空位元，不屬指令範圍。

【LF】為換行(Line Feed)，即為ENTER(↵)，輸入指令的意思。

註:流量計指令皆為字串(String)格式。

【通訊協定設定(Communication Protocol Settings)】

SIC MC2100系列流量計其RS-232通訊協定初始設定值如下：

1. 波特率(Baud Rate) =1200 bps
2. 位元長度(Bit Length) =7 bits

3. 極性判定(Parity check) =None

4. 停止位元(Stop bit) =2 bits

使用者可經由下列2個程式碼改變其通訊協定；

『TS (改變波特率)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,TS 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Baud Rate Code】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Baud Rate Code】 【CR】 【LF】

注意: 波特率編碼(Baud Rate Code)的範圍從01到04，以下為其代碼(Code)。

01=1200bps

02=2400bps

03=4800bps

04=9600bps

註1:當使用者對流量計下達寫入指令時,初始為呼叫硬體並傳達寫入動作,即下達[Device No.],Command;此時硬體會回覆[Device No],AK/NK,當硬體回傳AK代表硬體已處於等候使用者下達指令對應的參數;如回傳NK則代表指令格式或範圍有誤,需再重新下達寫入指令。而在使用者寫入參數後,硬體會回傳[Device No.],Parameter,Parameter亦即使用者寫入的參數值,作為已寫入硬體的確認回條。

註2:WK2008控制系統中,所有啟成流量計的硬體編號(Device number)皆為00,通訊傳輸的波特率(Baud rate)皆為9600bps。

『TP (改變通訊協定)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,TP 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Protocol Code】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Protocol Code】 【CR】 【LF】

注意: 通訊協定代碼(Protocol Code)的範圍從01到0C, 表E-6為個別代碼所對應的通訊協定參數, TS指令為設定流量計的通訊協定, Labview平台上程式通訊協定設定需和流量計設定相同, 程式之通訊協定設定可透過Labview平台上VISA Serial

communication物件()來做相關定義。

代碼	Polarity check	Date length(bits)	Stop bits
01	No	7	2
02	No	7	1
03	No	8	2
04	No	8	1
05	Odd	7	2
06	Odd	7	1
07	Odd	8	2
08	Odd	8	1
09	Even	7	2
0A	Even	7	1
0B	Even	8	2
0C	Even	8	1

表E-6 "TS"指令對應的通訊協定代碼表

註: WK2008控制系統中, 所有啟成流量計的通訊協定皆為(9600, No polarity check, 7, 2)。

E-3-2 【流量計基本RS-232通訊指令集】

表 E-3 中所列的流量計相關參數皆可透過控制指令作設定(寫入)/讀取動作, 本小節內容即包含流量計所有基本的 RS-232 通訊指令集, 包括流量計硬體編號設定、類比/數位流量控制模式切換指令、類比流量控制模式相關指令、數位流量控制模式相關指令、實際流量讀取指令、流量響應模式設定、流量設定值低於 2%F.S.時, 平面閥對應狀態的設定指令、平面閥強制控制設定、讀取閥電壓值、讀取流量計狀態、氣體質量轉換係數(C.F.值)

讀取、流量計零點設定等指令集；各項指令有其相對應的指令碼，且所有指令格式皆相同，使用者可根據需求選擇查閱之。此外流量計警告函數(Alarm A/B)意義及參數設定，硬體錯誤狀態指令碼意涵等內容則於 E-4 節中作詳細敘述。

【流量計硬體編號設定】

流量計初始硬體編號皆為00，如果使用者單用1個序列通訊埠來監控串接的多台流量計時，在使用前必需分別設定它們的硬體編號，且每台流量計的編號必須各不相同，所有硬體通訊協定設定則需相同，以下為改變硬體裝置編號的指令。

註：由於WK2008控制系統中已配置3張提供8個平行傳輸的RS-232通訊埠介面卡--PCI-1620A，因所有流量計皆透過獨立的通訊埠傳輸資料，所以使用者不必更動每台流量計的硬體編號，WK2008系統中所有啟成流量計硬體編號皆為00。

『DW (改變硬體裝置編號)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,DW 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【New Device No】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【New Device No】 【CR】 【LF】

注意: AK=Acknowledge(收到)

NK=Not Acknowledge(沒收到)

流量計可設定的硬體編號範圍為00到99。

【類比/數位流量控制模式切換】

啟成流量計提供類比/數位流量控制模式切換，使用者可根據其需求切換流量計為類比電壓或數位指令模式來做流量控制(設定)。如同先前文章所述，如果選擇類比電壓訊號流量控制模式，必須外加0~5V的直流電源，作

為流量設定的控制訊號。此外使用者可透過讀取流量計特定指令來擷取該輸入電壓訊號，再根據其類比電壓/數位指令的線性對應關係(如表E-3)作輸入流量轉換。使用者在作流量控制模式切換前，必須下達流量計控制模式切換指令，以下2種指令即為流量計類比/數位流量控制模式切換。

『CD(改變成數位流量控制模式)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,CD 【CR】 【LF】

讀取: None

『CA(改變成類比流量控制模式)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,CA 【CR】 【LF】

讀取: None

【類比流量控制模式相關指令】

以下指令其功能為類比流量電壓控制訊號擷取，其中作為類比流量控制的直流電壓訊號(0~5VDC)則須由外接電源供給。

『SA(讀取外接電壓控制訊號)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,SA 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,± 【Analog Flow Setting】

注意: 流量計內部有擷取外接的0~5V類比電壓控制訊號電路，而流量計會將此控制電壓轉換為00000~05000的數位指令格式，將其讀取值再除以1000即為實際輸入電壓；使用者可讀取該訊號並轉換成電壓值和輸入電壓源比對。

【數位流量控制模式相關指令】

數位流量控制模式相關指令為在WK2008磊晶系統中，啟成流量計主要使用的控制指令集(數位指令控制)。指令主要分為流量設定、流量設定值讀取、輸出流量讀取等3項指令。個別指令如下所述：

『SW (設定數位流量設定值)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,SW 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Desired Flow】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Desired Flow】 【CR】 【LF】

注意: 數位流量設定範圍從00000到10000(由於傳輸字元格式為字串(string)，所以必須確實輸入00000)。此外SW指令間隔須大於50ms。使用者可根據其指令與流量計全流量(Full scale)的線性對應關係，設定指令格式與實際設定流量的轉換關係，此外使用者在菜單上僅需輸入所需的流量即可，程式即會自行轉換成符合流量計讀取之字元型式。

『SD/SR (讀取數位流量指令)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,SD 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , ± 【Digital Flow Setting】

注意: SD與SR指令同為讀取輸入設定流量(非實際流量)，使用者藉由"SW"指令所設定的流量值可藉由該指令讀取，作是否將設定值寫入流量計中的確認動作，其格式仍以5個連續字元呈現，其數值範圍為(00000~10000)。

【實際流量讀取指令】

『OR (讀取實際流量輸出)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,OR 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , ± 【Flow output】

注意: OR指令同為讀取流量計目前輸出流量，其格式仍為5個連

續字元呈現，其數值範圍為00000~10000；使用者亦可透過指令的線性關係，根據不同全流量規格之流量計，將讀取值轉換成實際流量。

【流量響應模式設定】

啟成流量計提供2種流量響應模式供使用者設定，該2種響應模式即為快速/慢速響應。其中在快速響應模式下，流量值可在1秒內到達與設定值的差值在1%F.S.範圍內，即 $|SP-PV| \leq 1\%F.S.$ 。SP：Set-point，PV：Process value。以下2種指令功能即為響應模式切換。

『CF (快速回應模式)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,CF 【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 流量快速響應模式為流量計預設值。

『CS (慢速回應模式)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,CS 【CR】 【LF】

讀取: None

【流量設定值低於2%F.S.時，平面閥對應狀態的設定指令】

啟成流量計可供設定的流量範圍為2~98%F.S.，當流量設定值低於2%F.S.時，平面閥動作有3種可設定模式，即為閥全關、閥固定在2%F.S.的預設開口度、閥受流量回朔訊號控制等3種。

『C3 (Flow \leq 2%F.S.，平面閥全關閉)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,C3 【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 該指令為當流量設定值 \leq 2%F.S.時，流量計強制平面閥關閉，閥動作此時不受流量回朔訊號控制，流量讀取值趨於

0%F.S.。

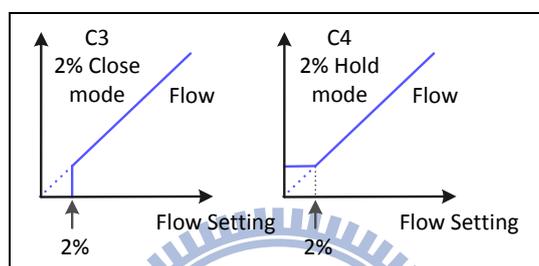
『C4 (Flow \leq 2%F.S.，平面閥固定在對應的預設開口度)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,C4 【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 該指令為當流量設定值 \leq 2%F.S.時，流量計將平面閥維持在流量2%F.S.所對應的開口度。閥動作此時不受流量回朔訊號控制，函數C3，C4由圖E-10所示。



圖E-10 2%F.S. 平面閥關閉、2%F.S. 平面閥停住的流量差異示意圖

『CN (取消C3 or C4函數，Normally controllable)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,CN 【CR】 【LF】

讀取: None

注意: CN指令為取消C3/C4函數，亦即平面閥狀態受流量回朔訊號控制，CN狀態為流量計預設模式。

【平面閥強制控制設定】

啟成流量計提供3種平面閥強制控制模式，包含強制閥全關、閥全開、閥暫停等3項；一般情況下不建議強制閥作全關閉動作。當使用者下達閥強制控制指令時，平面閥動作皆不受流量回朔訊號控制。以下即為這3種閥動作所對應的控制指令。

『VC (閥全關)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,VC 【CR】 【LF】

讀取: None

『VO (閥全開)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,VO【CR】 【LF】

讀取: None

『VH (閥維持在當時開口度)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,VH【CR】 【LF】

讀取: None

『VS (閥受控--Servo Controlled)』

輸入: 【Device No】 ,VS【CR】 【LF】

讀取: None

注意: VS為平面閥動作受流量回朔訊號所控制，此為流量計閥動作的預設狀態；VH，VO，VC為閥強制控制模式。

【讀取閥電壓值】

使用者可透過指令讀取目前加在控制平面閥動作之壓電控制材料上的直流電壓，閥電壓與輸出流量間並未存在線性關係，僅正相關。

『VR (讀取閥電壓)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,VR【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,±【Valve Vout】 【CR】 【LF】

注意: 閥電壓範圍讀取範圍從00000到05000，再將數位讀取值除以1000即為對應電壓值(0~5VDC)。

【讀取流量計狀態】

使用者可透過特殊指令來讀取流量計目前基本設定狀態，包含警告函數(Alarm A/B)為啟用或禁止狀態、流量計目前流量控制模式(類比/數位)、平面閥目前控制模式、目前流量響應模式(Fast/Slow)、流量低於2%F.S.時，

平面閥動作設定等資訊。

『ST (讀取流量計狀態)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,ST 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Mode Switch】 【CR】 【LF】

注意: 回覆值為6個連續字元表示，個別字元有其特定表達意義，表E-7為回應碼所代表的意義描述，例如字元1顯示Alarm A的設定為禁止或啟用狀態，字元2則顯示Alarm B的設定為禁止或啟用狀態，以此類推。一般流量計在正常設定下的狀態讀取值為(EDDSFN)，若讀值字元序列不為EDDSFN，需根據特定錯誤字元依照相對應的指令作校正動作。

Code Byte	1	2	3	4	5	6
Command	DA/EA	DB/EB	CD/CA	VC/O/H/S	CF/CS	C3/C4/CN
Description	D(disable) E(enable)	D(disable) E(enable)	D(digital) A(analog)	H(hold) S(servo)	F(fast) S(slow)	C(close) H(hold) N(normal)

表E-7 流量計"ST"指令回應對應表

【氣體質量轉換係數(C.F.)讀取】

『FR(讀取C.F.值)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,ST 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Mode Switch】 【CR】 【LF】

注意: C.F.值僅能做讀取動作，WK2008系統中啟成流量計除了NH₃相關流量計的C.F.值為0.77外，其餘皆為1.012。

E-3-3 【流量計零點設定】

啟成流量計提供流量零點校正(Zero calibration)功能，即使用者可任意定義特定流量為零點；若硬體發生流量偏差時可執行該零點校正功能(Zero

offset calibration)，在執行該功能前需確定管路中無氣體流動。此外流量零點校正除了下達零點設定指令外，使用者也可透過流量計硬體上"RESET"按鍵來達到(請參閱下文內容後再執行歸零操作)。

『ZS (流量零點設定)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,ZS 【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 在下達指令前必須確定管路中沒有氣體流動，這個指令也藉由短按流量計"RESET"按鍵(流量計歸零)來達到零點校正。

【流量計之"RESET"按鍵功能及操作說明】

流量計提供簡易的重置(RESET)功能，在流量計LED指示燈泡右方有一凹陷的孔洞，內部即為重置(RESET)功能鍵，提供流量歸零和清除內部參數等功能，若無特別需求，不可任意按下該重置按鍵。

按鍵功能說明如下：

- 短按RESET按鍵約1秒(LED燈號持續綠色交替閃爍)，即為將目前流量值更新為零點。注意：此時須確保管路內無氣體流動。
- 長按RESET按鍵約莫5~6秒後，直到LED燈熄滅約1秒後亮起，且持續綠色交替閃爍，此時流量計作內部硬體參數(FB Parameters)更新，使用者需再將該流量計的出廠FB參數值重新覆寫，請參閱E-5節內容，一般若無更新資料需求，不建議長按該重置鍵(RESET)。

註：執行流量計零點校正功能前，需確定管路中沒有氣體流動，一般作法為將配置於流量計前後端的氣動閥關閉，再執行零點校正。在WK2008系統氣體傳輸管路設計中，個別流量計前後端並無配置氣動閥，故做法有所調整，由於系統中流量計所連接的管路末端通往腔體，將氣動閥關閉即可達到阻止氣體流動，使用者可利用控制連結腔體進口端的氣動閥開關來完成啟成流量計歸零動作。

操作步驟說明如下 12 點：

1. 在系統閒置狀態下按下控制程式操作面板上的"System idle state" Pneumatic valves on Reactor inlet control button"按鍵，將按鍵切換成粉紅色的"保壓"狀態；使用者需再手動關閉 Run III 氣動閥，關閉方式為手動調整 Run III 電磁閥(EM44)為強制供氣模式，做法為將電磁閥上橙色手動撥把往下扳，如附錄 D 圖 D-8(b)所示。
2. 將 EP1V、EP2V、EP3V...EP8V 等 8 個連接至 Vent 端的常開型氣動閥關閉，作法為將表 E-8 所列的電磁閥上的橙色手動撥把往下扳，如圖 D-8(b)。

Source	氣動閥	電磁閥編號
TMAI	EP1V	EM27
TMGa	EP2V	EM29
Cp ₂ Mg	EP3V	EM31
TMIn	EP4V	EM33
TEGa	EP5V	EM35
Reserved	EP6V	EM37
SiH ₄	EP7V	EM39
Reserved	EP8V	EM41

表 E-8 Epifold Vent 端氣動閥與電磁閥編號對照表

3. 將氣體傳輸管路上位於 *Rotation* 流量計後端及 *Heating RF Purge metering* 流量計後端藍色的 HVR、HVP 手閥關閉。
4. 關閉氮氫氣供氣源端的 HVN2、HVN2 手閥。
5. 關閉 Vent 端的 HVV 手閥。
6. 靜候 1~2 分鐘，於程式前置面板上確定所有流量計皆出現流量異常警示的紅色燈號。
7. 此時管路內完全無氣體流動，於程式前置面板中流量計讀值欄判定讀值是否漂移(即是否大於 1%F.S.)；舉全流量 5000SCCM 流量計來說，若此時讀值大於 50SCCM，則為零點漂移，需執行零點校正；接下來則針對漂移之流量計個別執行校正。
8. 零點校正方法為**短按**流量計上方"Reset"按鍵約 1 秒，即完成歸零，可於程式介面觀測流量計讀值是否正常。
9. 按下控制程式操作面板上的"System idle" state Pneumatic valves on Reactor inlet control button"按鍵，將按鍵切換成綠色的"Purge"狀態。

10. 將 Run III 電磁閥(EM44)和表 E-8 所列的所有電磁閥手動調整為訊號控制模式，作法為將電磁閥上橘色手動撥把往上扳，如圖 D-8(a)示。
11. 開啟 HVR、HVP、HVN2、HVVH2、HVV 等 5 個手閥。
12. 靜候約 1 分鐘，在程式前置面板上確定所有流量計讀值正常(無紅色警示訊號)，即完成校正。

E-4 流量計內部警告函數(Alarm Function A/B)

SIC MC2100/2200 系列流量計內部提供 2 組警告函數(Alarm A/B)做為流量計錯誤狀態的初步參考資訊，其中警告函數 A(Alarm A)代表流量計發生流量偏差大於 1%F.S.、電壓供應不足、RS-232 通訊錯誤、EEPROM 存取錯誤等錯誤狀態；警告函數 B(Alarm B)代表流量計發生零點漂移、感測電橋電路訊號異常等錯誤狀態，一般來說當流量計警告函數 B 觸發時是較為嚴重的錯誤狀態，可能需要洽詢啟成內部工程師。使用者可透過流量計上方的 LED 閃爍燈號來初步判定何種警告函數被觸發，其中當 LED 持續顯示紅色燈號為警告函數 A 觸發；LED 持續顯示紅色燈號交替閃爍，代表警告函數 B 觸發，而當 LED 燈號發生異常，使用者可透過下文所述的警告函數相關指令來做錯誤狀態判定，以下為 Alarm A/Alarm B 函數功能細節說明。

E-4-1 【流量計警告函數 A(Alarm function A)】

正常工作的流量計，上方 LED 會持續閃爍黃色燈號，而當流量計 LED 持續亮紅燈時，代表 Alarm A 的狀態被觸發；一般可能發生的問題為流量偏差未能在正常工作範圍內 ($|PV-SP| \leq 1\%F.S.$)，或為電壓供應不足，使用者可藉由讀取 Alarm A 函數錯誤碼來確認可能發生的問題，詳細 Alarm A 函數錯誤代碼如表 E-9 所列。

Alarm A Function	
Alarm Code	Possible Error state description
P	Low voltage of power supply.
T	Error in RS-232 communication.
E	Error in EEPROM access.
C	Output flow cannot match the flow command.

2	Integral summation of output flow exceeds preset value.
---	---

表E-9 Alarm A回應碼對應之可能流量計錯誤訊息

E-4-2 【流量計警告函數B(Alarm function B)】

若LED燈號轉為紅燈，且持續快速閃爍，代表Alarm B狀態被觸發，可能發生的問題為零點漂移(Zero offset)；相同的，使用者亦可透過讀取Alarm B錯誤碼來確認，詳細Alarm B函數錯誤代碼如表E-10所列。

Alarm B Function	
Alarm Code	Possible Error state description
Z	Unsuitably zero set.
O	Changing of sensor voltage.
I	Changing of sensor current.
V	Changing of valve voltage.
1	Overflow of integral summation of output flow.
T	Changing of sensor bridge balance.

表E-10 Alarm B回應碼對應之可能流量計錯誤訊息

通常流量計出現持續閃爍的紅色燈號，代表Alarm B狀態觸發，處理方法如下2點：

1. 將Alarm B狀態禁能(Disable)，設定方法請參閱E-5-1 測試程式的基本流量計設定功能內容或參考E-4-3 Alarm A/Alarm B相關指令集內容，下達流量計『DB (停用Alarm B函數)』指令。
2. 如果Alarm B已處於禁能狀態，LED燈號仍顯示異常狀態，可能原因為零點準位漂移(仍需透過警告函數B的"RB"指令之回傳代碼判定)，需將流量計重新歸零，歸零方法請參考E-3-3小節中【流量計之"RESET"按鍵功能及操作說明】的註解內容依序執行步驟，再針對錯誤的流量計利用重置按鍵執行歸零動作。**需再次注意：歸零前必須確保管路內無氣體流動。**

E-4-3 【Alarm A/Alarm B相關指令集】

以下內容為流量計警告函數相關指令集介紹，其中包含警告函數錯誤碼讀取、警告函數參數設定、清除錯誤碼、設定警告函數觸發時脈(Clock)，及禁用(Disable)或啟用(Enable)相關的警告函數等功能。

『AW (寫入Alarm A的範圍)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,AW 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Alarm range】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Alarm range】 【CR】 【LF】

注意: 舉例來說，Alarm range=10，代表10%F.S.，可調整範圍為00~99，預設值為05。

『BW (寫入Alarm B的範圍)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,BW 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK 【CR】 【LF】 or

【Device No】 ,NK 【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Alarm range】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Alarm range】 【CR】 【LF】

注意: 舉例來說，Alarm range=10，代表10%F.S.，可調整範圍為00~99，預設值為20。

『AR (讀取Alarm A的範圍)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,AR 【CR】 【LF】

讀取：【Device No】,AK【CR】【LF】

『BR (讀取Alarm B的範圍)』

型式：

輸入：【Device No】,BR【CR】【LF】

讀取：【Device No】,AK【CR】【LF】

『RA (讀取Alarm A的Code)』

型式：

輸入：【Device No】,RA【CR】【LF】

讀取：【Device No】 ,【Alarm code】【CR】【LF】

注意：Alarm A函數錯誤碼意義請查閱表E-8 Alarm A回應碼對應之
可能流量計錯誤訊息。

『RB (讀取Alarm B的Code)』

型式：

輸入：【Device No】,RB【CR】【LF】

讀取：【Device No】 ,【Alarm code】【CR】【LF】

注意：Alarm B函數錯誤碼意義請查閱表E-9 Alarm B回應碼對應之
可能流量計錯誤訊息，若為電橋電路訊號異常，先關閉該
流量計電源約5分鐘再開啟；若仍為異常則可將流量計內部
FB參數做出廠值批次覆寫，詳細做法請參閱E-5-2小節。

『CL (清除Alarm Code)』

型式：

輸入：【Device No】,CL【CR】【LF】

讀取：None

『TW (寫入Alarm Timer值)』

型式：

輸入：【Device No】,TW【CR】【LF】

讀取: 【Device No】 ,AK【CR】 【LF】 or
【Device No】 ,NK【CR】 【LF】

寫入: 【Device No】 , 【Alarm timer】 【CR】 【LF】

讀取: 【Device No】 , 【Alarm timer】 【CR】 【LF】

注意: 舉例來說, Alarm timer=05, 代表5秒, 可調整範圍為00~99秒, 此為設定Alarm 函數偵測的時脈(Clock), 一般使用不對此timer作設定, 原廠預設值為5秒。

『DA (停用Alarm A函數)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,DA【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 流量計Alarm A警告函數預設狀態為啟用。

『DB (停用Alarm B函數)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,DB【CR】 【LF】

讀取: None

注意: 流量計Alarm B警告函數預設狀態為停用。

『EA (啟用Alarm A函數)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,EA【CR】 【LF】

讀取: None

『EB (啟用Alarm B函數)』

型式:

輸入: 【Device No】 ,EB【CR】 【LF】

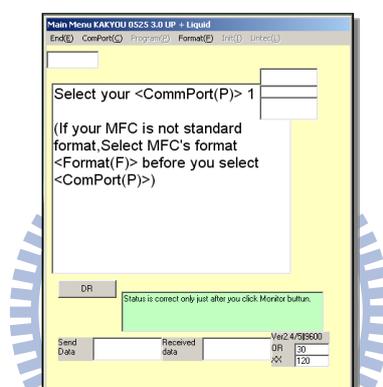
讀取: None

註: 流量計警告函數預設為EA(Enable A), DB(Disable B)。

E-5 啟成流量計之測試程式相關功能及操作

E-5-1 【測試程式的基本流量計設定功能】

WK2008 磊晶系統中，啟成科技提供流量計的測試程式，其檔名為 re_v5.exe 執行檔，在系統工業電腦中的存放路徑為 D 槽 (Epitaxy Documents) : \磊晶系統資料\MFC\MFC TEST PROGRAM 資料夾，打開該資料夾選取 rs_v5.exe 執行檔，開啟後如圖 E-11 所示，在開啟前須確認 LaBVIEW 平台關閉，通訊埠未被其他程式所佔用。

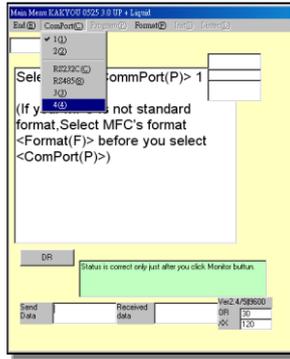


圖E-11 MFC TEST PROGRAM 初始畫面

流量計測試程式操作如下5項步驟所列：

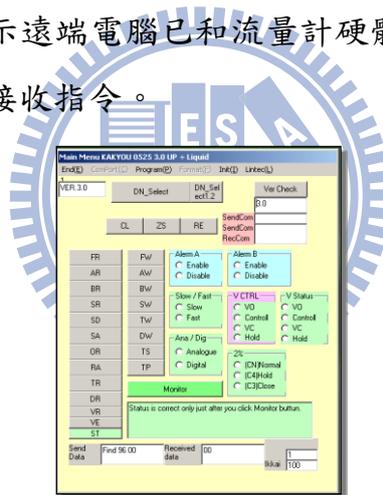
1. 先選取連結流量計的通訊埠位址 (Com. Port)，如圖 E-12 所示。需注意該測試程式只提供 Com 1~4 共 4 組連結通訊埠，由於個別流量計在系統中有其獨立的連結通訊埠，若需測試特定流量計則需自行手動更動 RS-232 通訊接線^註，將需要更動資料的流量計連結至 Com 1~4 其中任 1 個通訊埠上，系統中流量計通訊埠配置請參閱 表 A-9 WK2008 控制系統各式硬體與系統連結通訊埠對應表。

註：在更換流量計 RS-232 訊號傳輸線之前，須先將流量計電源關閉再行更換接線，避免熱插拔 (Hot plugging) 動作，否則可能造成流量計內部晶片訊號異常導致無法通訊；相同地，待接線更換完成後再開啟電源。



圖E-12 MFC測試程式選取通訊埠編號

2. 在測試程式上方控制列選取(Format)，先初步設定通訊協定格式(Protocol Format)，流量計預設格式為(7, 2, N)，在測試程式裡頭為選單裡第1個(7, 2, N(1))。
3. 決定好通訊埠位址及通訊格式協定後，程式上方會出現灰色"DN_Select"方框，點選該方框，程式會出現如圖E-13所示的流量計相關指令集，表示遠端電腦已和流量計硬體完成RS-232通訊連結，且流量計已準備接收指令。



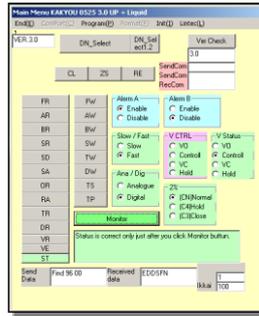
圖E-13 點選DN_Select按鍵後，程式出現之畫面

4. 按下程式下方的綠色"Monitor"按鍵，此按鍵功能為讀取流量計之基本參數，包含：
 - Alarm A→Enable or Disable
 - Alarm B→Enable or Disable
 - Valve Control Mode→Open/Controllable/Close/Hold
 - Valve Response→Slow/Fast
 - MFC Control Mode→Analogue/Digital
 - Flow<2%F.S. Valve action→Normal(CN)/Hold(C4)/Close(C3)

註：在圖E-13下方Send Data方框中9600代表目前通訊傳輸的波特率為9600bps，

Received data方框中00代表程式讀取的流量計編號為00。

5. 按下"Monitor"按鍵後可以讀取目前該流量計的設定，如圖E-14所示，下方Received Data顯示EDDSFN，字元代表意義與指令"ST"(讀取流量計狀態)的讀值相同，需注意EDDSFN代表流量計目前設定正常，若非此讀值須根據錯誤字元作個別校正。校正方法請參閱下文註2。



圖E-14 點選Monitor後，程式出現之畫面

註1：圖 E-14 左邊為流量計的各項指令，包含唯讀(左方 FR~ST 指令)及寫入(右方 FW~TP 指令)指令，按下按鍵後即可對流量計作讀/寫動作。圖 E-14 右邊方框中黑點顯示為目前流量計設定值，表 E-11 列出 6 項基本預設值；詳細個別指令涵義請參閱 [E-2 流量計基本硬體參數設定](#)。

流量計基本預設值	
Function	Status
Alarm A	Enable
Alarm B	Disable
Valve Response	Fast
Interface	Digital
Valve Control	Control
Flow <2%F.S. , Valve Response	(CN)Normal

表E-11 流量計基本預設值

註2：若流量計讀值字元不為EDDSFN，需針對錯誤字元作校正。舉例來說，若讀值為EDASFN，代表第3個字元錯誤，即目前流量計為類比控制(A)，使用者可以看到"Monitor"鍵上方的Ana/Dig方框內黑點位於Analogue上；此時作法為點選Digital後再按下"Monitor"鍵即可更正，使用者可在確認黑點是否已在Digital選項上。

E-5-2 【測試程式之流量計進階設定功能】

流量計進階設定提供讀取及寫入流量計內部控制參數資料、流量零點校正、平面閥反應校正。基本上使用者只需用到更動流量計內部控制參數資料及零點校正功能，其餘功能並不使用，且一般情形下不建議使用者擅自更動內部FB控制參數。

流量計進階設定如下所述。按下測試程式上方控制列的Program(P)選項，選單中出現FB_Treatment(F)/Zero_Span(Z)/Linia(L)/Response(R)等4個選項，其中各項功能解釋如下：

需注意：執行完流量計進階設定後，流量計會回復至類比控制，此時需回至程式初始畫面(圖E-14)按下"Monitor"按鍵，再將流量計控制模式更正為數位"Digital"控制即可。

- FB_Treatment→流量計內部控制參數相關設定
- Zreo_Span→流量計零點/全流量點微調校正
- Linia→未知功能
- Response→平面閥反應校正

由於上方所列的4項進階設定功能牽涉到原廠校正技術，需配合特殊校正儀器方能完整執行，使用者無法完全使用上述功能，故下文將僅就『流量計內部控制參數設定(FB_Treatment)』內部資料相關設定做介紹，其餘功能皆不建議使用。使用者可透過『流量計內部控制參數設定(FB_Treatment)』功能讀取流量計內部諸多函數參數或作其相關參數校正，使用者可根據其需求選擇查閱之。

『流量計內部控制參數設定(FB_Treatment)』

點選上方控制列中"FB_Treatment"選單，進入該選單後，程式初始畫面如圖E-15所示。FB_Treatment提供流量計內部FB參數^{註1}的讀取/寫入功能，FC參數^{註2}讀取功能，File(檔名xxxx.fb，xxxx.fc)的讀取/批次寫入功能，其中File即為廠商所附的流量計硬體內部控制參數批次檔，該檔案內有完整的特定流量計原始出廠校正資料，包含PID控制參數、溫度補

償參數、零點校正值、警告函數參數、預設數位流量值設定、氣體轉換係數(C.F.)、平面閥動作參數等，使用者可透過該測試軟體將出廠預設參數整檔批次寫入流量計中；詳細控制列功能及操作如下文介紹。



圖E-15 進入FB_Treatment選單，程式之初始畫面

註1：FB為流量計內部硬體設定參數，包含有該流量計中平面閥預設形態(N.O/N.C)、流量計編號、警告函數設定、溫度補償參數設定、氣體質量轉換係數、數位流量設定、電源供應參數、流量預設零點值等，相關硬體參數對應之預設值、可調變範圍、個別意涵，整理如表E-12(a)~(b)所列。表E-12(a)~(b)左方所列的FBxy，即為對應的FB參數編號，x代表圖E-15中的縱列編號，y則代表橫列編號；例如FB2A，代表編號第2縱列，編號第A橫列的FB參數值。

註2：FC值為該流量計之基本規格，例如該流量計序號(S.N.)、全流量值、氣體C.F.值等資訊，如圖E-15中右方縱列資訊所示。

Ver. 1.5	初始值	有效範圍	意義	對應
FB00	01	00,01	NO:00 NC:01	Valve Default type
FB01	00	-	INPUT OFFSET	
FB02	80	7F,80,81	OUT	
FB03	00	-	INPUT OFFSET	
FB04	80	7F,80,81	SET	
FB05	00	-	OUTPUT OFFSET	
FB06	80	7F,80,81	OUT	
FB07	FF	FF	OUTPUT OFFSET	
FB08	7F	7F	CONTROL	
FB09	00	00		
FB0A	00	00		
FB0B	00	00		
FB0C	00	00		
FB0D	00	00		
FB0E	00	00		
FB0F	07	07		
FB10	01	01		
FB11	00	00		
FB12	00	00		
FB13	00	00		
FB14	00	00		
FB15	00	00		
FB16	00	00		
FB17	86	86		
FB18	00	00		
FB19	00	00		
FB1A	7A	7A		
FB1B	00	00	Alarm B 有效	
FB1C	01	01	Alarm A 有效	
FB1D	0C	0C	Alarm B 範圍	
FB1E	33	33		
FB1F	47	47	Alarm A 範圍	
FB20	00	00		
FB21	00	FB24.23>FB22.21		
FB22	15			
FB23	00	FB26.25>FB24.23		
FB24	16			
FB25	00			
FB26	17			
FB27	00	00-50	ZERO TEMP 0	溫度補償參數
FB28	80	00,80		
FB29	00	00-50	ZREO TEMP 15	
FB2A	80	00,80		
FB2B	00	00-50	ZERO TEMP 35	
FB2C	80	00,80		
FB2D	00	00-50	ZERO TEMP 50	
FB2E	80	00,80		
FB2F	00	00-50	SAPN TEMP 0	
FB30	80	00,80		
FB31	00	00-50	SPAN TEMP 15	
FB32	80	00,80		
FB33	00	00-50	SPAN TEMP 35	
FB34	80	00,80		
FB35	00	00-50	SPAN TEMP 50	
FB36	80	00,80		
FB37	00			
FB38	10	0F,10	LINIA	
FB39	00			
FB3A	10	0F,10		
FB3B	00			
FB3C	10	0F,10		
FB3D	00			
FB3E	10	0F,10		
FB3F	00			
FB40	10	0F,10		
FB41	00	-	SPAN	
FB42	20	1A,25		BYPASS CHANGE
FB43	00	00	CONVERSION	新品固定值
FB44	10	10	FACTOR	
FB45	30	30	Device No.	
FB46	30	30		
FB47	00	-	Calibration	
FB48	20	1F-21		

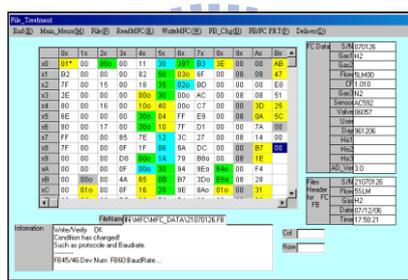
表E-12(a) 流量計個別FB參數意涵，初始值對照表

Ver. 1.5	初始值	範圍	意義	對應
FB49	00	00	1=DIGITAL,0=ANALOG	
FB4A	00	00	0=FAST,1=SLOW	
FB4B	0A		P	2~33%F.S. 該值為內部出廠較正值，請勿隨意更動。
FB4C	07		I	
FB4D	0A		D	33~66%F.S. 該值為內部出廠較正值，請勿隨意更動。
FB4E	20		P	
FB4F	10		I	66~98%F.S. 該值為內部出廠較正值，請勿隨意更動。
FB50	20		D	
FB51	50		P	OUTPUT COEFFICIENT
FB52	25		I	
FB53	50		D	
FB54	00			
FB55	03			
FB56	10		FLAG	
FB57	00		BPS	
FB58	05		MFC TAPE	
FB59	1A		OPTION	
FB5A	00		LAMP TIMER	
FB5B	0A			
FB5C	20			
FB5D	AA			
FB5E	10	10,11		
FB5F	00	00,85		
FB60	00	E9,6A		
FB61	03	03		
FB62	02	02		
FB63	00	00		
FB64	00	00		
FB65	FF			
FB66	7F			
FB67	3C			
FB68	8A			
FB69	79			
FB6A	94			
FB6B	B7			
FB6C	9E			
FB6D	F4			
FB6E	A8			
FB6F	31			
FB70	B3			
FB71	6F			
FB72	BD			
FB73	AC			
FB74	C7			
FB75	E9			
FB76	D1			
FB77	27			
FB78	DC			
FB79	B8		PID LEVEL UP	30%F.S.
FB7A	9E			
FB7B	3D		PID LEVEL DOWN	10%F.S.
FB7C	8A			
FB7D				
FB7E			VALVE INITIAL	
FB7F	00			
FB80	FF	00以外		
FB81	00			
FB82	00			
FB83	00			
FB84	00			
FB85	00			
FB86	00			
FB87	00			
FB88	00			
FB89	00			
FB8A	64		DIGITAL SET	
FB8B	E6			
FB8C	01		POWER ON	

表E-12(b) 流量計個別FB參數意涵，初始值對照表(續)

【讀取流量計FB參數值】

在"File_Treatment"上方控制列點選ReadMFC(R)/Read-FB選單，即可讀取該流量計的FB硬體參數，圖E-16顯示該流量計各別位址列的FB參數值，其中FB8A、FB8B即為目前數位流量設定值，FB4B~FB4F、FB50~FB53為不同流量設定區間的PID值。FB02、FB04、FB06預設範圍為7F/80/81，若這3個FB參數不為這3項數值，需針對錯誤數值執行個別FB值更正(FB_Chg)，如下文所述。詳細流量計內部FB參數預設值及正常範圍如表E-12(a)~(b)所列。此外位址欄中如有顯示???表示該參數值不在正常範圍內，亦需要利用FB值更正功能校正之。但如果發生幾乎所有FB數值皆呈現???,即代表與流量計通訊協定設定錯誤或連結中斷。



圖E-16 讀取流量計所有FB參數，程式顯示之畫面

【讀取流量計FC參數】

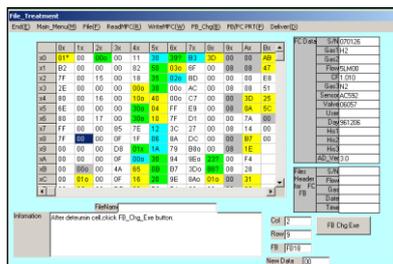
在File_Treatment上方控制列點選ReadMFC(R)/Read-FC選單，即可讀取該流量計的FC硬體參數，圖E-16中右方縱列顯示該流量計FC參數值，FC參數主要呈現該流量計的硬體出廠參數，包含產品序號(S/N值)、該流量計校正氣體(N₂)、該流量計滿刻度流量值(Full scale)、氣體轉換參數(C.F.)、校正(出廠)日期等資料。

【更動個別FB參數】

使用者如需要更動單一FB參數，請依照下列步驟執行。

1. 先按下需校正的參數(該參數位址底色變為藍底)，再按下上方控制列中的"FB_Chg(B)"按鍵後出現彈跳視窗，輸入正常範圍之16進位參數。
2. 再次點選該參數位址，再點選下方"FB Chg Exe"方框(該方框左方

顯示新輸入之FB參數值(New Data: 00)及FB編號(FB18)，Col: 2，Row: 9等資訊)，如圖E-17所示。



圖E-17 更改流量計單一FB參數，程式顯示之畫面

- 按下下方"FB Chg Exe"鍵即完成FB參數變更及寫入動作，需注意單次只能變更1組FB值，若需再次更新他組FB值，則重複執行上述動作即可。一般來說，流量計內部FB參數不可任意更動，除非發生硬體異常，如Alarm function A/B觸發。

【更新流量計FB參數】

如要回復流量計的整體FB參數為出廠值，請依下列步驟執行。

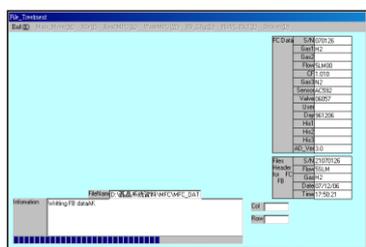
- 點選上方控制列中的File(F)/ReadFC，即出現彈跳視窗，選取該流量計對應之File name(位於D槽/MFC/MFC_DATA)，表E-13為系統中流量計對應的FB檔名(File name)^{註1}。

啟成流量計對應之FB參數批次檔檔名	
MFC	File name
Run V	21070126.FB
Run III	21010027.FB
Sub III	21070035.FB
NH3(H)	21070025.FB
NH3(L)	21070029.FB
TMGa(H)	21070119.FB
TMGa(Push)	21070032.FB
TMIn	21070080.FB
Vent	21070036.FB
Liner Purge	21070072.FB
Disk Rotation	21070031.FB

表E-13 WK2008系統中啟成流量計編號及其FB檔名對照表

- 此時FB位址視窗內參數即會更新成File中的參數，按下上方控制

欄中的功能鍵WriteMFC(W)/Write-FC，將目前位址列的所有參數值寫入流量計EEPROM中，寫入過程如圖E-18所示。寫完FB值後程式會再將FB值讀取1遍並顯示在FB位址中，如此程序耗時約1分鐘^{註2}。



圖E-18 流量計執行FB參數寫入程序的程式畫面

3. 當整體參數變更完後，在上方控制列按下"Main_Menu"，回到測試程式主畫面，按下"DN_Select"，此時流量計內部應會更動成 Analogue 介面，波特率為1200bps；使用者需將控制模式更正為 Digital，並利用主畫面左方"TS"按鍵，將波特率更新為9600bps，再按下"Monitor"鍵確認流量計狀態顯示字元是否為"EDDSFN"。此時流量計燈號應會顯示交替閃爍之綠燈，如為持續紅色燈號，可能原因應為輸出流量無法符合輸入之流量指令(Alarm A狀態觸發)。
4. 按下End，離開流量計測試程式設定，將通訊埠釋出。

註1：MFC_DATA資料夾內提供系統所有啟成流量計出廠FB資料。

註2：流量計內部初始設定為Analogue介面，設定為100%F.S.流量。

E-6 啟成(SIC)數位式氣體流量計硬體資料附件

【PCTFE(Polychlorotrifluoroethylene)：聚三氟乙烯】

聚三氟乙烯(PCTFE)具有優異的剛性，高耐壓應力，較低的受熱形變量，極低之氣體滲透率，不吸收水氣，耐低溫，耐低溫氣流等特性，是低溫高壓狀況下理想之密封材料。

PCTFE	
相關物理係數(單位)	指標值
密度(g/cm ³)	2.10~2.18
拉伸強度(MPa)	35
斷裂伸長率(%)	20
使用溫度範圍(°C)	-200~150
介電強度(KV/mm)	15

表 E-14 PCTFE，聚三氟乙烯物理係數

【啟成流量計細部規格】

註：%F.S.代表 Full scale 的百分比。

ITEM	Unit/Specification	MC-2100NO(NC)	MC-2200NO(NC)
		Range (Full scale)	1,5,10,20,50,100,200,500
	SLM	1,2,3,5	10,20
Minimum controllable flow rate	(%F.S.)	2	2
Response time	(second, range from 2-98%F.S.)	±1	±1
Accuracy	(%F.S.)	±1	±2
Linearity	(%F.S.)	0.5	1
Repeatability	(%F.S.)	0.2	0.2
Required differential pressure	kg/cm ² ; kPa ; psi	0.5~3.0; 49~294; 7.1~42.7	1.0~3.0 ; 98~294 14.2~42.7
Operation temperature	°C	0-50 (Typical 25~30°C)	
Temperature coefficient	(%F.S./ °C)	0.02	
Leakage rate (外部洩漏率)	atm · cc/sec	<1×10 ⁻¹¹	
	Pa · m ³ /sec	<1×10 ⁻¹⁰	
Fittings	Standard	1/4" VCR	1/4" VCR
Digital communication	Digital serial	9 Pin RS-232	

	interface	
--	-----------	--

表 E-15 數位式流量計規格表

【氣體質量轉換表】

表 E-16 列出 107 項各式氣體在 20°C、1atm 條件下，相對於 N₂ 的氣體質量轉換表(Mass conversion factor, C.F.)，N₂ : C.F.=1.0。

* cp - cal (T,p) = cp (T + 50°C, p)

Nr.	Name	Symbol	Symbol Density ρ_n [g/l] 0°C, 1 atm.	Heat capacity* cp-cal [cal/g.K] 20°C, 1 atm.	Conversion factor 20°C, 1 atm.
1	Acetylene (Ethyne)	C ₂ H ₂	1.172	0.438	0.61
2	Air	Air	1.293	0.241	1.00
3	Allene (Propadiene)	C ₃ H ₄	1.832	0.392	0.43
4	Ammonia	NH ₃	0.7693	0.524	0.77
5	Argon	Ar	1.784	0.125	1.40
6	Arsine	AsH ₃	3.524	0.133	0.66
7	Boron trichloride	BCl ₃	5.227	0.136	0.44
8	Boron trifluoride	BF ₃	3.044	0.188	0.54
9	Bromine pentafluoride	BrF ₅	7.803	0.156	0.26
10	Butadiene (1,3-)	C ₄ H ₆	2.504	0.405	0.31
11	Butane	C ₄ H ₁₀	2.705	0.457	0.25
12	Butene (1-)	C ₄ H ₈	2.581	0.415	0.29
13	Butene (2-) (Cis)	C ₄ H ₈	2.503	0.387	0.32
14	Butene (2-) (Trans)	C ₄ H ₈	2.503	0.421	0.30
15	Carbonylfluoride	COF ₂	2.983	0.194	0.54
16	Carbonylsulfide	COS	2.724	0.175	0.65
17	Carbon dioxide	CO ₂	1.977	0.213	0.74
18	Carbon disulfide	CS ₂	3.397	0.152	0.60
19	Carbon monoxide	CO	1.25	0.249	1.00
20	Chlorine	Cl ₂	3.218	0.118	0.82
21	Chlorine trifluoride	ClF ₃	4.125	0.188	0.40
22	Cyanogen	C ₂ N ₂	2.376	0.275	0.48
23	Cyanogen chloride	ClCN	2.743	0.185	0.61
24	Cyclopropane	C ₃ H ₆	1.919	0.374	0.43
25	Deuterium	D ₂	0.1798	1.73	1.00
26	Diborane	B ₂ H ₆	1.248	0.577	0.43
27	Dibromo difluoromethane	Br ₂ CF ₂	9.361	0.17	0.20

28	Dichlorosilane	SiH ₂ Cl ₂	4.506	0.17	0.41
29	Dimethylamine	C ₂ H ₆ NH	2.011	0.417	0.37
30	Dimethylpropane (2,2-)	C ₅ H ₁₂	3.219	0.462	0.21
31	Dimethylether	C ₂ H ₆ O	2.105	0.378	0.39
32	Disilane	Si ₂ H ₆	2.857	0.352	0.31
33	Ethane	C ₂ H ₆	1.355	0.468	0.49
34	Ethylene (Ethene)	C ₂ H ₄	1.261	0.414	0.60
35	Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	1.965	0.303	0.52
36	Ethylacetylene (1-Butyne)	C ₄ H ₆	2.413	0.401	0.32
37	Ethylchloride	C ₂ H ₅ Cl	2.878	0.263	0.41
38	Fluorine	F ₂	1.696	0.201	0.91
39	Freon-11	CCl ₃ F	6.129	0.145	0.35
40	Freon-113	C ₂ Cl ₃ F ₃	8.36	0.174	0.21
41	Freon-1132A	C ₂ H ₂ F ₂	2.889	0.244	0.44
42	Freon-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	7.626	0.177	0.23
43	Freon-115	C ₂ ClF ₅	7.092	0.182	0.24
44	Freon-116	C ₂ F ₆	6.251	0.2	0.25
45	Freon-12	CCl ₂ F ₂	5.547	0.153	0.37
46	Freon-13	CClF ₃	4.72	0.165	0.40
47	Freon-13B1	CBrF ₃	6.768	0.12	0.38
48	Freon-14	CF ₄	3.946	0.18	0.44
49	Freon-21	CHCl ₂ F	4.592	0.154	0.44
50	Freon-22	CHClF ₂	3.936	0.168	0.47
51	Freon-23	CHF ₃	3.156	0.191	0.52
52	Freon-C318	C ₄ F ₈	9.372	0.222	0.15
53	Germane	GeH ₄	3.45	0.16	0.56
54	Helium	He	0.1785	1.24	1.41
55	Helium (3-)	3He	0.1346	1.606	1.44
56	Hydrogen	H ₂	0.08991	3.44	1.01
57	Hydrogen bromide	HBr	3.646	0.0869	0.98
58	Hydrogen chloride	HCl	1.639	0.192	0.99
59	Hydrogen cyanide	HCN	1.206	0.345	0.75
60	Hydrogen fluoride	HF	0.8926	0.362	0.96
61	Hydrogen iodide	HI	5.799	0.0553	0.97
62	Hydrogen selenide	H ₂ Se	3.663	0.109	0.78
63	Hydrogen sulfide	H ₂ S	1.536	0.246	0.82
64	Isobutane	C ₄ H ₁₀	2.693	0.457	0.25
65	Isobutylene (Isobutene)	C ₄ H ₈	2.60	0.429	0.28

66	Krypton	Kr	3.749	0.058	1.43
67	Methane	CH ₄	0.7175	0.568	0.76
68	Methylacetylene	C ₃ H ₄	1.83	0.399	0.43
69	Methylbromide	CH ₃ Br	4.35	0.118	0.61
70	Methylchloride	CH ₃ Cl	2.3	0.212	0.64
71	Methylfluoride	CH ₃ F	1.534	0.29	0.70
72	Methylmercaptan	CH ₃ SH	2.146	0.272	0.53
73	Molybdenum hexafluoride	MoF ₆	9.366	0.156	0.21
74	Mono-ethylamine	C ₂ H ₅ NH ₂	2.011	0.436	0.36
75	Monomethylamine	CH ₃ NH ₂	1.419	0.424	0.52
76	Neon	Ne	0.9002	0.246	1.41
77	Nitric oxide	NO	1.34	0.239	0.97
78	Nitrogen	N ₂	1.250	0.249	1.00
79	Nitrogen dioxide	NO ₂	2.053	0.204	0.74
80	Nitrogen trifluoride	NF ₃	3.182	0.194	0.50
81	Nitrosyl chloride	NOCl	2.984	0.17	0.61
82	Nitrous oxide	N ₂ O	1.978	0.221	0.71
83	Oxygen	O ₂	1.429	0.222	0.98
84	Oxygen difluoride	OF ₂	2.417	0.201	0.64
85	Ozone	O ₃	2.154	0.207	0.70
86	Pentane	C ₅ H ₁₂	3.219	0.455	0.21
87	Perchlorylfluoride	ClO ₃ F	4.653	0.165	0.41
88	Perfluoropropane	C ₃ F ₈	8.662	0.22	0.16
89	Performa- ethylene	C ₂ F ₄	4.523	0.206	0.33
90	Phosgene	COCl ₂	4.413	0.149	0.47
91	Phosphine	PH ₃	1.53	0.277	0.73
92	Phosphorous pentafluoride	PF ₅	5.694	0.183	0.30
93	Propane	C ₃ H ₈	2.012	0.456	0.34
94	Propylene (Propene)	C ₃ H ₆	1.915	0.408	0.40
95	Silane	SiH ₄	1.443	0.349	0.62
96	Silicon tetrafluoride	SiF ₄	4.683	0.18	0.37
97	Sulfurylfluoride	SO ₂ F ₂	4.631	0.175	0.38
98	Sulfur dioxide	SO ₂	2.922	0.157	0.68
99	Sulfur hexafluoride	SF ₆	6.626	0.175	0.27
100	Sulfur tetrafluoride	SF ₄	4.821	0.192	0.34
101	Trichlorosilane	SiHCl ₃	6.044	0.157	0.33
102	Trimethylamine	C ₃ H ₉ N	2.637	0.424	0.28
103	Tungsten hexafluoride	WF ₆	13.29	0.092	0.25

104	Vinylbromide	C ₂ H ₃ Br	4.772	0.141	0.46
105	Vinylchloride	C ₂ H ₃ Cl	2.865	0.229	0.47
106	Vinylfluoride	C ₂ H ₃ F	2.08	0.305	0.49
107	Xenon	Xe	5.899	0.0382	1.38

表 E-16 20°C, 1 atm 狀態下，各式氣體相對於 N₂ 的質量轉換表

【流量計常見問題】

下列7點為在流量計控制中所遇到的一些問題與觀念澄清整理，使用者可選擇查閱之。

1. MC-2100NC 的數位流量計會設定流量值為 0scm 嗎(亦即數位指令為 00000)?還是直接下達平面閥關閉指令(VC)，另外流量設定為零和閥關閉有什麼差別?

ANS：流量計不能當作閥件來做開關使用，如此開關動作易造成平面閥損壞，且平面閥作為開關會有內漏問題，一般正常作法是流量計前後各放置 1 個氣動閥，使用時將氣動閥打開，管件測漏時則將氣動閥關閉；如此設計亦方便流量計測漏。流量計一般設定範圍為 2~98%F.S.，如設定成 0scm，流量計會出現控制不正常的現象(Alarm A 觸發)。一般作法為直接下達 VC 指令，或者將控制該管路中的氣動閥關閉即可。此外由於會有內漏問題，即使下達 VC 指令，仍就不比關閉氣動閥來的完全，但還是不建議關閉平面閥。

2. MC-2100NC 的數位指令和實際流量間的轉換是否為線性關係？也就是說 00000 對應 0scm，10000 對應全流量，05000 對應 50%的全流量，02500 對應 25%的全流量。

ANS：流量轉換為線性關係，請參閱表E-4 流量值與數位指令格式、類比(輸入)控制電壓對照表。

3. 流量零點值設定基準為何?

ANS：零點校正是在管路中有通氣體下(壓力約為3bar)，將管路中氣動閥關閉，亦即管路中無氣體流動，在該條件下校正之零點值為基準，校正方法請參閱E-3-3小節中的註解內容。

4. 在流量計的準確度(Accuracy)來說，如果準確度<±1%F.S.，全流量

20sccm 之 MFC，它的有效位數為 0.1sccm。該流量計可下達的指令範圍為(最小可控制流量為：2 % F.S.，即 0.4 sccm，最大可控制流量為：98 % F.S.，即 19.6 sccm)，亦即該流量計可控制流量範圍為 0.4sccm~19.6sccm，且最小單位為 0.1sccm，讀取之流量值也精準至小數點下 1 位。

5. 當流量計讀取的數值顯示(00,-00036)，在數位讀值前端出現負號代表什麼意思？可以忽略此負號嗎？

ANS：負號無特別意涵可忽略，讀值只取"，"後端的 5 個連續字元。

6. 流量計一般設定為 Alarm A→Enable，Alarm B→Disable，如發現流量計 LED 出現持續閃爍的紅色燈號，該狀況一般應為 Alarm B Enable，需將 Alarm B 設定為 Disable 才會回復正常，設定方法請參閱 E-4-2 流量計警告函數 B(Alarm function B)內容。流量計的警訊碼(Alarm Code)和狀態對應關係，請參閱表 E-9 及表 E-10。

7. 洩漏率指的是什麼洩漏程度？

ANS：啟成廠商所附的洩漏率(Leakage rate)是指外部洩漏率，亦即流量計封合處的洩漏程度，而非內部洩漏率(內部封合處洩漏，Internal seal leakage)，氦氣(Helium)洩漏率典型數值約為： $< 1 \times 10^{-11} \text{ atm} \cdot \text{cc} / \text{sec}$ 。

【協助廠商資料】

1. 鼎嚮科技 范盛堯 0917195709 e-mail：jun_fan@arenatech.com.tw
2. 啟成流量計部門目前已轉移至日商日測(NISSOKU) 邱昆德 0931192012 e-mail：kevin_chiu@nissoku.com.tw
3. 晶元光電 謝騰輝 e-mail：turnhuei@epistar.com.tw

附錄 F *Bronkhorst* 數位式氣體壓力控制器暨流量控制器

Bronkhorst—Downstream Pressure Controller

MODEL : P-702CM-6K0A-AA

Bronkhorst—Mass Flow Controller

MODEL : F-200CV-002-AAD-88V

本章節為針對 WK2008 磊晶系統中 *Bronkhorst* 系列硬體(EL-Press/EL Flow)作相關介紹,在系統中目前利用 *Bronkhorst* 系列硬體的有機金屬分子源(MO Source)管路末端氣體壓力控制器及 TMGa(L)氣體流量計;本章節即為 *Bronkhorst* 硬體規格說明及其 RS-232 序列通訊指令使用寫法介紹,由於氣體壓力控制器與流量計通訊指令寫法皆相同僅硬體設計差異,故在章節排序上將先針對氣體壓力控制器作硬體規格和 RS-232 通訊指令、測試程式用法介紹,再來則是氣體流量計亦分別作硬體規格、RS-232 通訊指令簡易介紹。

在氣體壓力控制器硬體規格說明部分,本章將描述氣體壓力控制器在 MOCVD 系統中的運用,以及如何與上游流量計配合計算出實際氣相有機金屬莫耳流率等,接下來則是針對壓力控制器硬體設計、壓力感測元件基本原理等作簡易介紹,最後則是 *Bronkhorst* 壓力控制器之硬體規格、I/O 端子接線定義說明;而 RS-232 通訊指令說明部分,由於 *Bronkhorst* 指令較其他硬體指令比較起來較為複雜許多,本章將大篇幅介紹其通訊指令。*Bronkhorst* 通訊指令為 16 進位 ASCII Code 編碼格式,且個別指令中包含特殊演算字元,文章內容將漸進地針對指令格式定義、特殊參數字元定義、字元演算方法、指令屬性字元代碼、相關硬體回傳指令之狀態判定等做詳細敘述;在指令介紹部分的最後內容則附上寫入/讀取指令範例提供使用者下達指令參考。在說明完基本 RS-232 通訊指令寫法後,文章將延續介紹 *Bronkhorst* 廠商所附測試程式(*Bronkhorst FlowDDE Test Program*)的相關功能和操作方法,該測試程式提供了諸多硬體進階設定,包含閥開關控制、類比/數位通訊方式切換、PID 值讀寫、壓力(流量)數值設定/讀取等功能,使用者可利用該測試程式寫入或讀取該硬體的諸多設定參數,也可直接利

用 *Bronkhorst FlowView* 程式直接對硬體做壓力(流量)即時控制、讀取等。

Bronkhorst 氣體流量控制器硬體說明部分，由於設計概念與啟成數位式氣體流量計相似，故文章將僅介紹簡易硬體規格及 I/O 端子接線定義等。而 RS-232 通訊指令說明部分，由於 *Bronkhorst* 系列硬體指令格式通用，故所有流量計指令與壓力控制器相同，文章將不再贅述。氣體流量計內容部分文章亦介紹 *Bronkhorst* 廠商所附的測試程式操作方法，相同地與氣體壓力控制器介紹內容大同小異。

F-1 *Bronkhorst* 數位式氣體壓力控制器簡介

在說明 *Bronkhorst* 數位式氣體壓力控制器相關軟硬體細節之前，本章節開始將先由氣體壓力控制器在 MOCVD 系統上運用提起，包含設置壓力控制器目的，和壓力控制器在計算有機金屬分子氣相莫耳流率時，所扮演的參數設定意義等，再來則針對壓力控制器硬體設計理念、壓力感測元件基本設計原理等作簡易介紹；最後則針對 *Bronkhorst* 數位式氣體壓力控制器做硬體規格及 I/O 端子接線定義作介紹，俾使使用者瞭解 *Bronkhorst* 產品型號規格和完成供電、RS-232 序列通訊實體 I/O 端子連接等初步設定。

F-1-1 【氣體壓力控制器應用】

一般在 MOCVD 氣體傳輸管路設計中，有機金屬分子源(MO 分子)管路末端設置有氣體壓力控制器(以下簡稱壓力控制器)，有別於 V 族管路並無外加此裝置，主要原因為有機金屬分子一般為液態或固態的緣故，在決定氣相莫耳流率時不能單單藉由氣體流量計而是需要配合環境壓力參數來獲得，而已全然為氣態的 V 族或 SiH_4 分子則僅需透過氣體流量計即可獲得精確莫耳流量。在詳細敘述有機金屬分子莫耳流率計算之前，再次考慮氣體傳輸管路設計，有機金屬分子源氣體傳輸管路設計如圖 F-1 所示，如同 A-1 節【III 族管路】中的有機金屬分子源管路內容所述，有機金屬分子源管路氣動閥作動邏輯依是否攜出 MO 分子共分成 2 種狀態，圖 F-1(a)為一般潔淨狀態(Purge)，不攜出 MO 分子；圖 F-1(b)則為 MO 分子攜出過程

的管路示意，如圖 F-1(b)中紅色區域所見，配置在管路 Epifold 前端的壓力控制器其所控制的壓力範圍為管路上游端整體壓力值(相較於壓力控制器配置位置)，後續文章將詳細介紹管路壓力參數與 MO 分子莫耳流率的推演關係。

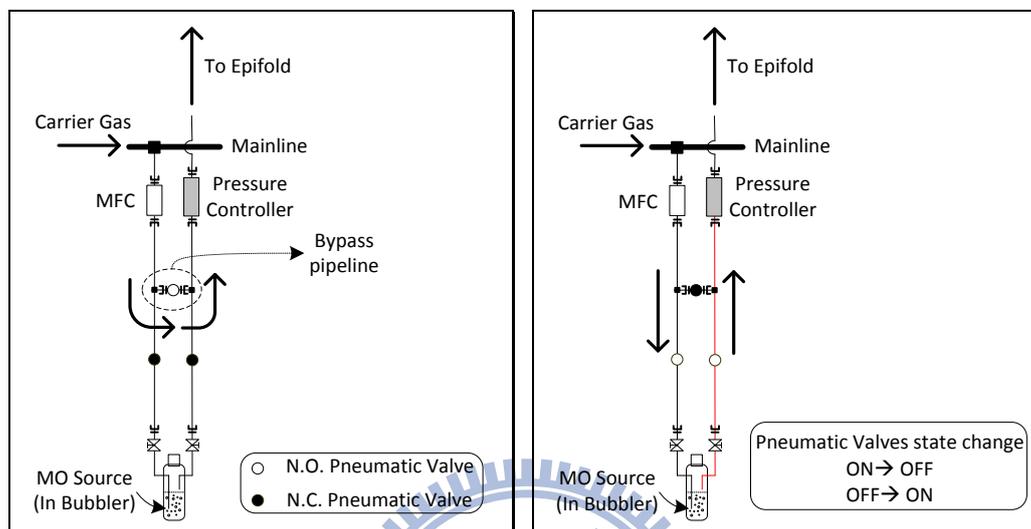


圖 F-1(a)不帶 MO Source，保持氣流穩定

圖 F-1(b)帶 MO Source，氣動閥狀態切換

有機金屬分子一般為液/氣共存態儲存於鋼瓶中，且在冷浴儲存槽 (Bubbler)內具有該溫度下的氣態飽和蒸汽壓^{註1}，載流氣體經由單一路徑通入有機金屬分子源所經過的管路可視為定容積(Fixed Volume)空間，由於氣相有機金屬分子處於高度稀釋(Highly diluted)的環境，因此可根據理想氣體方程式($PV=nRT$)，在恆溫且定容積環境下，氣體分子莫耳數比(n)等於其分壓比($P_{partial}$)；而前端流量計(MFC)可決定載流氣體之莫耳流率(mole/min)，末端上游壓力控制器可決定冷浴鋼瓶(Bubbler)內的整體壓力(如圖 F-1(b)中紅色區域所示)，在已知有機金屬分子在恆溫槽內於該溫度下之飽和蒸汽壓的條件下，我們可藉由氣體分壓比推算出氣相有機金屬分子源和載流氣體的氣相莫耳流率比，而得知載流氣體分壓則需要整體壓力參數^{註2}，如此即可藉由控制冷浴槽溫度、管路內(包含有機金屬分子儲存鋼瓶)整體壓力、載流氣體流量等參數來決定攜出的有機金屬分子莫耳數；式 F-1 即為 MO 分子氣相莫耳流率計算。

$$MO \text{ source mole flow rate}(\text{mole}/\text{min}) = \frac{F_{MO}}{22400} \times \frac{P_{MO}^{Sat.}}{P^{PC} - P_{MO}^{Sat.}} \quad (\text{F-1})$$

F_{MO} ：進口端流量計流量，單位為 *sccm*。(決定載流氣體流量)

$P_{MO}^{Sat.}$ ：MO 分子氣態飽和蒸汽壓，單位為 *mbar*。(Bubbler temp. control)

P^{PC} ：壓力控制器設定之壓力，單位為 *mbar*。

詳細氣相有機金屬分子莫耳流率(*mole/min*)推導過程、實際量化數值，及不同 MO 分子飽和蒸汽壓與溫度的關係式，請參閱附錄 E E-C。

註 1：有機金屬分子儲存鋼瓶溫度由冷浴儲存槽(Bubbler)所控制。

註 2：載流氣體分壓即為管路內總壓力(壓力控制器所控制)減去有機金屬分子氣相飽和蒸汽壓。

如上文所述，在有機金屬分子氣相莫耳流率的計算上，需要透過整體壓力參數藉由氣體分壓比即分子莫耳數比的概念，計算出有機金屬分子的實際莫耳流率；而在 V 族反應物方面，由於 V 族分子(NH₃)已全為氣態，故不需透過壓力參數即可直接透過流量計求得 V 族反應分子的氣相莫耳流率；詳細 V 族氣體分子莫耳流率(*mole/min*)推導過程請參閱附錄 E E-C。

註：由於有機金屬分子數過少，需藉由載流氣體(Carrier Gas)攜至反應腔中與 V 族分子反應，以提升長晶效率。

F-1-2 【壓力控制器硬體設計】

壓力控制器硬體設計原理與流量計相似，皆是在硬體出口端配置針閥，藉以控制針閥開口度來達到壓力或流量控制，如同附錄 E 中圖 E-4 所示(僅感測電路設計不同)。配置針閥主要為調節流量用，而流量計是藉由熱敏感測電路所偵測的質量流量(*mole/min*)回溯訊號來控制其開口度，不考慮壓力參數；壓力控制器恰好相反，藉由調整針閥開口度來改變流通的氣體體積流量來造成動態壓力變化，如要增加管路壓力，控制器即調小針閥開口度藉由累積氣體方式來增加壓力。在氣體傳輸管路設計中，壓力控制器上游端配置有流量計，如此配置方式會造成壓力控制器在調節壓力時，流量計內

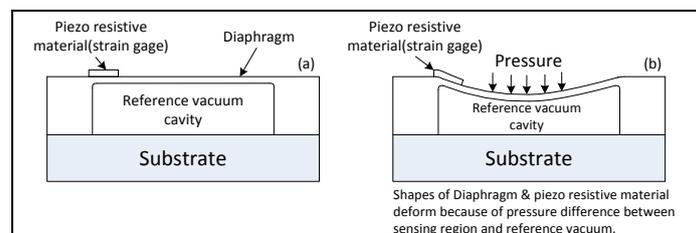
部針閥開口度為因應流量變化而有所變動，如此會因瞬間流量不連續而造成管路內部氣流擾動(體積流量變動造成)以致於壓力控制器出口端管路氣體流量有所變化；不過在管路壓力穩定後，依據氣體不可壓縮性，體積流量^註在上下游端仍可維持恆定值(即流量計設定值)。而流量計與壓力控制器結構上主要差異為感測元件設計不同，流量計感測元件主要為感測質量流量，詳細內容如附錄 E 中 E-1-2 節所介紹；壓力控制器感測器主要為感測管路內動態氣體壓力，壓力感測元件設計如下文所述。

註：體積流量與質量流量之間可由流體密度(ρ_v)轉換，如表 E-1 所示。

【壓力感測元件設計簡介】

壓力感測元件依其感測壓力範圍、感測壓力型式(絕對壓力、相對壓力)不同而有個別設計考量，而壓力感測器應用原理相當多，如壓電效應(Piezoelectric)、電容效應、壓阻效應(Piezo-resistive)等；系統中腔體壓力傳感器(MKS 628B)即利用電容效應所製成，而Bronkhorst壓力控制器內的感測元件則是利用微機電製程技術(MEMS)整合壓阻材料，利用其壓阻效應及配合電橋電路所製成。而所謂壓阻效應是指當材料受到應力(Strain)作用時，因幾何形狀改變(形變)導致電阻值改變的現象。這種現象普遍地存在各種材料中，其中以某些半導體的效應特別顯著；常見的壓阻效應如金屬，若將金屬絲拉長，電阻值會因長度變長、截面積變小造成其電阻值變大。

壓阻式壓力感測器的設計架構，是將具有壓阻特性的材料放置在感測器隔膜結構(Diaphragm)上^{註1}，如圖F-2(a)所示；

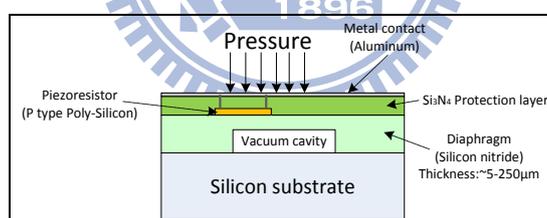


圖F-2 壓阻式壓力感測器設計架構

當外來壓力 P 施加在薄膜上時，薄膜會彎曲變形，而附於其上的壓阻也會隨著彎曲變形如圖F-2(b)，壓阻電阻值由原來的 R 變成 $(R+\Delta R)$ ，若將該壓阻

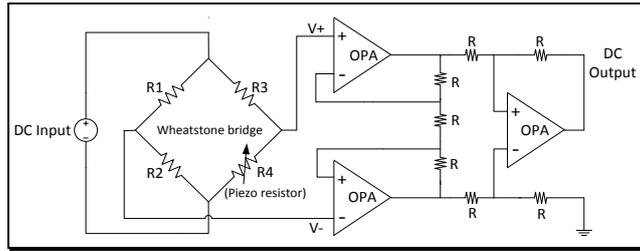
串接於惠斯同電橋(Wheatstone bridge)電路，則 ΔR 經由電路轉換可獲得 ΔV 的電壓訊號，壓力(P)越大， ΔR 亦越大， ΔV 也隨著增加，而由 ΔV 輸出即可得知壓力P的大小；一般來說壓阻電阻值變化量(ΔR)與其應變量($\Delta L/L$)之間為線性比例關係，而其比例關係定義為壓阻因子G(Gage factor)，壓阻因子與摻雜濃度、溫度、幾何形狀(W/L)、厚度等有關。

一般壓力感測器最常用的是以矽當基材(Substrate)，再應用微機電製程加工技術及半導體相關製作技術製作隔膜(Diaphragm)結構，而壓阻材料也多選用多晶矽(poly silicon)半導體材料。目前製造微型矽質壓力感測元件最常用的方法是利用擴散法或離子佈植法，將硼(Boron)摻入^{註2}多晶矽晶格中形成p-n接面，該p-n接面即為壓阻元件用來感測矽晶隔膜上的壓力變化，利用IC製程技術可將該隔膜感測元件、惠斯同電橋電路、訊號放大電路、準位校正電路等整合於矽晶片上。系統中所使用的壓力控制器為控制內部管路環境的絕對壓力值，故在壓力感測元件設計上有真空室(Vacuum cavity)設計(預先抽至參考真空)^{註3}，如圖F-3中(Vacuum cavity)所示；



圖F-3 壓力感測元件內部結構示意圖

參考真空室與感測環境之間配置隔膜(Diaphragm)，而壓阻材料則配置於隔膜上方(利用化學氣相沉積(CVD)方式成長);在隔膜內外壁之間形成壓力差時，隔膜會因受應力而發生形變(Deformation)，相同地附著在隔膜上的壓阻材料也隨之變形，而由於壓阻材質應變量($\Delta L/L$)可藉由電阻值變化($\Delta R/R$)來呈現(通常為阻抗變化與應變量之間為線性比例關係)。若將壓阻配置於惠斯同電橋電路(恆定電壓)中，如圖F-4所示；



圖F-4 惠斯同電橋&電壓訊號放大電路設計

其阻抗值變化即可轉換成 ΔV 電壓變化(因兩端電橋電壓不平衡所致)，配合電路運算即可得知隔膜應變量，再由隔膜彈性常數(K_s)、截面積、厚度等參數來獲得相對於參考真空端的壓力值(絕對壓力)。在圖F-3中，壓阻材料透過製程技術在其上方製作金屬接點(Metal bonding)以配合製作成惠斯同電橋電路。

圖F-5即為Bronkhorst感測壓力元件設計簡圖，獨立畫出的藍色區塊即為嵌有隔膜的矽晶片電橋電路，螺紋狀區域即為感測壓力環境端，此外Bronkhorst壓力感測器另有設計金屬隔膜(圖F-5中類似年輪狀的圓盤)隔絕外界感測壓力環境，目的為避免外界物質直接附著於壓阻電路上造成汙染，在金屬隔膜與感測電路間填充油作為電極絕緣及壓力傳導用，故設計上需考量填充物與金屬隔膜彈性係數、厚度等，避免降低壓阻的感測靈敏度。

註1：方形薄膜之變形量(diaphragm deflection)與應力(stress)最大絕對值會發生在薄膜邊緣中心處與薄膜中心處，若將壓阻置於這2個地方，將可獲得最大的阻值變化量(ΔR)。

註2：多晶矽摻雜濃度愈高可降低溫度對其電阻率(ρ)的影響，一般約大於 10^{16}cm^{-3} ，Bronkhorst即利用重摻雜的多晶矽作為其壓阻材料。

註3：參考真空腔(Vacuum Cavity)製法一般在MEMS中作法為先利用低壓CVD方式沉積磷矽玻璃(PSG)作為犧牲層，而後再沉積氮化矽隔膜結構；而後在不破壞隔膜結構下打出微孔，利用蝕刻液(HF,BOE)去除犧牲層，再利用沉積、微影等方式在極低壓環境下封住微孔，完成參考真空腔。

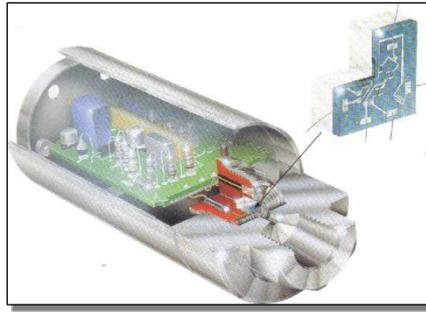


圖 F-5 Bronkhorst 感測壓力元件設計簡圖

F-1-3 【Bronkhorst EL-Press 氣體壓力控制器硬體規格】

EL-PRESS 系列採用直通性結構，可提供 0~15bar 的壓差傳送器，控制精度及重複性良好，氣體、液體均可使用，且可取代調壓閥及背壓閥；控制器依使用方式分為上游控制器及下游控制器，可控制上游壓力或下游壓力，並可與流量計並用，且可直接連接電腦或控制器自動設定來調節壓力，不鏽鋼接合處表面拋光粗糙度 R_a 值為 0.2~0.6 μm ，適合用於半導體高純度製程。Bronkhorst 壓力控制器的硬體規格如表 F-1 所列，P700 系列壓力控制器為控制上游端的管路整體總壓力。

Bronkhorst EL-Press Downstream Pressure Controller 型號：P-702CM-6K0A-AA	
P700 系列：背壓控制器，控制上游壓力；可調壓範圍(1:5) 20~100mbar、12.8~64bar	
操作壓力(Operation Pressure)	0.2~20 bar
可控制壓力範圍(Controllable range)	絕對壓力 200~2000mbar(a)
精度(Accuracy)	0.8% Read-out \pm 0.2% F.S. (0.8% 讀取值 \pm 0.2% 滿刻度)
材質(Materials)	316L Stainless Steel
操作溫度(Operation temperature)	-10~70 $^{\circ}\text{C}$
耐壓(Durable Pressure)	64bar
輸出訊號(Output signal type)	數位介面：RS-232 類比 I/O：0/4-20 mA，0-5VDC，0-10VDC
供給電源(Power supply)	15~24VDC
接頭(Fitting)	1/4" VCR Male
通訊介面(Communication interface)	RS-232
接面材質	金屬密封，管壁電子級(Electrical Polished)拋光(表面粗糙度 $R_a=0.2\sim 0.6\mu\text{m}$)
K_v (max)	6.6×10^{-2}

Bronkhorst 數位式壓力控制器產品型號對照表

P-702CM-6K0A-AA

P : Pressure controller

7 : Pressure sensor and valve

0 : Max. body durable press : 64bar

2 : Range : 2bar

CM : Metal seal

6K0A : 0-5VDC output , 0-5VDC set point or digital 0~100%

AA : 15~24VDC , with RS232 and Analog I/O, Normally Closed Controller

表 F-1 *Bronkhorst EL-Press* 壓力控制器規格

【*Bronkhorst EL-Press* I/O 端子定義】

圖 F-6 為 *Bronkhorst EL-Press* 詳細 I/O 腳位接線圖，其中腳位 1、4、6 為 RS-232 通訊介面接腳，腳位 1 為 RS-232 傳送端(Tx)、腳位 6 為 RS-232 接收端(Rx)、腳位 4 為 RS-232 訊號地端(Com)，腳位 4 與腳位 8(電源地端)為共接點；腳位 7、8 個別為 24VDC 電源正/負端接腳。

Bronkhorst 壓力控制器也可透過類比 I/O 介面來做壓力控制，此外壓力控制器類比 I/O 控制訊號為 0~5V 直流電壓，使用者可藉由線性切割 0~5V 直流電壓，並經由硬體上腳位 3 輸入來做類比 I/O 壓力控制。其中腳位 2、3 為類比控制端，腳位 2 為類比輸出端(讀取)，腳位 3 為類比輸入端(設定)。

表 F-2 為 *Bronkhorst EL-Press* 壓力控制器硬體 I/O 端子腳位定義整理。

<i>Bronkhorst EL-Flow</i> I/O 接腳定義	
腳位	功能
Pin 1	RS-232 Tx
Pin 6	RS-232 Rx
Pin 4	RS-232 Com
Pin 7	+24V
Pin 8	0V Sense
Pin 2	Analog output
Pin 3	Analog in.(setpoint)
Pin 5	Valve out.

表 F-2 *Bronkhorst EL-Press* I/O 腳位定義

外接 D 型 9-pin RS-232 接頭腳位定義如表 F-3 所示：

腳位碼	功能描述
Pin 1	Not connected
Pin 2	TXD
Pin 3	RXD
Pin 4	Not connected
Pin 5	0 Vd
Pin 6	DTR
Pin 7	CTS
Pin 8	RTS
Pin 9	Shield

表F-3 RS-232 D型接頭腳位定義

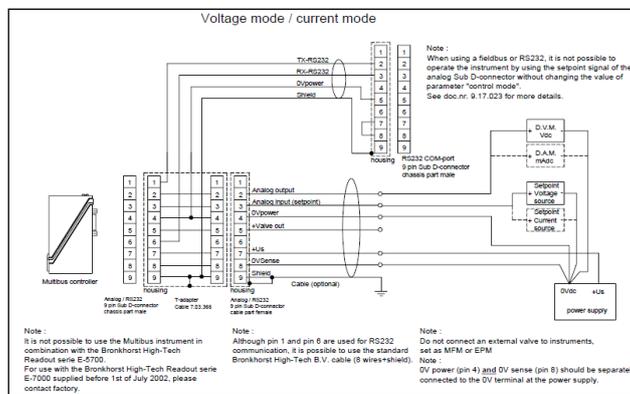


圖 F-6 Bronkhorst EL-Press 原廠接線定義

註：Pin4 及 Pin8 需個別獨立接至電源供應器 0V 端。

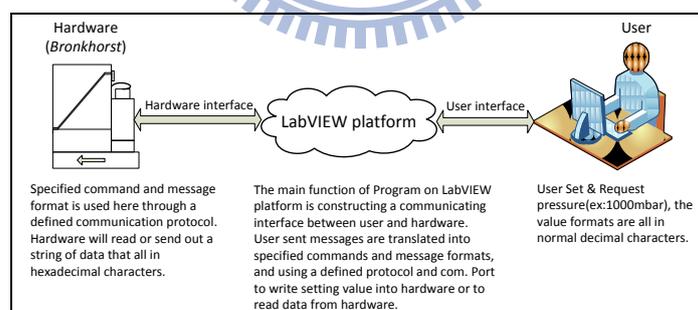
F-2 Bronkhorst 數位式氣體壓力控制器 RS232 序列通訊傳輸

Bronkhorst 數位式氣體壓力控制器(以下簡稱壓力控制器)並無提供手動設定功能，故其硬體內部參數均需要透過數位通訊傳輸介面來完成參數的寫入與讀取動作。本節將先介紹 Bronkhorst 數位式壓力控制器 RS-232 序列通訊初始設定，包含較為特殊的節點位址參數意義、RS-232 通訊協定設定、基本訊息格式定義等，提供使用者完成通訊協定設定和對基本訊息格式有初步了解，再來則針對壓力控制器對於相關通訊信息格式錯誤所送出的代碼做列表介紹，便於檢視訊息格式是否正確，使用者可選擇查閱之。

由於 Bronkhorst 系列通訊指令格式繁雜，F-4 節提供設定/讀取壓力(或流量)範例供使用者快速使用基本指令功能，使用者在利用 F-4 節中所陳述的

指令訊息透過LabVIEW平台與控制器通訊傳輸之前，必須透過F-5小節所介紹的Flow-BUS測試程式以獲得節點位址參數(Node address)，再針對F-4節中範例指令訊息內容作Node值、通訊埠(Com. port)等參數作修正即可，程式寫法則可仿效附錄B中附錄 VIIA-2-5節中圖B-A18(設定)、圖B-A19(讀取)等程式架構將Node值、通訊埠等修改後即可。*Bronkhorst*通訊協定設定如表F-4所列；使用者可無需再檢視F-2、F-3小節內容。

系統中使用者、LabVIEW平台、與硬體之間的相對連結關係如圖F-7所示，使用者基本上僅需將設定值寫入菜單中即可；LabVIEW平台主要為建立及整合使用者與各式硬體之間的溝通介面，而在LabVIEW平台上的程式設計則是將使用者輸入的數值搭配特定通訊指令轉換成可供硬體接收/存取的數值字串編碼格式，資料再透過與硬體之間實體通訊介面將特定指令訊息寫入控制器；相對地，程式也可對控制器作讀取動作，特定格式的讀取數值資料亦透過LabVIEW程式作數值格式擷取/轉換後遞交給使用者。本章後續所討論的訊息格式、指令用法/寫法介紹等內容皆為陳述LabVIEW平台與硬體之間的指令溝通格式，圖F-7方便使用者釐清其間從屬關係。



圖F-7 使用者、LabVIEW平台、硬體(控制器)之間相對關係示意圖

F-2-1 【RS-232序列通訊初始設定】

使用者透過RS-232序列傳輸介面和使用FLOW-BUS通訊協定，藉由連結至控制系統的實體序列通訊埠介面 (Serial Com. interface) 來達到和 **Bronkhorst P-702CM**數位式壓力控制器之間的資料傳輸。與系統中其他硬體RS-232通訊傳輸不同的是，在和Bronkhorst數位式壓力控制器通訊之前，使用者必須透過FLOW-BUS通訊協定以獲得特殊節點參數(Node Parameter)，在FLOW-BUS通訊協定中每項硬體有其個別之節點位址(Node Address)，其節點位址和啟成數位式流量計通訊中的硬體編號(Device Number)意義相似，主要為定義個別壓力控制器的位址編號(Address number)；而在傳輸訊息編碼中必須連同硬體節點位址(Node Address)一併送出，文章後續會詳加介紹如何獲得該節點位址參數。Bronkhorst 數位式壓力控制器的通訊協定預設值如表F-4所示。

Bronkhorst RS-232通訊協定參數設定	
波特率(Baud Rate)	38400 bps
資料位元長度(Data length)	8 bits
奇偶校驗位(Polarity check bit)	None
停止位元(Stop bit)	1 bit

表F-4 Bronkhorst RS-232通訊協定參數設定

F-2-2 【RS-232通訊指令格式】

Bronkhorst提供2種不同的通訊協定：

1. 利用ASCII編碼的通訊協定，可和現存的FLOW-BUS相關應用程式相容，這種通訊協定在單一時間內只能使單一組主(Host)/僕(Slave)器做數位通訊；該通訊協定為LabVIEW程式預設模式。
2. 增進式二進位通訊協定(Enhanced binary protocol)，可提供在單一時間內對不同之節點(Node)送出訊息，該通訊碼提供訊息串列(Message chained sequence)形式，可提供在單一時間對多台儀器下控制指令。

【資料連結型式(Data linking format)】

基本資料連結格式為16進位ASCII Code編碼(Hexadecimal ASCII Code)，完整資料格式主要由資料長度(Length)、Node值、資料內容(Data)等3大項所構成，其資料格式如下所示：

	Length		Node		Data			
:	Len1	Len2	Node1	Node2	Data1	Data2	CR	LF

相關格式說明如下：

「:」 初始宣告字元(Initial Character)。

「len1, len2」 包括節點位址(Node Address)的資料位元數(Bytes)，所以(len1,len2)位元長度為基本訊息長度+1。

「node1, node2」由遠端電腦(PC)端至壓力控制器(Host)端的目的地節點位址(Node address of destination, PC to Host)或由壓力控制器(Host)端至遠端電腦(PC)端的目的地節點位址(Node address of source, Host to PC)，基本上Node值皆相同，節點位址長度占1位元組。

「data1, data2」 相關指令字元和數值資訊。

「CR」 終止字元(Termination Character)。

「LF」 換行(Line Feed)。

除了起始(:)、終止(CR)與換行字元(LF)外，所有的字元將從1個10進位型式的資料格式轉換成2個ASCII Code編碼形式的16進位字元。例如： $(16000)_d \rightarrow (3E\ 80)_h$ ，下標d為10進位表示，h為16進位。

在Flow-BUS通訊環境中，資料位元長度最多可包含256個位元組(byte)，Node值為Flow-BUS通訊協定對硬體的位址設定；WK2008系統中個別壓力控制器的節點位址(Node Address)與序列通訊埠位址(Serial Com. port address)如表F-5所示：

EL-Press壓力控制器代稱	Node	通訊埠(Com Port)
TMGa_Press	3	COM 17
TMin_Press	1	COM 18
TMAI_Press	3	COM 30
Cp ₂ Mg_Press	3	COM 33

表F-5 系統中個別壓力控制器其通訊埠編號、節點位址對應表

F-2-3 【錯誤訊息代碼】

*Bronkhorst*硬體特殊錯誤訊息，為從壓力控制器(Host)傳遞至遠端電腦(PC)端的訊息，主要由訊息長度與錯誤碼所構成，其訊息型式如：

	0x01		Error		
:	0x30	0x31	Error1	Error2	CR

「:」 起始字元(Initial Character)。

「0x30, 0x31」 訊息長度，佔1位元(1 byte)。

「Error」 錯誤碼，由2個16進位(HEX)數值代碼所組成。

「CR」 中止字元(Terminal Character)。

在此所提及的錯誤碼主要是*Bornkhorst*數位式壓力控制器針對相關通訊信息格式錯誤，對遠端電腦所做出的信息回應；相關錯誤訊息代碼所代表意義如表F-6所示：

數值代碼	意義
00	指令格式無異常
01	訊息起始未有":"做為起始字元
02	第一個位元錯誤
03	可能原因有下列3項 1.第二個位元錯誤 2.數值之位元數為零 3.訊息大小過長
04	接收之訊息格式錯誤(receiver overrun, framing error etc.)
05	Flow-BUS通訊錯誤: 1. 訊息等待時間過長(timeout) 2. 訊息由接收端拒絕(message rejected by receiver)
08	傳送訊息時間過長(time-out during sending)
09	在訊息等待時間中，未接獲接收端之回覆 (no answer received within time out)

表F-6 *Bronkhorst* EL-Press錯誤碼意義

F-3 通訊訊息(Communication Message)

由於Bronkhorst數位式氣體壓力控制器的RS-232通訊指令較一般硬體編碼複雜，指令無論讀取或寫入皆以16進位(Hex)的數字編碼取代，且個別指令有其特定的數值格式並具有特定參數數值運算，若運算錯誤硬體將送出如表F-6所列的特定錯誤碼。本章在說明Bronkhorst氣體壓力控制器RS-232序列通訊指令編碼之前，將先介紹基本指令屬性、功能及其代碼定義，接下來再針對Bronkhorst通訊信息中諸多參數作介紹，包含硬體節點位址(Node address)、程序參數(Process number)、參數型態(Parameter type)等；再來則是針對基本傳輸訊息作完整格式定義，包含由遠端電腦(PC)送出的讀取、寫入指令；由數位式壓力控制器(Host)端所回覆的狀態回覆訊息回條、回應要求訊息等。

由於該部分文章內容皆為格式定義說明，使用者在閱讀上可能會發生不清楚實際指令描述意涵，有鑑於此，使用者可配合F-4節的指令範例交替比對指令內部字元內容，將有助於瞭解Bronkhorst指令撰寫方式。

F-3-1 【FLOW-BUS指令格式】

具有特定指令的訊息字串藉由Flow-BUS通訊協定及RS-232介面和硬體之間做遠端訊息傳輸，訊息格式為16進位ASCII碼，這些含有指令及數值的16進位字元將轉換成大寫(Capital)之ASCII碼透過RS-232傳送至壓力控制器端，指令訊息由 ":" 字元作為起始位元， "\r\n" 作為終止位元(Carriage return and Line-Feed)。

在Bronkhorst的FLOW-BUS通訊協定中，有數項指令(COMMAND)可供使用且指令皆以數字代碼表示，相關指令說明如表F-7所列；然而只有RD(04)及WR(01)能執行標準的參數讀取與寫入功能，其餘指令皆為設定硬體動作，其屬性不為數值讀寫。Bronkhorst寫入指令WR(01)如同啟成數位式流量計寫入指令，硬體會自動回覆確認信息回條(Returned status message

receipt)，回條訊息中包含錯誤碼(Error number)回覆、狀態訊息(Status message)回覆、指令狀態回覆(表F-7中指令代碼05)等項，回條錯誤碼代碼意義如表F-10所示；如果Error number=0，代表WR(01)指令無誤，詳細的讀取/寫入指令格式說明請參閱F-3-2小節；然而讀取指令RD(04)僅回應所要求的相關數值(Return values that asked for)。

註：ASCII 字元":", 其對應的16進位數值(Hexadecimal value)為3A。

ASCII 字元"\r", 其對應的16進位數值為0D。

ASCII 字元"\n", 其對應的16進位數值為0A。

*Bronkhorst*數位式壓力控制器通訊指令及其功能描述如表F-7所列：

指令代碼	功能描述
00	要求狀態訊息(Request Status message)
01	傳送(寫入)訊息指令，包含目的地位址(Destination address)，該指令會有(00)指令(狀態訊息)回覆。
02	傳送(寫入)訊息指令，包含目的地位址(Destination address)，該指令不要求狀態訊息回覆。
03	傳送(寫入)訊息指令，包含發送訊息源頭位址(Source address)，該指令不要求狀態訊息回覆。
04	讀取硬體資訊指令，該訊息會有(02)或(00)指令(狀態訊息)回覆
05	指示：重複地傳送參數指令(Followed by bytes with repeating time)
06	停止指令(Stop process)
07	起始指令(Start process)
08	要求訊息指令(Claim process)
09	不要求訊息指令(Un-claim process)

表F-7 *Bronkhorst*數位式壓力控制器通訊指令及其功能描述

在對*Bronkhorst*硬體存取特定參數(Access parameters)之前，使用者必須知道下列4項參數意涵。

1. 節點位址(Node address)：

在系統中每個使用FLOW-BUS介面的硬體，都個別連結至一組特定的節點位址。

2. 程序數值(Process number)：

個別硬體對應至單一節點位址(Node Address)，但個別節點中可包含數個執行程序(Process)，程序數值即為執行程序編號。

3. 參數數值(Parameter number, FBnr) :

每個執行程序中可包含數個參數數值(Parameter number)，其數值以FBnr表示。

4. 參數型態(Parameter type) :

每個參數數值可定義其數值資料型態(Number type)，詳見下文。

【參數型態(Parameter type)】

在Bronkhorst RS-232通訊指令集中，每項指令皆有其限定的參數數值資料型態，大致分為字元(Character)、整數(Integer)、浮點數(Float)、長整數(Long)、字串(String)等，使用者務必根據其給定指令所限定的數值資料型態來設定，否則可能發生錯誤訊息，詳細指令與其對應數值型態請參閱917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments檔案，Appendix 1參數特性表(parameter properties table)內容，表F-8列出個別的參數型態(Parameter types)、16進位之數值代碼，及其可供顯示的數值範圍。

Type	Id(16進位)	位元組(bytes)	範圍(Range)
字元(Character)	00 _h	1	0~255
整數(Integer)	20 _h	2	0~65535
浮點數(Float)	40 _h	4	±1.18e-38~±3.39e+38
長整數(Long)	40 _h	4	0~4294967296
字串(String)	60 _h	X	字串長度需額外指定

表F-8 Bronkhorst指令數值參數型態

F-3-2 【寫入/讀取指令格式(Write-In/Read-Out message)】

本小節針對基本傳輸訊息作完整格式定義，包含由遠端電腦(PC)送出的讀取、寫入指令；由數位式壓力控制器端(Host)所回覆的狀態回覆訊息回條、回應要求訊息等，說明方式將由列表呈現。

【寫入指令格式(Write-In message format)】

*Bronkhorst*寫入指令格式及相關描述如表F-9所示，其中Nr僅代表步驟，無特殊意涵，寫入指令格式即是根據步驟次數(Nr)來依序排定，如F-2-2小節中資料連結型式所提及，訊息格式必須由":"作為起始字元，第2個字元為資料長度(Length)，第3個則為節點位址(Node)等，訊息最後須有"\r\n"字元作為結尾；相同地，除了起始(:)與結尾字元(\r\n)外，其餘字元皆為16進位ASCII編碼，詳細字元描述如表F-9依序所列。

Nr	Byte	Layout	描述(Description)	
0	:		起始字元(start character)	
1	Length		訊息長度(Message length)	
2	Node		節點位址(Node address)	
3	01or02		寫入指令代碼，使用者可下達(01)或(02)指令。 如果寫入指令代碼(01)，會有狀態訊息(00)回覆，02則無。	
4	Process	Cp p p p p p p	c	程序連結(Process chained)
			p	程序數值(Process number)
5	Parameter type	Ct t p p p p p	c	參數連結(Parameter chained)
			t	參數數值型態(Parameter type)
			p	參數數值(Parameter number, FBnr)
6	Value 1		所有參數型態之數值，如為'string'型態，需包含字串長度	
7	Value 2		參數數值型態為'integer', 'float' 或'long'的數值	
8	Value 3		參數數值型態為'float' 或'long'的數值	
9	Value 4		參數數值型態為'float' 或'long'的數值	
X	Value x		More value fields follow for type 'string' depending on string length. If given string length is zero, the final field should also contain a zero.	
X+1	'\r'		Carriage Return	
X+2	'\n'		Line Feed	

表F-9 *Bronkhorst EL-Press*寫入指令格式

【狀態回覆信息回條格式(Returned status message receipt format)】

如表F-7指令代碼(01)功能描述欄位所述，使用者在下達寫入指令WR(01)後，硬體會自動回傳狀態訊息(00)回條，該回條信息內容主要為Flow-BUS通訊協定狀態檢查、指令參數字元檢視、該節點位址是否已佔用、通訊埠緩衝空間是否過載、通訊埠是否符合連結規範等狀態判定等；表F-10列出Bronkhorst數位式壓力控制器的基本狀態訊息回條格式及其代碼意義描述，需注意該回覆訊息長度固定為4個位元組(4 bytes)，此外表F-10中粗黑字體代表較常發生的指令錯誤回覆字元，使用者可根據狀態回條代碼來初步判定錯誤狀態發生原因，回覆訊息細節範例如表F-14所列。

Nr	Byte	Description
0	':'	Start character
1	04	Fixed message length 4
2	Node	Node address
3	00	Command status(狀態指令)
4	Status	<p>00 No error</p> <p>01 Process claimed</p> <p>02 Command error</p> <p>04 Parameter error</p> <p>05 Parameter type error</p> <p>06 Parameter value error</p> <p>07 Network not active</p> <p>08 Time-out start character</p> <p>09 Time-out serial line</p> <p>0A Hardware memory error</p> <p>0B Node number error</p> <p>0C General communication error</p> <p>0D Read only parameter.</p> <p>0E Error PC-communication</p> <p>0F No RS232 connection</p> <p>10 PC out of memory</p> <p>11 Write only parameter</p> <p>12 System configuration unknown</p> <p>13 No free node address</p>

		14 Wrong interface type 15 Error serial port connection 16 Error opening communication 17 Communication error 18 Error interface bus master 19 Timeout answer 1A No start character 1B Error first digit 1C Buffer overflow in host 1D Buffer overflow 1E No answer found 1F Error closing communication 20 Synchronization error(同步出錯) 21 Send error 22 Protocol error 23 Buffer overflow in module
5	Index or Claimed process	Index pointing to the first byte in the send message for which the above status applies. In case of the status CLAIM ERROR, this field contains the claimed process.
6	'r'	Carriage Return
7	'n'	Line Feed

表F-10 基本回覆狀態訊息格式

【讀取指令(Read-Out Message format)】

*Bronkhorst*數位式壓力控制器讀取指令格式如表F-11依Nr排序所列，需注意讀取指令是以"04"字元代碼呈現(如表F-7)，該指令代碼專責讀取硬體內部數值資訊，各式指令代碼詳見表F-7所列。

Nr	Byte	Layout	描述(Description)	
0	:		起始字元(start character)	
1	Length		訊息長度(Message length)	
2	Node		節點位址(Node address)	
3	04		讀取指令(Command read)	
4*	Process (return)	Cp p p p p p p	c	程序連結(Process chained)
			p	程序數值(Process number)
5*	Parameter type &	Ctt n n n n n	c	參數連結(Parameter chained)

	index (return)		t	參數數值型態(Parameter type)
			n	參數索引值(Parameter index) 0...31
6	Process	-ppppppp	-	Not used
			p	程序數值(Process number)
7	Parameter	-tpppppp	-	Not used
			t	參數型態(Type parameter)
			p	參數數值(Parameter number , FBnr)
8	String length			數值如為'string'型態，需包含字串長度
9	'\r'			Carriage Return
10	'\n'			Line Feed

表F-11 Bronkhorst 讀取指令格式

【Bronkhorst硬體回應要求訊息格式(Returned message format)】

Bronkhorst數位式壓力控制器回應讀取指令訊息格式如表F-12依Nr編號所列，而在這裡所指的回覆訊息是指硬體回應使用者所下達的讀取指令，例如回覆目前壓力值、目前設定值等資訊，而狀態回覆訊息回條指的是待使用者將相關設定數值(如設定壓力)寫入壓力控制器後，硬體的接收狀態確認回條。

Nr	Byte	Layout	1896	描述(Description)
0	:			起始字元(start character)
1	Length			訊息長度(Message length)
2	Node			節點位址(Node address)
3	02			寫入指令
4*	Process	Cppppppp	c	程序連結(Process chained)
			p	程序數值(Process number)
5*	Parameter type & index	Cttnnnnn	c	參數連結(Parameter chained)
			t	參數數值型態(Parameter type)
			n	參數索引值(Parameter index) 0...31
6	Value 1			所有參數型態之數值。 如為'string'型態，需包含字串長度
7	Value 2			參數數值型態為'integer'，'float' 或'long'的數值
8	Value 3			參數數值型態為'float' 或'long'的數值
9	Value 4			參數數值型態為'float' 或'long'的數值
X	Value x			More value fields follow for type 'string' depending on

			string length. If given string length is zero, the final field should also contain a zero.
X+1	'\r'		Carriage Return
X+2	'\n'		Line Feed

表F-12 *Bronkhorst*硬體回應讀取指令的訊息格式

**The requested module copies these values from the request message directly into the answer message.*

F-4 指令範例

為方便使用者瞭解指令使用方式，本小節附上寫入壓力值、讀取設定壓力值、讀取目前壓力值等 3 項指令範例提供使用者參閱。要注意的是所有指令參數除了節點位址(Node address)外，其餘參數包含程序數值(Process number)、參數數值(Parameter number, FBnr)、參數型態(Parameter type)、指令讀寫屬性(Attribute, 唯讀或可讀寫)等皆須透過 917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments 文件，Appendix 1 參數特性表(parameter properties table)來獲得，而節點位址則需透過開啟 **Flow-BUS 通訊協定**來取得，操作方式請參閱 F-5-1 小節 FLOWDDE 測試程式使用方法中的第 4 點內容。

注意：*Bronkhorst* 壓力控制器壓力控制/顯示單位已限定為 mbar(a)/(a)代表絕對壓力，使用者僅能作讀取動作(Parameter number:129)，不可再做單位變更，如需更動單位只能由程式方面作數值變換。

F-4-1 【寫入特定壓力值】

如同表F-1所列，系統中所選用的*Bronkhorst P-702CM*壓力控制器其可控制壓力範圍為200~2000mbar，最小刻度為0.1mbar。*Bronkhorst*通訊數值編碼為由5個10進位連續字元呈現，範圍為(00000)_d~(32000)_d，而數值編碼與設定壓力值之間為線性對應關係，亦即(00000)_d對應0mbar，(32000)_d對應於最大範圍，即2000mbar；依此線性關係若設定為1000mbar，則需給定10

進位數值(16000)_d。由於該壓力控制器最小可控制壓力值為0.2bar，故盡量不要給定控制器低於(03200)_d的數值。

例：設定壓力控制器控制壓力在最大壓力控制範圍(Capacity：2bar)的50%，亦即1000mbar，假定壓力控制器的節點位址(Node Address)為03_(hex)。

控制器所允許輸入的數值編碼為從(00000)_d到(32000)_d，其數值與壓力值之間為線性對應關係，所以使用者僅需給定控制器壓力設定值數值編碼(16000)_d，且Node Address=3。注意：使用者在菜單設定上僅需寫入1000mbar，而控制程式會將該數值轉換成(00000)_d~(32000)_d的5個連續字元再配合寫入指令輸入給壓力控制器；以下即為程式碼格式及其代表意義，指令內容為送出設定指令及數值參數至節點位址(Node Address)：3。

Nr	Byte	Layout	描述		
0	':'		起始字元(Start character)		
1	06		訊息長度(Length) 6 Bytes		
2	03		節點位址(Node Address) 3		
3	01		寫入指令(01)，需有狀態訊息回覆		
4	01	00000001	C	00	訊息程序不鏈結 (Process not chained)
			P	01	程序(Process) 1
5	21	00100001	C	00	訊息參數不鏈結 (Parameter not chained)
			T	20	參數型態'整數' (Parameter type 'integer')
			P	01	參數數值(FBnr.=1) (Parameter number, FBnr.=1)
6	3E		設定數值為16000(十進位)=3E80(16進位)		
7	80		Setpoint (16000) _d = (3E80) _h		
8	'\r'		Carriage Return		
9	'\n'		Line Feed		

表F-13 Bronkhorst EL-Press寫入特定壓力值的範例指令

註1：節點位址為FLOW DDE通訊協定中所定義，詳細內容請參閱F-5-1 FLOWDDE測試程式使用方法。

註2：訊息長度計算為Nr=2到Nr=7之數值數，且2個字元長度占有1位元組(byte)，而Length=6 bytes亦即從節點位址(Node Address)到設定數值為其訊息長度計算區間(03 01 01 21 3E 80)。

註3：寫入指令(01)為含有狀態訊息回覆之指令，使用者亦可利用不含狀態訊息回覆(Status message)的寫入指令(02)，詳見表F-7。

註4：該程式使用程序(Process)參數為1，是因為設定setpoint指令的Process number：1。詳細內容請查閱917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments文件，Appendix 1參數特性表(parameter properties table)中(Parameter number(DDE):9)Process number欄。

註5：Nr=4的片段指令中，由於傳送訊息不使用鏈結(Chain)型態，所以此片段寫入的數值為00h+01h=01h，h代表為16進位，01h即Process number。

註6：Nr=5的程式片段中，參數型態為整數(Integer)，是由於該setpoint指令的變數型態(Variable type)為整數，整數型態的16進位Id值為20h(參閱表F-8)，詳細內容請參閱917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments檔案，Appendix 1參數特性表(parameter properties table)中(Parameter number(DDE):9)的Var Type欄。

註7：Nr=5的程式片段中，參數數值(Parameter number)為1，也是因為setpoint指令的FBnr值為1，詳細內容請逕自參閱917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments檔案，Appendix 1參數特性表(parameter properties table)中(Parameter number(DDE):9)的FBnr(par)欄。

註8：Nr=5的片段指令中，由於傳送訊息不使用鏈結(Chain)型態(00h)，參數型態為整數(20h)，且參數數值(FBnr)為01h，所以Nr為5的程式片段傳送之指令碼為00h+20h+01h(皆為16進位)，即是21h。

註9：Nr=6及Nr=7的程式片段，為16000(10進位)設定值的16進位表示。(16000)d=(3E80)h。

註10：Nr=8及Nr=9為指令終止字元(CR LF)。

註11：綜合上述10點，實際傳送的指令碼為:06030101213E80\r\n，數值部分皆為16進位表示，非10進位；完整16進位表示為(3A06030101213E800D0A)_h。

【狀態回覆信息回條】

*Bronkhorst*數位壓力控制器回應遠端電腦的回覆信息回條之數值格式及其代表意義如表F-14所列，而基本回覆信息範例如表F-10所示。

Nr	Byte	描述
0	':'	起始字元(Start character)
1	04	訊息長度(Length)，回應訊息固定長度為4 bytes
2	01	節點位址(Node address) 01
3	00	狀態回覆訊息(Command status)
4	00	Status ok.，00對應為No error.
5	05	Status ok，索引值(Index value)指向傳送訊息結尾。
6	'\r'	Carriage Return
7	'\n'	Line Feed

表F-14 *Bronkhorst* EL-Press硬體回覆指令格式

註1：硬體回覆信息回條格式為:0401000005\r\n，完整16進位表示為(3A04010000050D0A)_h。

註2：Nr=3之相關狀態訊息，請參閱表F-10中(Nr=4)。常見之錯誤碼為04：參數錯誤(Parameter error)或05：參數型態錯誤(Parameter type error)。

註3：在下達指令前，使用者必須詳細閱讀917027*Bronkhorst*--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments檔案中Appendix 1的參數特性表(parameter properties table)，且要確認該指令的讀寫型態(Read/Write)，及各項指令對應參數，包含Process number、FBnr、Var. type等。且須注意：**Appendix 1數值皆為10進位格式**，在下達指令前務必將其數值轉換成16進位格式，否則可能發生錯誤信息。

F-4-2 【讀取設定壓力值指令範例】

表F-15列出電腦端(PC)送出的讀取目前設定壓力值程式碼格式、指令數值及其代表意義，而基本指令格式如表F-11所示。

Nr	Byte	Layout	描述		
0	':'		起始字元(Start character)		
1	06		訊息長度(Length)：6 bytes		
2	03		節點位址(Node Address)：3		
3	04		讀取指令(Command read)		
4	01	00000001	C	00	訊息的程序未做鏈結 (Process not chained) (return)
			P	01	程序為1(Process) 1 (return)
5	21	00100001	C	00	訊息參數未做鏈結 (Parameter not chained) (return)
			T	20	參數型態為'整數'(Parameter type) 'integer' (return)
			N	01	參數之索引值(FBnr)為1 Parameter index 1 (return)
6	01	-0000001	P	01	訊息程序為1(Process 1)
7	21	-0100001	T	20	參數型態為'整數'(Parameter type 'integer')
			P	01	參數之索引值(FBnr)為1 (Parameter number , FBnr.= 1) (setpoint)
8	'\r'		Carriage Return		
9	'\n'		Line Feed		

表F-15 Bronkhorst EL-Press讀取目前設定壓力值指令

註1：Nr=3之訊息片段，指令格式為04，代表為讀取硬體相關數值的要求指令。詳細內容請參閱表F-7 (Nr=4)。

註2：Nr=4及Nr=5之訊息片段，其傳送訊息的數值表示意義，如同設定壓力控制器數值的指令中的Nr=4及Nr=5片段，由於setpoint參數為可讀可寫的指令，所以相關的程序

(Process), 參數型態(Parameter type), 參數數值(Parameter number, FBnr)等數值皆相同。

註3: 訊息長度之計算也是由Nr=2至Nr=7, 亦即從節點位址(Node Address)到指定參數型態為其長度計算區間, 共6 bytes。

註4: 綜合上述, 讀取指令為:06030401210121\r\n, 數值部分皆為16進位; 完整16進位表示為(3A060304012101210D0A)_h。

【Bronkhorst硬體回應要求訊息】

表F-16列出控制器回應電腦設定數值訊息格式及其參數代表意義:

Nr	Byte	Layout	描述		
0	':'				
1	06		訊息長度為6 bytes。		
2	03		節點位址為3		
3	02		傳送訊息指令, 包含目的地位址 (Destination Address), 該指令沒有要求狀態訊息回覆。		
4	01	00000001	C	00	程序未鏈結(Process not chained)
			P	01	程序為1(Process 1) (receiving process)
5	21	00100001	C	00	參數未鏈結(Parameter not chained)
			T	20	參數型態為'整數'(Parameter type 'integer')
			N	01	參數索引為1(Parameter index 1)
6	3E		傳回之數值(3E80) _h 為16進位, 亦即10進位(16000) _d ,		
7	80		而實際壓力值計算為 $\frac{16000}{32000} \times 2000 = 1000\text{mbar}$, 2000即為該壓力控制器的最大控制壓力容量 (Capacity)。		
8	'\r'		Carriage Return		
9	'\n'		Line Feed		
註: 回傳訊息為: <u>06030201213E80\r\n</u> , 數值部分皆為16進位; 完整16進位表示為(3A06030201213E800D0A) _h 。					

表 F-16 Bronkhorst EL-Press 硬體回覆指令格式

F-4-3 【讀取目前壓力值指令範例】

表F-17列出電腦端(PC)送出的讀取目前壓力值程式碼格式、指令數值及其參數代表意義，而基本指令格式如表F-10所示。

Nr	Byte	Layout	描述		
0	':'		起始字元(Start character)		
1	06		訊息長度(Length)：6 bytes		
2	03		節點位址(Node Address)：3		
3	04		讀取指令(Command read)		
4	01	00000001	C	00	訊息的程序未做鏈結 (Process not chained) (return)
			P	01	程序為1(Process) 1 (return)
5	20	00100000	C	00	訊息參數未做鏈結 (Parameter not chained) (return)
			T	20	參數型態為'整數'(Parameter type) 'integer' (return)
			N	00	參數之索引值(FBnr)為0 Parameter index 0 (return)
6	01	-0000001	P	01	訊息程序為1(Process 1)
7	20	-0100001	T	20	參數型態為'整數'(Parameter type 'integer')
			P	00	參數之索引值(FBnr)為0 (Parameter number , FBnr.= 0) (measure)
8	'\r'		Carriage Return		
9	'\n'		Line Feed		

表F-16 Bronkhorst EL-Press讀取目前壓力值指令

註1：Nr=3之訊息片段，指令格式為04，代表為讀取硬體相關數值的要求指令。詳細內容請參閱表F-6 (Nr=4)。

註2：Nr=4及Nr=5之訊息片段，measure參數為僅供讀取的指令，程序(Process)=1，參數型態(Parameter type)為整數，參數數值(Parameter number , FBnr)=0，詳細內容請參

閱917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments檔案，Appendix 1參數特性表(parameter properties table)中(Parameter number(DDE):8)的各項參數欄位。

註3：訊息長度之計算也是由Nr=2至Nr=7，亦即從節點位址(Node Address)到指定參數型態為其長度計算區間，共6 bytes。

註4：綜合上述，讀取指令為:06030401200120\r\n，數值部分皆為16進位；完整16進位表示為(3A060304012001200D0A)。

【Bronkhorst硬體回應要求訊息】

表F-17列出Bronkhorst數位式壓力控制器回應目前壓力數值訊息格式及其參數代表意義：

Nr	Byte	Layout	描述		
0	':'				
1	06		訊息長度為6 bytes。		
2	03		節點位址為3		
3	02		傳送訊息指令，包含目的地位址 (Destination Address)，該指令沒有要求狀態訊息回覆。		
4	01	00000001	C	00	程序未鏈結(Process not chained)
			P	01	程序為1(Process 1) (receiving process)
5	20	00100001	C	00	參數未鏈結(Parameter not chained)
			T	20	參數型態為'整數'(Parameter type 'integer')
			N	00	參數索引為0(Parameter index 0)
6	4B		傳回之數值(4B05)h為16進位表示，亦即10進位數值		
7	05		(19205)d，而實際壓力計算即 $\frac{19205}{32000} \times 2000 = 1200.3\text{mbar}$ 。		
8	'\r'		Carriage Return		
9	'\n'		Line Feed		
<p>註：回傳的訊息為:06030201204B05\r\n，數值部分為16進位；完整16進位表示為(3A06030201204B050D0A)。</p>					

表 F-17 Bronkhorst EL-Press 硬體回覆指令格式

F-5 Bronkhorst FlowDDE 測試程式

Bronkhorst 廠商提供了 EL-Press/EL-Flow 數位式氣體壓力控制器/流量計共用測試程式(FlowDDE/FlowView)供使用者操作，FlowDDE 測試程式主要提供 Bronkhorst 系列硬體的內部參數檢視，包含硬體序號、供給電壓、壓力單位、目前設定、目前讀取值(流量或壓力)、可控制最大範圍、控制氣體種類、PID(Kp,Ti,Td)參數值等所有列於 917027Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments 文件檔案，Appendix 1 參數特性表(parameter properties table)中的參數皆可存取；使用者可根據其參數屬性(Attribute)作讀寫動作。此外 FlowView 測試程式提供硬體即時設定及讀取動作，使用者可透過程式上橫條移動來調整壓力值或流量值，並可即時觀測硬體反應，這提供使用者對硬體動作是否正常的初步測試；文章後續將依序介紹測試程式的使用方法及功能操作。

F-5-1 【FLOWDDE 測試程式使用方法】

Bronkhorst 廠商提供 FlowDDE 及 FlowView 測試程式，且業已安裝於系統工業電腦中，路徑為 C:\Program Files\Bronkhorst\FlowDDE32 開啟路徑如圖 F-8 所示，程式執行步驟如以下 9 點所示：



圖 F-8 Bronkhorst FlowDDE 程式路徑

1. 先開啟 FlowDDE V4.58，此為開啟 RS-232 通訊與 FLOW-BUS 介面，FLOW-BUS 程式即為廠商所附的 RS-232 通訊介面程式。
2. 開啟 FlowDDE V4.58，程式畫面如圖 F-9。

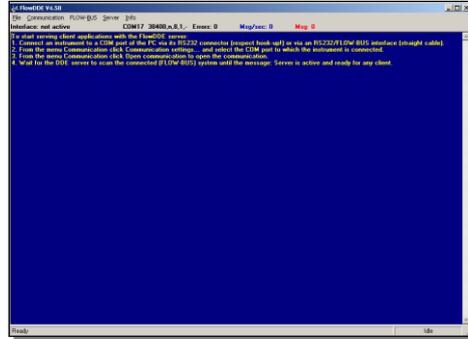


圖 F-9 Bronkhorst FlowDDE 程式開啟畫面

3. 請先選擇上方控制列中的 Communication 通訊欄，先做通訊埠及波特率設定；基本設定如圖 F-10 所示。

註：TMGa_Press 為 COM17，TMIn_Press 為 COM18，TMGa(L)為 Com11。

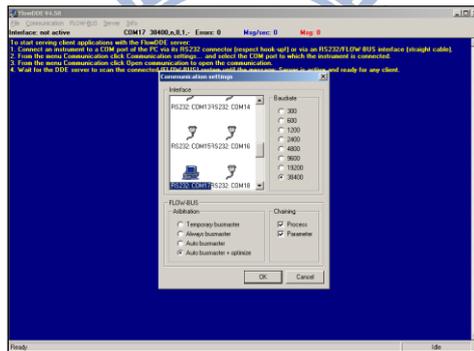


圖 F-10 Bronkhorst FlowDDE 程式 RS-232 通訊協定設定

4. 通訊協定設定完成後，程式上方將出現該硬體的節點位址(Node Address) 參數，而該節點位址為Node 3。在LabVIEW平台中壓力控制器程式和 Bronkhorst氣體流量計(TMGa(L))的節點位址(Node Address)數值設定即利用該FlowDDE程式獲得，而通訊協定為：COM17，38400，n，8，1。當程式最後一列出現‘Server is active and ready for client’，即代表硬體已處於準備狀態，可供下達指令。

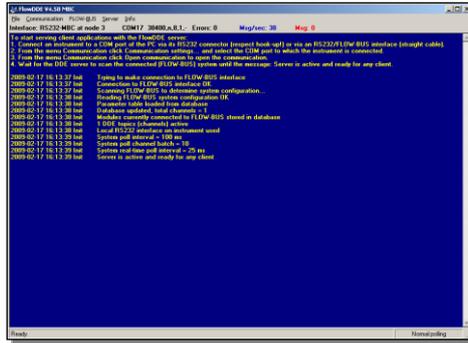


圖 F-11 Bronkhorst FlowDDE 程式就緒畫面

1. 點選上方控制列中 Flow-BUS 欄，如圖 F-12 所示，Flow-BUS 提供諸多硬體指令測試，其中"Parameter"下拉式選單即可選擇指令，並可依照指令屬性作數值讀寫動作；指令代碼對照請參閱 917027U Bronkhorst--RS232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments 文件檔案，Appendix 1 參數特性表(parameter properties table)中第 1 行(Parameter number(DDE))內編號。圖 F-12 的畫面為存取該壓力控制器(TMGa_Press)的各項數值。依序為：壓力控制器 ID：SNM82116648；供給電壓：24V，目前壓力讀取值：19205，轉換實際壓力為 $\frac{19205}{32000} \times 2000 = 1200.3\text{mbar}$ ，設定壓力值：19200，實際設定壓力為 $\frac{19200}{32000} \times 2000 = 1200\text{mbar}$ ，該壓力控制器之最大控制壓力範圍(Capacity)：2.00E+3，即 2000mbar，使用者若需作數值寫入，則可依照該指令屬性及數值合理寫入範圍，利用右方"Write"按鍵作寫入動作。
注意：Bronkhorst 壓力控制器壓力控制/顯示單位已限定為 mbar(a)/(a)代表絕對壓力，使用者僅能作讀取動作(Parameter number:129)，不可再做單位變更，如需更動單位只能由程式方面作數值變換。

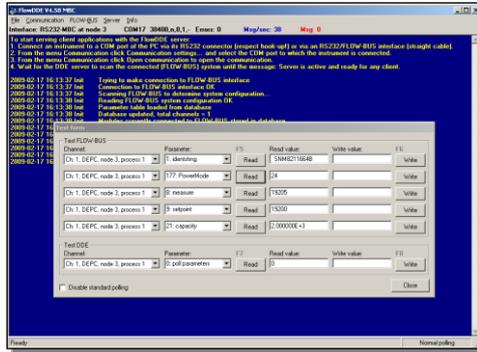


圖 F-12 Bronkhorst FlowDDE Flow-BUS 執行畫面

6. 開啟 FlowView V1.15 程式，該程式必須要在 FlowDDE 開啟下才能執行，而該程式提供壓力控制器即時監控功能(In-situ monitoring & control)，路徑為 C:\Program Files\Bronkhorst\FlowView。程式開啟路徑如圖 F-13。



圖 F-13 Bronkhorst FlowView 程式路徑

7. 開啟 FlowView 視窗如圖 F-14 所示，上方 Measure 顯示目前之壓力值。首先點選 Advanced，選擇控制模式 (Ctrlmode)，由於我們是透過 FLOW-BUS 及 RS-232 數位控制，故選擇 0.Bus/RS232 控制項。



圖 F-14 Bronkhorst FlowView 程式開啟畫面(選取控制項)

8. 上方 Setpoint 中可供設定壓力值，可上下調整上方藍色橫條(Scroll bar)，或直接由下方輸入數值；在調整同時，可以看到 Measure 部分即時反應目前壓力值。



圖 F-15 Bronkhorst FlowView 程式執行畫面

9. 結束測試，點選離開(Exit)，並關閉通訊埠(Close communication)及 FlowDDE 程式，將系統通訊埠釋出。

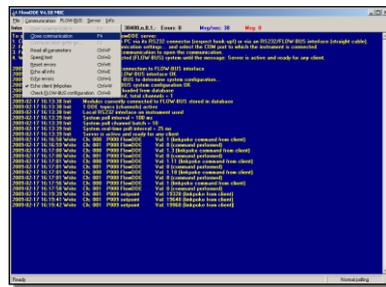


圖 F-16 結束 FlowDDE 程式畫面

F-6 Bronkhorst 氣體流量控制器規格及 RS-232 序列通訊

本小節為 Bronkhorst 數位式氣體流量控制器介紹，內容包含硬體規格簡介和 RS-232 序列通訊介紹等。在硬體介紹部分，僅包含硬體規格列表及 I/O 端子接線定義等項；在 RS-232 序列通訊部分，由於所有傳輸指令格式與 Bronkhorst 數位式壓力控制器完全相同，使用者可參照 F-3~F-4 文章內容來類比指令撰寫方式，文章不再贅述。此外流量感測硬體設計與啟成數位式氣體流量控制器相仿，使用者可參閱附錄 E E-1-2 內容。

F-6-1 【Bronkhorst EL-Flow 氣體流量控制器規格】

Bronkhorst EL-Flow 氣體流量控制器詳細硬體規格如表 F-18 所列。

Bronkhorst EL-Flow Mass Flow Controller	
型號：F-200CV-002-AAD-88V	
F-200CV 系列：流量控制器；可調流量範圍 0.01~2sccm	
操作壓力(Operation Pressure)	0.2~64 bar
可控制流量範圍(Controllable range)	0.01~2sccm
精度(Accuracy)	0.8% Read-out ± 0.2% F.S.

	(0.8%讀值±0.2%滿刻度)
材質(Materials)	316L Stainless Steel
操作溫度(Operation temperature)	-10~70°C
耐壓(Durable Pressure)	64bar
輸出訊號(Output signal type)	數位：RS-232 類比 I/O：0-5VDC
供給電源(Power supply)	+15~24VDC
接頭(Fitting)	1/4" VCR Male
通訊介面(Communication interface)	RS-232
接面材質	金屬密封，管壁 EP 拋光 (表面粗糙度 Ra=0.2~0.6µm)
Kv (max)	6.6×10^{-2}
Seals	Viton
熱機時間	最佳準確度：30min 準確度(±2%F.S.)：2min
控制穩定度	<±0.1%F.S.
控制器設定時間	1~2 秒
重複性(Repeatability)	<0.2%Rd (誤差值小於 0.2%讀取值)
<p>註：</p> <p>型號說明：F-200CV-002-AAD-88V 1896</p> <p>2→Controller</p> <p>0→Pressure rating：64bar</p> <p>0CV→Range：min：0~0.7sccm，Max：9sccm</p> <p>002→Nominal range：0~2sccm</p> <p>A→Communication(I/O)：RS232+Analog(n/c control)</p> <p>A→Analog output：0~5V</p> <p>D→Supply voltage：+15~24VDC(analog，FLOW-BUS，Profibus，Modbus)</p> <p>88→Connection(in/out)：1/4" Face seal male</p> <p>V→Internal seals：Viton</p>	

表 F-18 Bronkhorst EL-Flow 氣體流量控制器規格

【EL-Flow I/O 端子接線定義】

EL-Flow I/O 端子接線定義與 EL-Press 相同，可直接參考 F-1-3 小節內圖 F-3 和表 F-2、F-3 內容。

F-6-2 【RS-232通訊之初始設定】

使用者透過RS-232通訊介面及使用FLOW-BUS通訊協定，藉由連結至WK2008控制系統的序列通訊埠介面(Serial Com. interface)，來控制Bronkhorst *EL-Flow F-200CV*數位式氣體流量控制器。

由於在FLOW-BUS通訊協定中，每一硬體有其個別之節點位址(Node Address)，節點位址和流量計通訊中的硬體編號(Device Number)意義相同，主要為定義個別流量計編號；而在傳送的訊息中必須連同硬體節點位址(Node Address)一併送出，Bronkhorst *EL-Flow*數位式氣體流量計通訊協定預設值如表F-4所列。

【EL-Flow流量計RS-232通訊指令】

Bronkhorst *EL-Flow*系列流量計通訊指令與Bronkhorst *EL-Press*系列壓力控制器指令寫法相同，請參閱F-3、F-4兩小節內容。表F-19列出該流量計在系統中的通訊埠編號及Flow-BUS節點位址設定。

EL-Flow流量計代稱	Node	通訊埠(Com Port)
TMGa(L)	3	COM 11
SiH ₄ _Source	3	COM 19
SiH ₄ _Dilute	3	COM 20
SiH ₄ _Inject	3	COM 21

表 F-19 Bronkhorst *EL-Flow* 流量計通訊埠編號及 node 值

F-7 Bronkhorst FlowDDE 測試程式操作

本小節主要為 Bronkhorst FlowDDE 測試程式在氣體流量計上的操作說明，以及在系統斷電後如何利用 FlowDDE 測試程式將 Bronkhorst 相關硬體校正回數位控制的操作步驟介紹，使用者可根據其需求選擇查閱之。

F-7-1 【FLOWDDE 測試程式使用方法】

Bronkhorst 廠商提供 FlowDDE/FlowView 測試程式，業已安裝於WK2008 控制系統中，Bronkhorst FlowDDE 程式路徑為 C:\Program

Files\Bronkhorst\FlowDDE32 開啟方式如圖 F-17 所示，程式執行步驟如下 9 點所列：



圖 F-17 Bronkhorst FlowDDE 程式路徑

1. 先開啟 FlowDDE V4.58，此為開啟 RS-232 通訊 FLOW-BUS 介面。
2. 開啟 FlowDDE V4.58 畫面如圖 F-18。

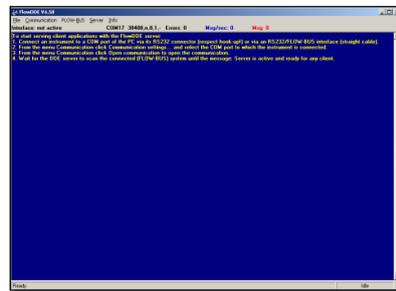


圖 F-18 Bronkhorst FlowDDE 程式執行畫面(Idle)

3. 請先選擇上方控制列中 Communication 欄，先做通訊埠及波特率設定；基本設定如圖 F-19 所示。

註：流量計 TMGa(L)通訊埠編號為 Com11，壓力控制器 TMGa_Press 通訊埠編號為 COM17，TMIn_Press 通訊埠編號為 COM18。

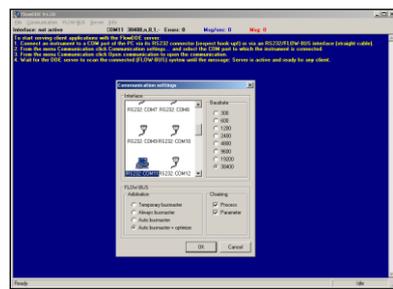


圖 F-19 Bronkhorst FlowDDE 之 RS-232 通訊協定設定

4. 通訊協定設定完成後，程式上方將出現該硬體之節點位址(Node Address)，而該節點位址為Node 3。在LabVIEW中Bronkhorst流量計程式設定的節點位址(Node Address)即利用該程式獲得，而通訊協定為：COM11, 38400, n, 8, 1。當程式最後一列出現‘Server is active and ready

for client’，即代表硬體已處於準備狀態，可供下達指令。

5. 點選 FLOW-BUS，如圖 F-20 所示，選擇"Test FLOW-BUS and DDE"，該功能提供硬體指令測試，其中"Parameter"下拉式選單即可選擇指令。而圖 F-20 的畫面為讀取該流量計(TMGa(L))的各項數值。依序為：目前流量讀取值：15981，轉換成實際流量值為 $\frac{15953}{32000} \times 2.00 = 0.99\text{sccm}$ ，目前流量設定值：16000，轉換為設定流量為 1sccm，控制模式(Cntrlmode)：0，亦即透過 Bus/RS232 控制，流量計 ID：SNM9200709A，容量(Capacity)：2sccm。

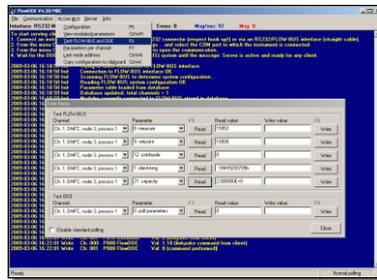


圖 F-20 Bronkhorst FlowDDE 程式中 FlowBus 執行視窗

註：**Bronkhorst**流量計的閥動作控制(Valve control)，可藉由 Write value功能送出CntrlMode(parameter number：12)相關功能之對應數值即可，相關數值對應之功能如表 F-20 所示，詳細功能之對應數值請參閱[917027Bronkhorst--RS-232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments.pdf](#)檔案之Appendix 2 parameter properties table，預設值為 0：Setpoint= BUS Ssetpoint。

Valve Control for <i>Bronkhorst</i> EL-Flow ContrlMode(12)	
數值	對應功能
0	Setpoint = BUS setpoint
1	Setpoint = Analog input
2	setpoint = master output(FLOW-BUS) * slave factor(FLOW-BUS)
3	close valve
4	setpoint idle (no reaction on changes in sensor signal)
5	testmode enable (select subject with par 70)
6	tuningmode enable (select subject with par 79)
7	setpoint = 100%



圖 F-22 Bronkhorst FlowView 程式選取控制項畫面

8. 調整 Setpoint 可供設定流量值，可上下調整上方藍色橫條(Scroll bar)，或直接由下方輸入數值；在調整同時，可以看到 Measure 即時反應目前流量值。

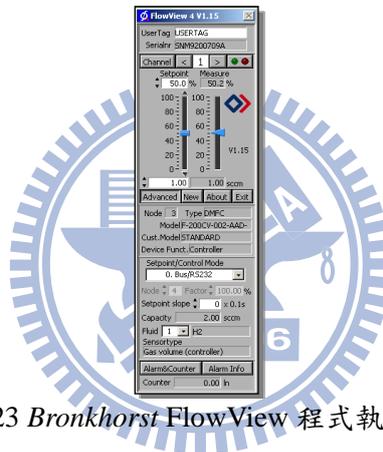


圖 F-23 Bronkhorst FlowView 程式執行畫面

9. 結束測試，點選離開(Exit)，並關閉通訊埠(Close communication)及 FlowDDE 程式，將通訊埠釋出。

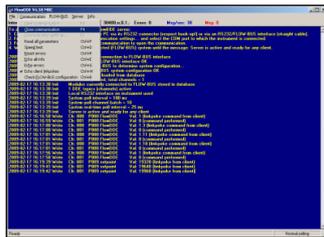


圖 F-24 結束 FlowDDE 程式畫面

註：詳細 Bronkhorst 流量計的所有控制指令及其屬性，請逕自參閱 [UBronkhorst--RS-232 interface With FLOW-BUS protocol for digital Mass Flow and Pressure instruments.pdf](#) 檔案之 Appendix 1 parameter properties table。