

國立交通大學

工學院專班半導體材料與製程設備組

碩士論文

利用 OES 光譜儀診斷作為電漿氮化閘極製程之氮濃度之
應用

Using OES to Predict Nitrogen Concentration for Plasma Nitrided Gate
Oxide Process and Applications

研究生：楊學修

指導教授：陳家富 博士

中華民國九十六年七月

利用 OES 光譜儀診斷作為電漿氮化閘極製程之氮濃度之應用

Using OES to Predict Nitrogen Concentration for Plasma Nitrided Gate Oxide
Process and Applications

研 究 生：楊學修

Student : Hsueh-Hsiu Yang

指 導 教 授：陳家富 博士

Advisor : Dr. Chia-Fu Chen

國 立 交 通 大 學

工學院專班半導體材料與製程設備組

碩 士 論 文



Master Degree Program of Semiconductor Material and Process Equipment
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Program of Semiconductor Material and Process Equipment

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十六 年 七 月

利用 OES 光譜儀診斷作為電漿氮化閘極製程之氮濃度之應用

學生：楊學修

指導教授：陳家富 博士

國立交通大學工學院專班半導體材料與製程設備組碩士班

摘 要

半導體業在成本與效能的驅使下，電晶體密度不斷提高電晶體尺寸也不斷微小化，尋找閘極介電層高介電常數 (high K) 材料以有效降低漏電流問題，並利用金屬閘極 (metal gate) 縮小等效氧化層厚度，以提高電晶體速度，一直是半導體業界不斷努力的課題。但是這些先進的製程技術尚未成熟且需較高製造成本，所以目前仍以氮氧化矽 (SiO_xN_y) 的介電層薄膜為量產上的主要技術。

氮氧化矽中的氮濃度比例為電漿氮化閘極製程最重要的參數，但是由於這是個單一晶圓的集束型設備 (single wafer clustered process) 製程，在量產上遭遇到幾個困難，其一是當最後氮濃度結果有誤時，不易判定由哪一個製程反應室造成；即當電漿氮化製程在反應過程超過容許誤差時，並無法即時偵測。其二是傳統量化電漿氮化製程之方法為再氧化 (Re-Oxidation)，但因為需在晶圓上反覆鍍膜，故有耗時及較高成本之缺點。

為改善前述之缺點，本論文以 5 個不同波長的波段穿越濾光鏡 (Band pass filter)，分別為 337.03 nm、357.38 nm、391.28 nm、590.43 nm 及 601.31

nm 來偵測電漿氮化製程所產生之光放射光譜(Optical Emission Spectroscopy, OES)，再以輝光強度與 X-光光電子能譜儀測得的氮濃度做相關性 (correlation) 分析。實驗結果顯示 337.03 nm 波長的輝光強度與氮濃度有最高的相關性，推測此製程的氮濃度，主要是由此波長的氮離子所貢獻。因此，可以利用此波長的輝光強度來間接作為此製程中氮濃度的即時量化指標；進而延伸找到光譜訊號強度與部分的關鍵電性參數，如等效氧化層厚度，汲極飽和驅動電流和臨界電壓有線性關係存在。換言之，利用 OES 訊號可以幫助對元件電性參數找出最佳化的區間。而最重要的是此種預測方法具有及時與簡單之優點。



Using OES to Predict Nitrogen Concentration for Plasma Nitrided Gate Oxide
Process and Applications

Student : Hsueh-Hsiu Yang

Advisor : Dr. Chia-Fu Chen

Program of Semiconductor Material and Process Equipment
National Chiao Tung University

ABSTRACT

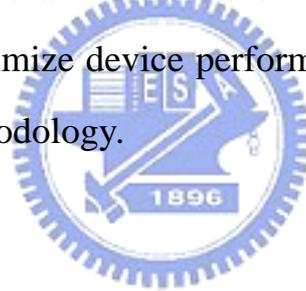
Due to the driving force of the manufacturing cost and device performance in the semiconductor industry, the transistor density has been continuously doubled in every year. Consequentially the transistor is also constantly down scaling. Therefore, looking for the material of gate dielectric with high dielectric constant (high k) to reduce the leak current and metal gate to decrease the effective oxide thickness (EOT) for high performance transistor are always the priority for semiconductor industry.

Oxynitride is popularly used as gate dielectric in complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process for device scaling before high K and metal gate being commercialized in semiconductor industry. One of the important technics to grow oxynitride is decoupled plasma Nitridation (DPN).

For DPN process, the most important process parameter is the concentration of nitrogen in SiO_2 . However two major issues are introduced by cluster. One is that once the nitrogen concentration is out of expectation there is no way to decouple which chamber is the root cause. In other words, there is no in-situ monitoring technic in place for DPN process. The other is that currently technic used to quantify nitrogen concentration is to use re-oxidation. However re-oxidation is more complicate and not cost effective.

In this thesis, 5 band pass filters with different wave length are used to

detect the spectrum intensity of species in DPN chamber. 5 of them are 337.03 nm, 357.38 nm, 391.28 nm, 590.43 nm and 601.31 nm respectively. Thereafter the intensity of optical emission spectroscopy (OES) is used to correlate the Nitrogen concentration that measured by XPS. The results successfully demonstrate that the specific wavelength of 337.03 nm in the spectrum has the highest sensitivity and the best correlation to nitrogen concentration. Therefore it is also believed that the nitrogen concentration is dominated by this specific species. Furthermore, the result is extended and applied for optimization of the device performance from OES intensity. Results turning out show that some electrical properties of device correlate to OES intensity including equivalent oxide thickness, saturated drain current and threshold voltage. In other words, OES could be used to optimize device performance qualitatively. Finally this is an in-situ and simple methodology.



誌謝

在離開學校的十五年後再度回到校園，那種感恩與珍惜之心特別豐富。感恩的是許多教授在課堂上傳授的寶貴知識，尤其是我的指導教授 陳家富博士，在每週末不厭其煩的在論文上的指導，心力的付出難以言寓。同時要感謝 郭正次博士、潘扶民博士及 陳密博士撥空指導論文的寫作與擔任學生的畢業口試委員。而要珍惜的是半導體學分班上的每一個學長、同學與學弟，這種學生相處的氣氛是企業文化裡不容易有的。尤其同一個實驗室的同學 林美惠、林俊傑在許多活動與事務的安排與協調，熱心的幫忙讓整個學習與論文的進展相當順利。

最後要把這幾年的成果獻給我最親愛的家人與支持我的公司主管與同事，沒有他們在時間與精神上的支持，我不會有時間上的彈性。

目錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	iii
誌謝	.....	v
目錄	.....	vi
表目錄	.....	viii
圖目錄	.....	ix
第一章、	緒論.....	1
1.1	研究動機與目的.....	3
1.2	論文架構.....	4
1.3	問題概述.....	4
第二章、	理論與文獻.....	7
2.1	電漿.....	7
2.1.1	電漿特性.....	7
2.1.2	電感耦合式電漿源.....	8
2.2	輝光放電光放射光譜.....	10
2.3	光電效應.....	13
2.4	光電倍增管.....	14
2.5	電漿氮化製程.....	15
第三章、	實驗方法.....	16
3.1	相關實驗儀器與原理.....	16
3.1.1	氮濃度量測.....	16
3.1.2	膜厚度量測.....	17
3.1.3	氮化製程設備.....	17
3.1.3.1	基底氧化層的成长.....	19
3.1.3.2	電漿氮化製程.....	20
3.1.3.3	後氮化回火製程.....	20
3.1.4	電性量測設備.....	21
3.1.4.1	閘極漏電流.....	23
3.1.4.2	等效氧化層厚度.....	23
3.1.4.3	臨界電壓.....	24
3.1.4.4	汲極飽和電流.....	25
3.2	MOSFET 晶圓試片的製作.....	25
3.3	實驗規劃.....	26
第四章、	結果與討論.....	28
4.1	光譜波長選定.....	28
4.2	實驗設備安裝.....	29

4.3	相關製程之穩定性.....	29
4.4	光譜訊號強度的穩定性.....	31
4.5	與二氧化矽層中氮濃度的關聯性.....	32
4.6	光放射光譜訊號強度與電性的關係.....	35
4.6.1	光放射光譜與等效氧化層的厚度的關聯.....	36
4.6.2	OES 與 V_t 的關聯.....	38
4.6.3	OES 與 I_{dsat} 的關聯.....	40
4.6.4	OES 與 J_g 的關聯.....	43
4.7	電性參數的最佳化.....	45
第五章、	結論.....	46
參考文獻	.....	48
自傳	.....	52



表目錄

表 3-1	集束型閘極堆疊各製程程序與條件.....	19
表 4-1	光譜波長的選定表.....	29
表 4-2	電漿氮化集束型設備前後相關製程的條件.....	30
表 4-3	電漿氮化集束型設備前後相關製程的厚度穩定性.....	30
表 4-4	各波長訊號變化的標準差.....	32
表 4-5	氮濃度與各波長的相關性和靈敏性比較表.....	35
表 4-6	SiO ₂ 與 Si ₃ N ₄ 的特性比較.....	38
表 4-7	OES 訊號強度與電性參數的關聯與最佳區間.....	45



圖目錄

圖 1-1	電漿氮化閘極製程備.....	5
圖 1-2	閘極堆疊示意圖.....	6
圖 1-3	傳統再氧化製程方法.....	6
圖 2-1	電感式電漿源非碰撞加熱機制示意圖.....	10
圖 2-2	平面型 ICP 結構示意簡圖.....	10
圖 2-3	低壓電漿反應器內電壓電流關係數.....	11
圖 2-4	光子與電子轉換示意圖.....	14
圖 2-5	光電倍增管光電轉換與電子碰撞示意圖.....	15
圖 3-1	X-光光電子能譜儀 (Revera-RVX 1000)	16
圖 3-2	X-光光電子能譜儀對晶圓產生光電子示意圖.....	16
圖 3-3	橢圓儀 (KLA-Tencor SFX-100)	17
圖 3-4	集束型閘極堆疊設備 (Applied Materials Centura 4.0)	17
圖 3-5	電漿氮化集束型製程流程示意圖.....	18
圖 3-6	基底氧化層鍵結示意圖.....	19
圖 3-7	電漿氮化製程鍵結示意圖.....	20
圖 3-8	後氮化回火製程修復懸浮鍵結示意圖.....	21
圖 3-9	後氮化回火製程修復介面空缺鍵結的示意圖.....	21
圖 3-10	半導體參數分析儀 (Agilent 4070)	22

圖 3-11	電晶體電性參數示意圖.....	22
圖 3-12	MOSFET 晶圓製作剖面圖.....	26
圖 3-13	實驗步驟規劃流程.....	27
圖 4-1	標準製程下高解析度全波段光譜圖.....	28
圖 4-2	系統安裝示意圖.....	29
圖 4-3	光譜訊號強度的穩定性.....	31
圖 4-4	光放射光譜 Channel#1 與氮濃度的關係.....	33
圖 4-5	光放射光譜 Channel#2 與氮濃度的關係.....	33
圖 4-6	光放射光譜 Channel#3 與氮濃度的關係.....	34
圖 4-7	光放射光譜 Channel#4 與氮濃度的關係.....	34
圖 4-8	光放射光譜 Channel#5 與氮濃度的關係.....	35
圖 4-9	光放射光譜與等效氧化層厚度的相關性-NMOS.....	37
圖 4-10	光放射光譜與等效氧化層厚度的相關性-PMOS.....	37
圖 4-11	MOSFET 中逆轉層的示意圖.....	39
圖 4-12	光放射光譜與臨界電壓的相關性-NMOS.....	39
圖 4-13	光放射光譜與臨界電壓的相關性-PMOS.....	40
圖 4-14	光放射光譜與汲極飽和電流的相關性-NMOS.....	42
圖 4-15	光放射光譜與汲極飽和電流的相關性-PMOS.....	42
圖 4-16	光放射光譜與閘極漏電流的相關性-NMOS.....	44

圖 4-17 光放射光譜與閘極漏電流的相關性-PMOS.....44



第一章、緒論

在半導體業的微縮過程中，要不斷調整電晶體尺寸，可能還必須採用數種新的材料和製程來實現先進製程規格的電晶體的製造。雖然密度在不斷提高，但每個新的製程技術節點（technology node）所希望的性能改進卻變得日益難以實現，尤其困難的是既要支援必要的製造控制要求，又要實現足夠高的驅動電流與低漏電性能。因此近來有許多種不同的解決方案被提出來，但主要的發展趨勢有幾個方面。其一，在實現微縮調整目標的過程中，對製程創新、加工次序和過程控制的要求非常嚴格；其二，IC 製造商與設備供應商之間的夥伴關係非常重要，兩者儘早地參與設計是按照預期達成技術規格的唯一途徑；其三，掌握各個製程環節、各個製程環節之間的相互作用、元件設計和元件製程技術有助於減少延誤開發進度的潛在因素[1][2]。

隨著元件特徵尺寸（Critical Dimension, CD）的縮小，電晶體的漏電流會不斷增加，因此也造成現今奈米製程技術瓶頸從以前的製程後端線（Back End Of Line, BEOL）轉移到製程前端線（Front End Of Line, FEOL）。現今整個技術發展的重點與瓶頸是在提高密度和改善電晶體的性能，所以製程前端線面臨的挑戰性還是相當嚴峻的[3]。在高介電常數閘極介電層材料（high K dielectric）、金屬閘極（metal gate），等先進的製程技術尚未成

熟及高製造成本的障礙下[4]，氮氧化矽（silicon oxynitride）介電層成為業界相對低成本與熱穩定度（thermal stability）高的介電層材料[5]。於是如何改善氮氧化矽介電層在元件上的表現與減少量產上的障礙，為 90 奈米與 65 奈米半導體製程節點重要的課題[6]。過去有多種技術包括以電漿輔助化學氣相沈積系統（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD）成長的氮化氧化層[7]，遠端電漿氮化（Remote Plasma Nitridation, RPN）[8]，氮化物/氧化層堆疊[9]等皆已經被廣泛地研究，然而這些技術在引進氮於閘極介電層中卻已被發現將造成元件可靠度顯著地變差[10][11]。

去耦合電漿氮化（Decoupled Plasma Nitridation, DPN）製程從 90 奈米以來逐漸取代上述製程而成為先進製程上的重要技術[12]。原因為採用 DPN 技術的單一晶圓集束型設備（clustered tool）在可接受的漏電和可靠性條件下可以達到 1.2nm 以下的等效氧化層厚度（Effective Oxide Thickness, EOT），並保持較高的遷移率（mobility）[13]。而集束式的處理則可以改善 EOT 尺寸的調整、晶圓與晶圓和晶圓內一致性以及電晶體性能[14][15]。

在本論文中將討論目前 DPN 技術的集束型設備在量產上遭遇無法即時偵測氮濃度的困擾，進而利用電漿的輝光放射光譜（Optical Emission Spectroscopy, OES）來解決此一問題；進而延伸實驗結果來達到幫助元件參數最佳化的目的。

1.1 研究動機與目的

以 DPN 技術來製造的電漿氮化閘極介電層 (plasma nitrided gate dielectric) 為單一晶圓的集束型設備，關鍵製程參數為二氧化矽層中的氮濃度，但是在量產上如何對氮濃度即時的量化上遭遇到幾個困難：

1. 當最後製程結果出問題時，不易區分由哪一個製程反應艙 (process chamber) 所造成。
2. DPN 製程在反應過程中，如果因為電漿狀態異常而造成製程結果的改變時，並無法即時 (real time) 偵測。
3. 再氧化 (re-oxidation) 為傳統的低成本量化電漿氮化製程之手法，但因為需要在晶圓上反覆鍍膜與量測，故有耗時及較高成本之缺點。
4. X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) 雖然可以精準量測氮濃度，但因為對元件具有破壞性，且價格高昂不適合應用於量產上。

為改善前述電漿氮化閘極製程在量產上的困擾，本論文主要想達到以下幾個目的：

1. 找到一個可以間接與氮濃度有關的指標且滿足以下需求
 - (1) 有合理的關聯性

(2) 具有高的再現性

(3) 需要是現地 (in-situ) 的偵測而非異地 (ex-situ)

2. 進而利用此一實驗結論衍伸其應用在對電性參數的最佳化

1.2 論文架構

本論文架構共分成五章：

第一章、緒論：包含研究動機與目的、論文架構及問題概述。

第二章、理論與文獻：包含電漿、輝光放電光放射光譜、光電效應、光電倍增管及電漿氮化製程。

第三章、實驗方法：包含相關實驗儀器與原理、試片的製作、實驗流程。

第四章、結果與討論：包含實驗數據的判讀、延伸的應用與理論的驗證。

第五章、結論：為本研究結果的說明。**1.3 問題概述**

電漿氮化閘極製程是在一集束型設備如圖 1-1 裡完成如圖 1-2 的閘極堆疊 (gate stack)，其中需要經過 4 個不同的製程反應腔，分別為成長基底氧化層 (base oxide)、對此基底氧化層做電漿氮化 (plasma nitridation)、再來是後氮化回火 (Post Nitridation Anneal, PNA) 製程,最後再成長多晶矽閘極 (poly gate)。此四個步驟中間並無間斷，於是當最後製程結果不合乎預期時必須要有量化的方式去釐清哪一個製程反應室出問題。對於基底氧化層、後氮化回火製程與多晶矽閘極製程等，量產上已有成熟的量化及監控機制

[16]，並不在此論文的討論範圍。

然而對於電漿氮化製程而言，傳統是以如圖 1-3 所示，利用不同的氮濃度對再氧化反應後有著光學厚度的差異 (optical delta) [17]來作為對 DPN 製程結果的量化標準與監控機制。這種方法當 DPN 製程後的氮濃度有異常時依然可以被測得，但多了一道氧化製程且因為需要反覆量測膜厚，相當費時亦無法達到即時 (real time) 偵測之目的。

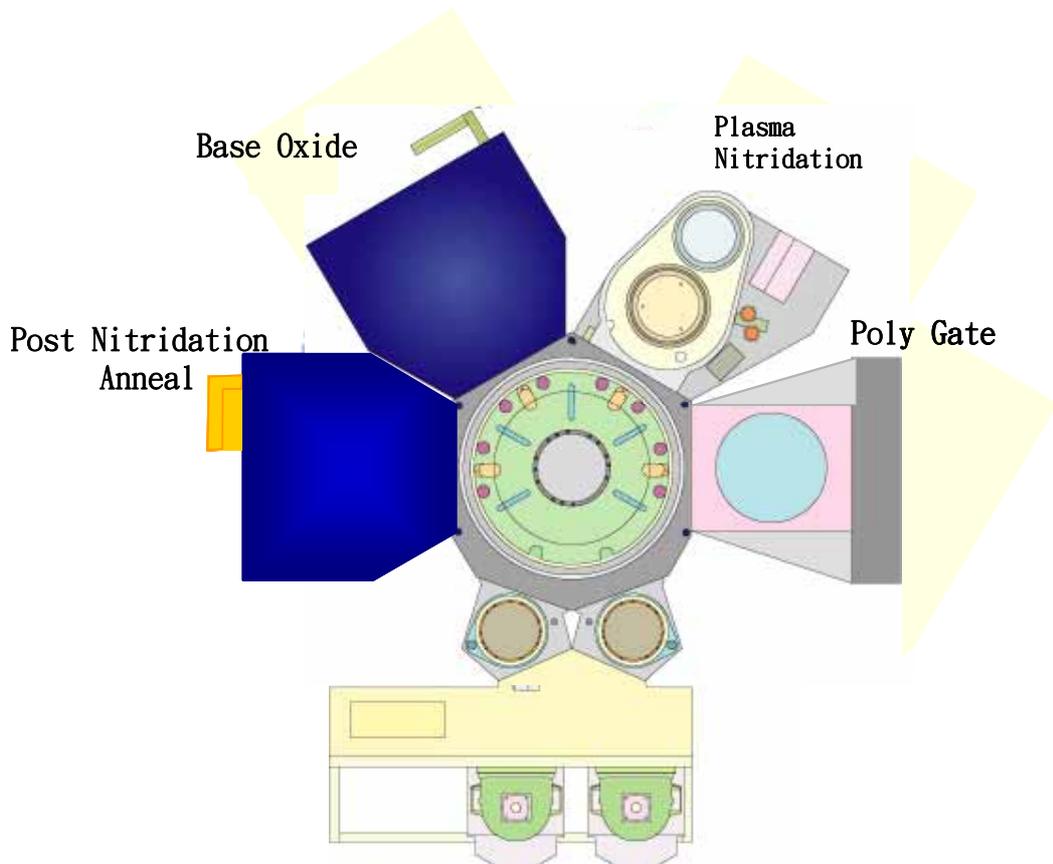


圖 1-1 電漿氮化閘極製程設備

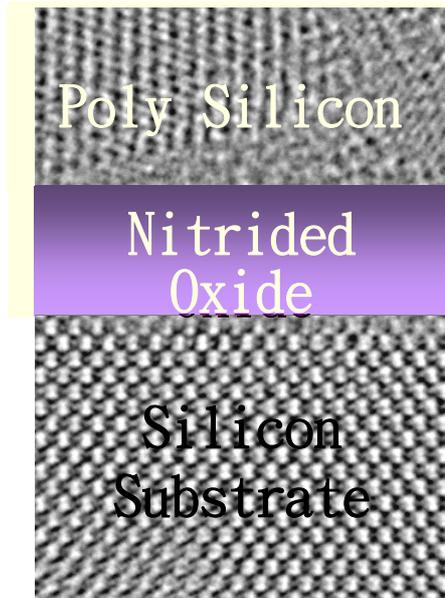


圖 1-2 閘極堆疊示意圖

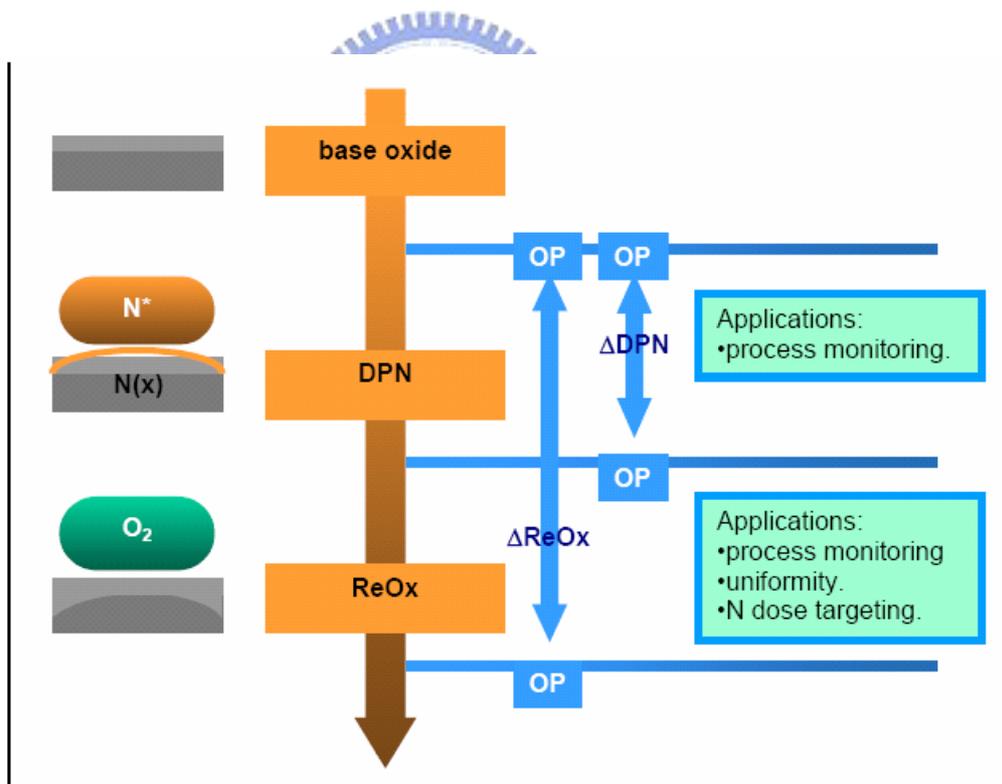


圖 1-3 傳統再氧化製程方法

第二章、理論與文獻

2.1 電漿

2.1.1 電漿特性

電漿的產生是靠著電子在電場中加速獲得極高的動能，當碰撞到氣體分子或原子時將能量傳遞過去。因為電子遠較氣體分子或原子小，所以碰撞造成的結果不是增加氣體的動能，而是提高其位能。從原子的角度來看，位能的提高造成原子內電子的遷移，如果達到足夠的能量甚至會跳離原子，產生一個離子和一個電子，這是一個如下式的解離反應。



產生的兩個電子再經電場加速到足夠的動能進行下一次的解離，於是由一個電子產生兩個，兩個到四個，如此以等比級數增加，最後造成全面性的崩潰放電。電子動能的累積牽涉到電場的大小及碰撞的頻率如式 2-2。

電子的最高動能 = 電場對電子作功的累積

$$= F \times d (\text{作用力} \times \text{距離})$$

$$= q \cdot \varepsilon \cdot \lambda \text{ [式 2-2]}$$

q ：粒子的帶電量

ε ：代表電場大小

λ ：是粒子的平均自由徑

碰撞頻率越高代表其行走的距離越短，平均兩次碰撞間行走的距離定義

為平均自由徑，所以在相同的電場下平均自由徑與碰撞頻率呈反比。從式 2-2 來看，因為電子的帶電量 q 是固定的，所以要提高電子的最高動能要從增加電場及增加平均自由徑著手。所以，一般電漿操作的環境在高電壓和低氣壓下。

當離子數目到達一定量後，與電子碰撞的機率增加，一部份的離子與電子將再度結合，一部份的離子及電子會消失在與反應腔壁的碰撞。電子-離子對產生的速率與消失的速率最後會相等，造成一種動態平衡。在穩定狀態的電漿中，電子-離子對濃度為一定值，這種穩定的電子-離子對數目（濃度）與原來氣體數目的比值定義為離子化程度（degree of ionization）。不同放電方式其離子化程度也不同，由小於 0.1% 到 100% 都有，視放電形式及操作條件而異[18]。



2.1.2 電感耦合式電漿源 (Inductively-Coupled Plasma, ICP)

本論文以電感耦合式電漿來作為電漿源，電感耦合式電漿為一結構簡單而應用廣泛之電漿源。ICP 之電漿產生與維持，為利用電磁感應產生之電場，加熱電漿電子，以應游離反應所需。而電磁感應所需之交流磁場，是由金屬導線上通交流電流所產生。導線通常繞成柱狀 (column, solenoid) 或平面型 (planar) 之線圈 (coil)，而交流時變電流之頻率多在數十 kHz 至數百 MHz 範圍。圖 2-1 為平面型 ICP 結構 (剖面) 示意簡圖，其中線圈置於真空介電窗 (dielectric window，通常為石英或陶瓷) 外，流經線圈之

RF 電流，產生環繞電流方向的時變磁場 (B)，此磁場穿透介電窗，於電漿腔中感應產生一與 RF 電流反向之電場 (E)，此電場加速電子並感應形成電漿電流。由於此電磁感應機制與變壓器原理相同，其中線圈為變壓器之一次側 (primary)，而電漿則視為二次側 (secondary)。因此，ICP 又稱為變壓器耦合式電漿 (Transformer Coupled Plasma, TCP)。

常見的電感耦合式電漿源若依感應線圈形狀的設計，可分為螺旋狀電感式電漿源 (Helical ICP) 與平面型電感式電漿源 (Spiral planar ICP)。螺旋狀電感式電漿源中，螺旋形感應線圈圍繞在管狀介電真空腔外圍，其感應射頻電場在管壁附近最大，朝中心以指數型式下降，因此不易達成大面積均勻電漿。但在化學光譜分析、化學合成、長晶及廢棄物處理等方面，因無大面積均勻度之要求，仍有甚廣之應用。在半導體製程應用上，較常採用平面型電感式電漿源 (如圖 2-2 所示)，其中平面型螺旋線圈 (Spiral coil) 置於平面真空介電窗上，此設計可利用調變線圈之分佈或與真空窗之距離，使晶圓表面的電漿分佈均勻，符合現代積體電路製造大面積晶圓製程之需求[18][19]。

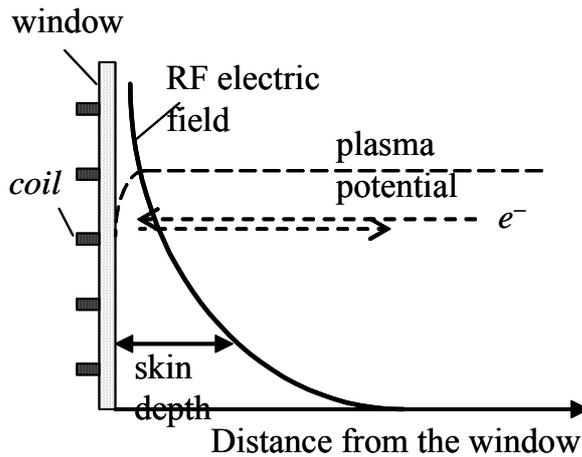


圖 2-1 電感式電漿源非碰撞加熱機制示意圖[19]

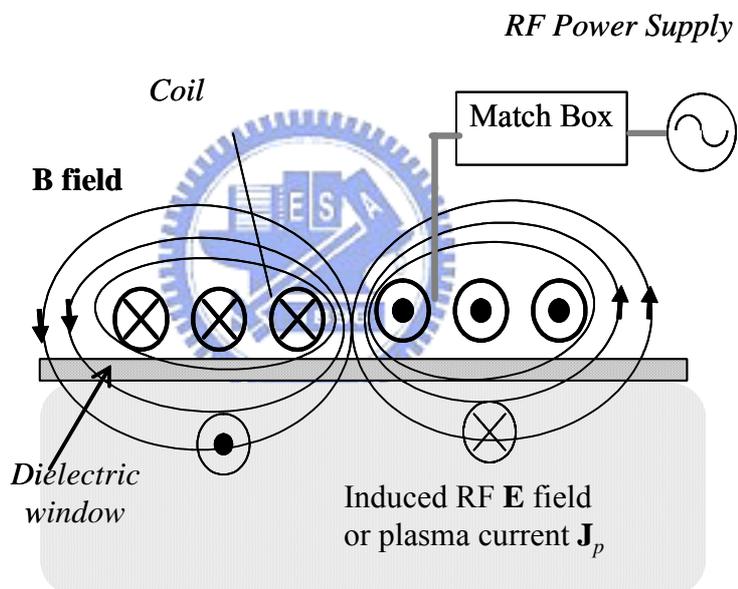


圖 2-2 平面型 ICP 結構示意簡圖[19]

2.2 輝光放電光放射光譜 (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, GDOES)

電漿的輝光是由於位能提高時能量剛好使的原子內層電子躍遷至外層軌道，於是形成一個激發狀態的原子，這種激發狀態極不穩定，很容易回

復到基態然後放出光子。

對一個低氣壓的反應器內氣體施加一個外部電場，其電壓對電場的關係如圖 2-3 所示。

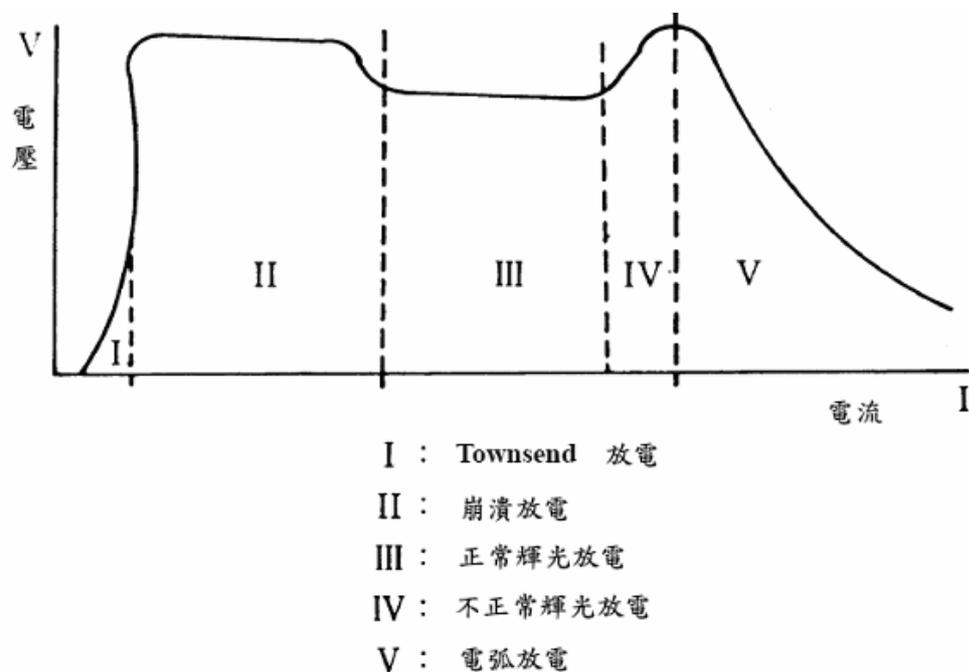


圖 2-3 低壓電漿反應器內電壓電流關係[20]

電壓由零開始增加，已可偵測到飽和電流，這是因為宇宙中充斥著一種高能的 γ -Ray，在地球上大氣層的保護下只允許極少部份的 γ -Ray 進入，此少數的 γ -Ray 可造成氣體的部份解離，所以小電壓即產生小的飽和電流，這個區域叫 Townsend Discharge。電壓繼續增加到約 600V，利用上述 γ -Ray 產生的電子在電場中被加速，對原子或分子碰撞解離，電子大量增加造成前面提到的崩潰解離，這區域叫 Avalanche Discharge。並需藉特殊的電源供應器維持住電漿，此時進入正常輝光放電 (Normal Glow Discharge)。

我們可以將電漿想像成河流，電流密度是水平面，當開出一條往下遊走的通道後，所有水都會沿著這條通道走，流量固定時液面是等高度的，當流量增加後才慢慢往兩邊拓寬，維持液面等高。電漿此時會保持電極板上的電流密度固定（所以電壓固定），而電流增加是來自於放電面積的增加。這個區域電漿有集中的現象。當放電面積擴大到整個電極板時，要提高電流則需再提高電壓而進入異常輝光放電（Abnormal Glow Discharge）的區域。一般製程都操作在此區域，因為此區域放電面積最大、電漿均勻，且電壓電流的關係接近線性，易於控制，所以電漿也有人稱呼為輝光放電（Glow Discharge）。



再繼續增加電流密度，陰極溫度提高，當足以發射熱電子（Thermal Emission Electron）時，電流提高。這是一個惡性循環，當電流提高造成陰極溫度上昇而發射熱電子，再造成電流的提高增加陰極溫度，維持的電壓反而下降；所以這個區域呈現負電阻的現象。此區域叫電弧放電（Arc Discharge）。

輝光放電光學放射光譜分析便是利用偵測電漿於輝光放電效應中某種光線強度的變化來達到分析成份的目的。此種光線的激發，乃由於電漿中的原子或分子被電子激發到某個激發態，在返回到另一個狀態的同時，所伴隨發出的光線。不同的原子或分子所激發出的光線波長不同，光線強度的變化則反應了電漿中相對應的原子或分子濃度的變化[17][18][19]。

2.3 光電效應

由輝光效應產生之光放射光譜需要轉換成可量化分析之電子訊號，再由電腦讀取，所以針對此實驗所牽涉之光電效應作一介紹。如圖 2-4，物質吸收光子並激發出自由電子的行為稱為光電效應。在以愛因斯坦方式量化分析光電效應時使用以下算式：

光子能量 = 移出一個電子所需的能量 + 被發射的電子的動能[20]

代數形式如式 2-2。

$$hf = \phi + \frac{1}{2}mV_m^2 \text{ 式}[2-2]$$

h ：普朗克常數

f ：入射光子的頻率

ϕ ：功函數

$\frac{1}{2}mV_m^2$ ：被射出的電子的最大動能

m ：被發射電子的靜止質量

V_m ：是被發射電子的速度

就一般而言，光電效應通常是指金屬表面在光輻照作用下發射電子的效應，發射出來的電子叫做光電子[21]。光波長小於某一臨界值時方能發射電子，即極限頻率和極限波長。臨界值取決於金屬材料，而發射電子的能量取決於光的波長而與光強度無關，這一點無法用光的波動性解釋。還有一點與光的波動性相矛盾，即光電效應的瞬時性，按波動性理論，如果入射光

較弱，照射的時間要長一些，金屬中的電子才能積累住足夠的能量，飛出金屬表面。可事實是，只要光的頻率高與金屬的極限頻率，光的亮度無論強弱，光子的產生都幾乎是瞬時的，不超過十的負九次方。正確的解釋是光必定是由與波長有關的嚴格規定的能量單位(即光子或光量子)所組成。這種解釋為愛因斯坦所提出。光電效應由德國物理學家赫茲於 1887 年發現。

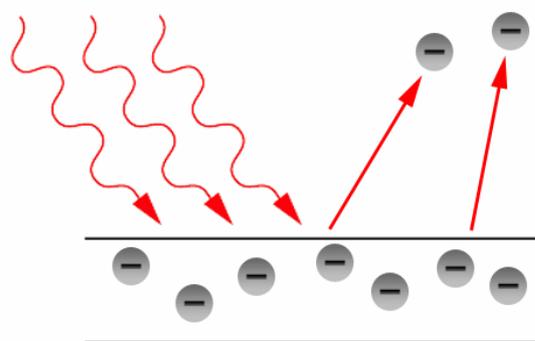


圖 2-4 光子與電子轉換示意圖[22]

2.4 光電倍增管

如圖 2-5 所示，光電倍增管是依據光電子發射、二次電子發射和電子光學的原理製成的[22][23]。光陰極在光子作用下發射電子，這些電子被外電場(或磁場)加速，聚焦於第一次極。這些衝擊次極的電子能使次極釋放更多的電子，它們再被聚焦在第二次極。這樣，一般經十次以上倍增，放大倍數可達到 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10}$ 。最後，在高電位的陽極收集到放大的光電流；輸出電流和入射光子數成正比，而整個過程時間約 10^{-8} 秒[22]。

光電倍增管是一種具有高靈敏度與超快響應時間的光探測元件，在一般

典型的光電倍增管中，在其響應範圍最佳的近紅外光區到紫外光區，可以將只有數百個光子的光訊號轉換為有用的脈衝電流，進而利用此脈衝電流來做訊號的分析。

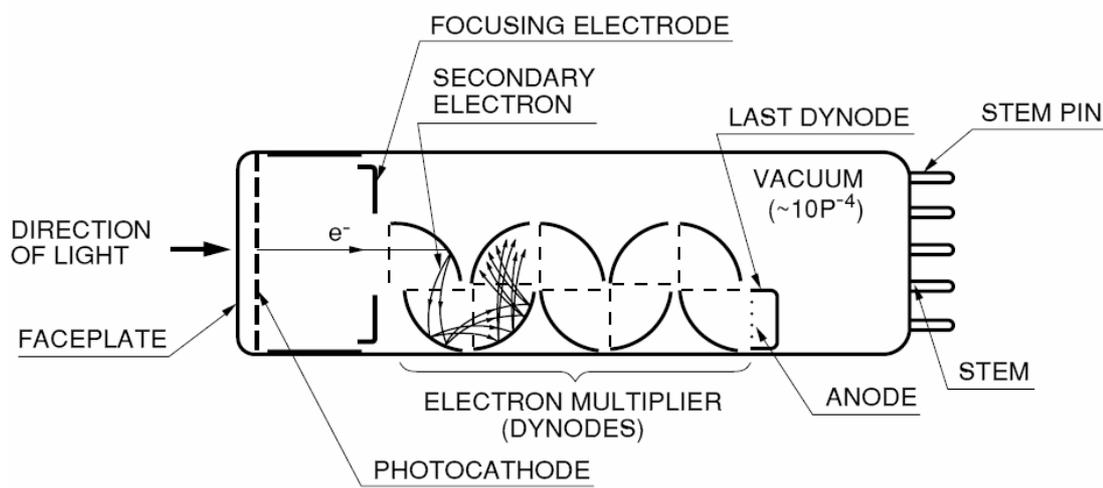


圖 2-5 光電倍增管光電轉換與電子碰撞示意圖[22]

2.5 電漿氮化製程

為了達到元件的性能目標，閘極氧化層厚度的調整非常關鍵，但被調整的介電層首先必須滿足漏電和可靠性要求。在閘極氧化層中添加氮物質是防止從多晶矽閘極到矽基板硼穿透的先決條件。介質中的氮物質還能用來降低閘極漏電流。透過採用 DPN 技術和快速升溫製程熱處理製程，氮氧化矽薄膜製作製程已經成功地被應用於 90 奈米以下製程元件的製造，所製成的等效氧化層厚度更可達到 1.2-1.6 nm[24]。

由於生產過程各製程步驟和超薄閘極介電質上吸附的污染物之間的等候時間對最終等效氧化層厚度的影響達到 0.1 nm 以上，所以此製程一般皆於集束型設備中完成以避免元件效能因汙染而降低。

第三章、實驗方法

3.1 相關實驗儀器與原理

3.1.1 氮濃度的量測

氮在二氧化矽中的濃度是以 X-光光電子能譜 (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 所測得，設備如圖 3-1 所示的。試片受 X 光照射後內部電子吸收光能而脫離待測物表面 (光電子)，透過電子能量的分析可了解待測物組成，圖 3-2 為 X-光光電子能譜對晶圓產生光電子的示意圖。



圖 3-1 X-光光電子能譜儀 (Revera-RVX 1000)

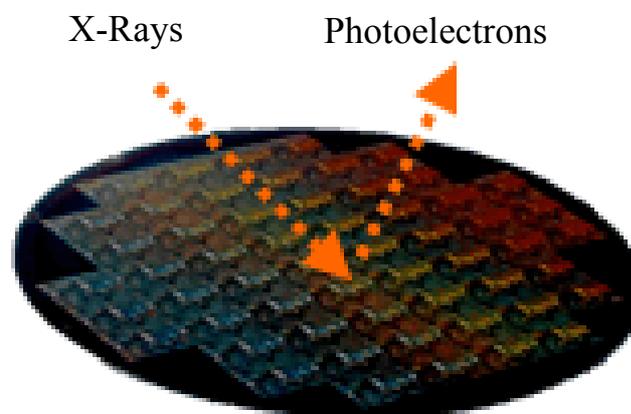


圖 3-2 X-光光電子能譜儀對晶圓產生光電子示意圖

3.1.2 膜厚度量測

基底氧化層、後氮化回火和多晶矽閘極的厚度是以橢圓儀量測，設備如圖 3-3 所示。

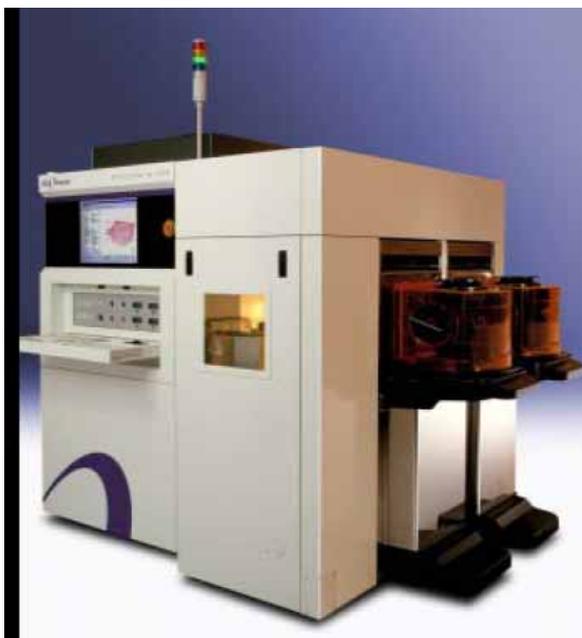


圖 3-3 橢圓儀 (KLA-Tencor SFX-100)

3.1.3 電漿氮化閘極製程設備

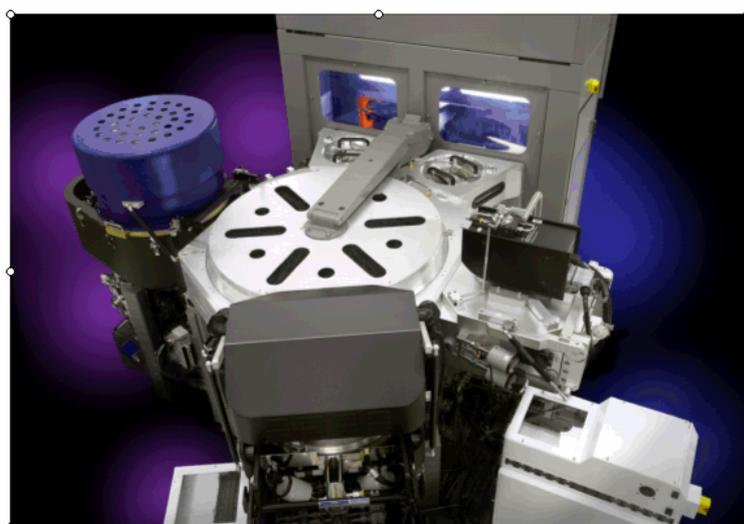


圖 3-4 集束型閘極堆疊設備 (Applied Materials Centura 4.0)

電漿氮化製程是在美商應用材料 Centura Integrated Gate tool 的集束型設備中完成。一個完整的閘極堆疊集束型製程程序包含四個主要步驟：

1. 成長基底氧化層 (base oxide)
2. 電漿氮化製程 (plasma nitridation)
3. 後氮化回火 (post nitridation anneal)
4. 多晶矽閘極 (poly gate)

圖 3-4 與表 3-1 個別表示完整的閘極堆疊集束型製程程序與製程條件

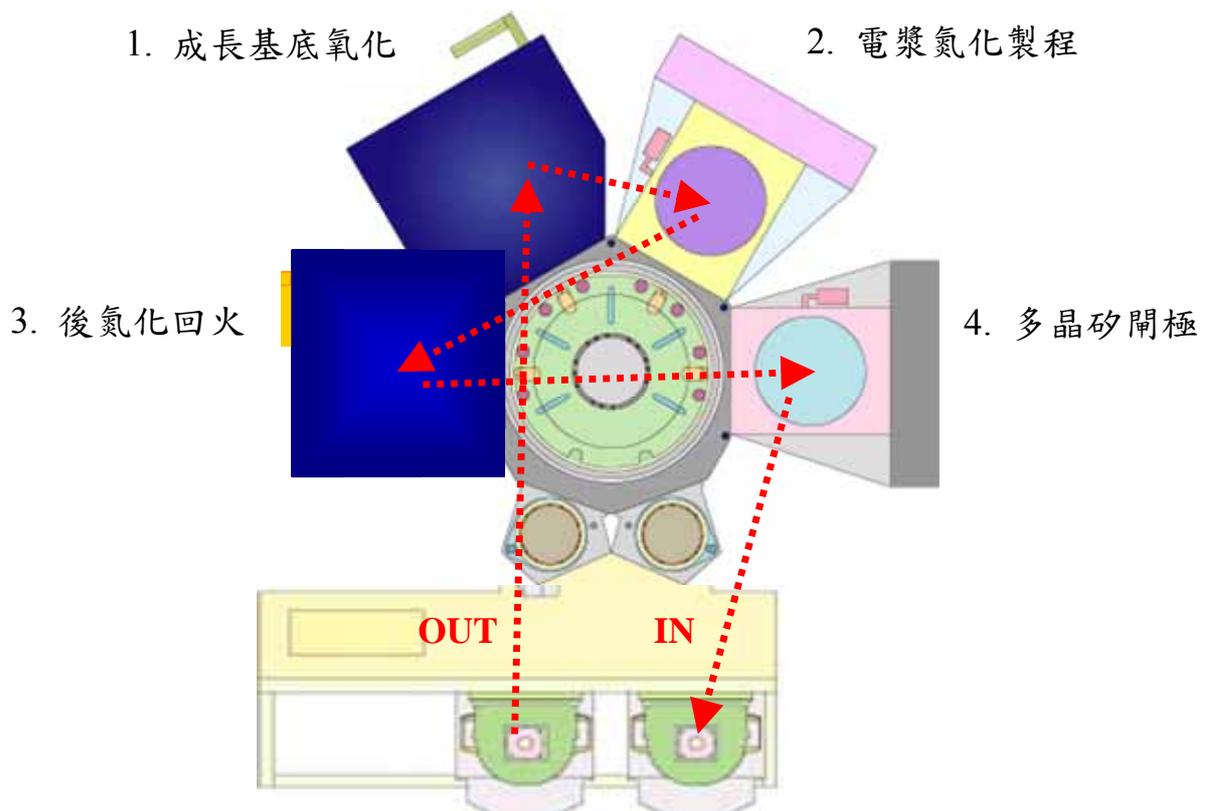


圖3-5 電漿氮化集束型製程流程示意圖

表3-1 集束型閘極堆疊各製程程序與條件

反應室	溫度/功率 (°C/Watt)	壓力 (mTorr)	時間 (s)	流量 (sccm)	膜厚 (Angstrom)
1. 基底氧化層	900	20,000	15	O ₂ =10,000	12.5
2. 電漿氮化	500	10	35	N ₂ =300	N/A
3. 後氮化回火	1000	0.5	45	N ₂ =20,000 O ₂ =5,000	16
4. 多晶矽閘極	720	275,000	60	SiH ₄ = 40	1,000

3.1.3.1 基底氧化層的成長

矽晶圓在反應室中，通入氧氣後加熱，使表面單晶矽與氧作用產生二氧化矽，圖 3-6 為此反應的鍵結示意圖。

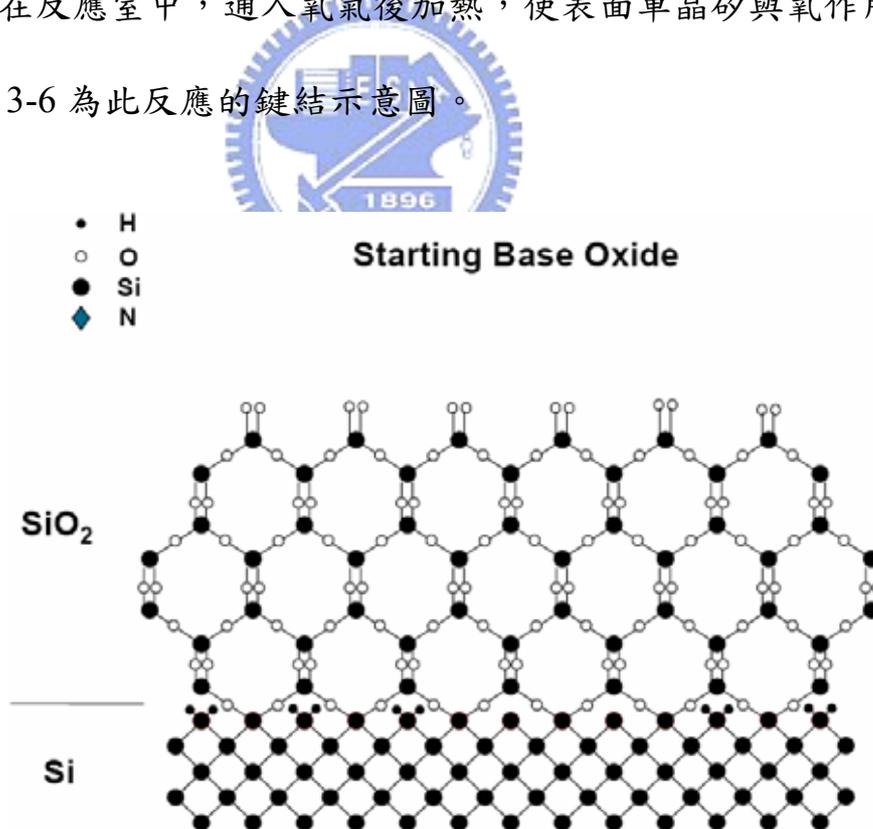


圖 3-6 基底氧化層鍵結示意圖[32]

3.1.3.2 電漿氮化製程

將已成長的二氧化矽薄膜晶圓送進 DPN 反應腔中，導入氮氣而解離產生氮離子，此高活性氮離子將取代部分氧原子而形成氮氧化矽，圖 3-7 為 DPN 反應後的鍵結示意圖。

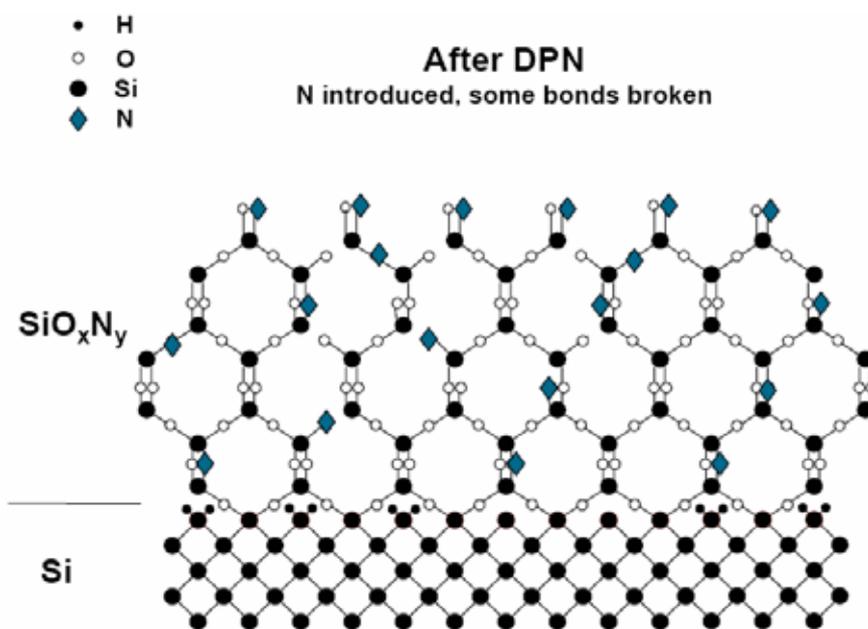


圖 3-7 電漿氮化製程鍵結示意圖[32]

3.1.3.3 後氮化回火製程

由於氮離子在電漿環境中帶有能量的離子會因為撞擊而破壞部分原有的矽氧鍵結而產生懸浮鍵(dangling bond)，於是必須要有一道回火製程來修復這些缺陷。後氮化回火製程包含兩個步驟：(一) 先通入氮氣後加熱大於 975°C 來修復懸浮的矽氮鍵結，(二) 再導入氧氣修復矽晶圓與氮氧化矽介面空缺 (vacancy) 鍵結的缺陷。圖 3-8 與圖 3-9 個別表示懸浮鍵結與介面的空缺如何透過後氮化回火製程來修復。

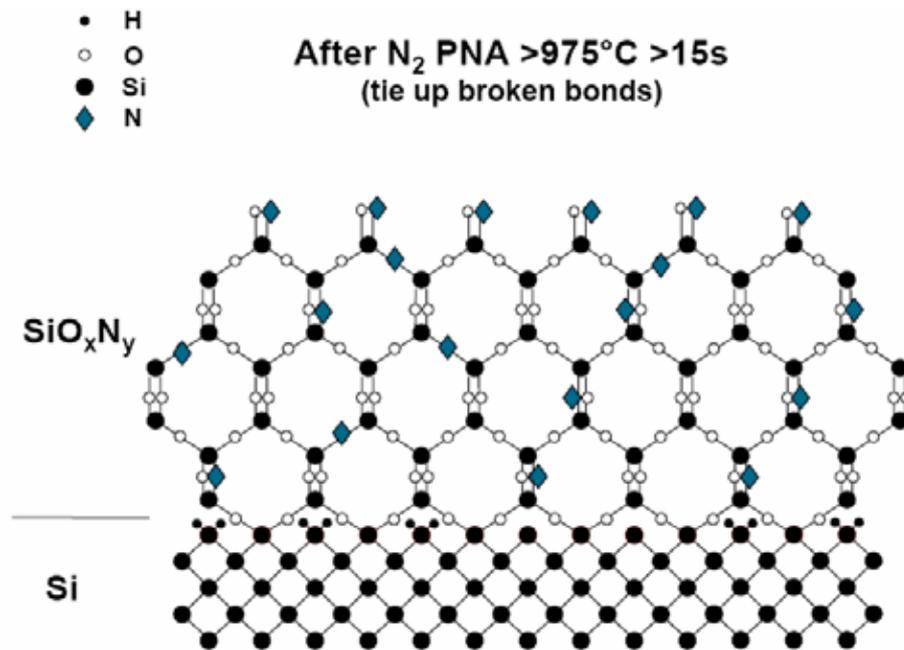


圖 3-8 後氮化回火製程修復懸浮鍵結示意圖[32]

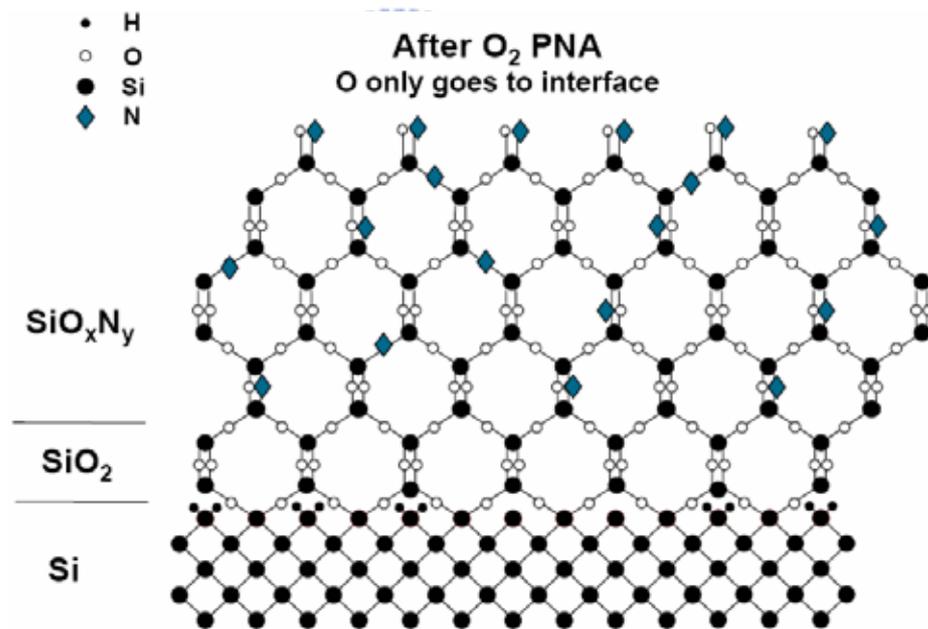


圖 3-9 後氮化回火製程修復介面空缺鍵結的示意圖[32]

3.1.4 電性量測

晶圓上元件的電性參數測試 (Wafer Acceptance Test, WAT) 是以安捷倫半導體參數分析儀量測，設備如圖 3-10 所示。



圖 3-10 半導體參數分析儀 (Agilent 4070)

圖 3-11 為電晶體電性參數示意圖，其中對閘極而言可以直接量測的關鍵電性參數為：

1. 閘極的漏電流 (Gate Leakage, J_g)
2. 等效氧化層厚度 (Equivalent Oxide Thickness, EOT)
3. 臨界電壓 (Threshold Voltage, V_t)
4. 汲極飽和驅動電流 (drain current in saturation, I_{dsat})

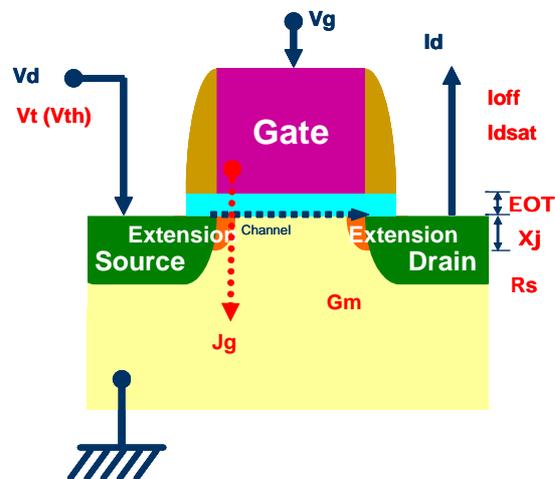


圖 3-11 電晶體電性參數示意圖

3.1.4.1 閘極漏電流

由於持續縮小的元件尺寸已經導致非常薄的閘極氧化層，原本用來絕緣的閘極介電層由於直接穿隧（direct tunneling）效應，閘極氧化層已不能被視為一種理想的電極絕緣層了。閘極電流因此可以直接穿隧到通道而形成漏電流，這影響了電路功能，並增加了待機時的功率消耗，記憶體元件的資料流失等等，這些都會嚴重的影響到我們所想要的元件特性。

3.1.4.2 等效氧化層厚度

由於電晶體開關的切換時間與閘極電壓成正比與汲極飽和驅動電流成反比如式 3-1。


$$\text{電晶體開關的切換時間} \propto V_g / I_{dsat} \quad \text{式(3-1)}$$

V_g : 閘極的漏電流

I_{dsat} : 汲極飽和驅動電流

所以要有較快的電晶體速度需要較大的飽和驅動電流。從式 3-2 至 3-4 得知，飽和驅動電流又與閘極介電層厚度成反比；換言之，較薄的閘極介電層厚度有較快的電晶體速度。

$$I_{dsat} \propto C_{ox} \quad \text{式(3-2)}$$

$$C_{ox} = \epsilon_0 K A / t \quad \text{式(3-3)}$$

$$I_{dsat} \propto 1/t \quad \text{式(3-4)}$$

C_{ox} : 氧化層電容

ϵ_0 : 空氣中的電容率

κ ：介電常數

A：表面積

t：介電厚度

3.1.4.3 臨界電壓

積體電路由電晶體及連線 (inter-connection) 組合而成，其中訊號傳遞由連線來完成，而電晶體在數位電路中則主要作為開關 (switch) 使用。作為開關的電晶體主要是透過閘極電壓進行控制，而控制的方式則是如圖 3-11 所示，依閘極與源極的電位差來作決定。對於一個加強型 (enhancement mode) 的 NMOS (PMOS) 元件而言，它的開關電壓為正值 (負值)，稱為臨界電壓。臨界電壓的推導計算非常複雜，受到製程參數及偏壓影響甚大。在早期的製程中，NMOS 元件 (PMOS 元件) 的臨界電壓約在 0.8V 到 1.0V (-1.0V 到 -0.8V)。

MOSFET 的臨界電壓主要由閘極與通道材料的功函數 (work function) 之間的差異來決定，而因為多晶矽本質上是半導體，所以可以藉由摻雜不同極性的雜質來改變其功函數。更重要的是，因為多晶矽和底下作為通道的矽之間能隙 (bandgap) 相同，因此在降低 PMOS 或是 NMOS 的臨界電壓時可以藉由直接調整多晶矽的功函數來達成需求。反過來說，金屬材料的功函數並不像半導體那麼易於改變，如此一來要降低 MOSFET 的臨界電壓就變得比較困難。而且如果想要同時降低 PMOS 和 NMOS 的臨界電壓，將需要兩種不同的金屬分別做其閘極材料，對於製程又是一個很大的變數。

3.1.4.4 汲極飽和電流

飽和區電流—電壓關係如式 3-5 所示與閘極的幾何 (geometry)、載子遷移率 (carrier mobility)、閘極電壓與臨界電壓有關。

$$I_{dsat} = \frac{W}{L} C_{ox} \mu (V_g - V_t)^2 \quad \text{式(3-5)}$$

W ：閘極寬度

L ：閘極長度

C_{ox} ：氧化層電容

μ ：遷移率

V_g ：閘極電壓

V_t ：閘極臨界電壓

3.2 MOSFET 晶圓試片的製作

為電性量測所需的試片主要由以下幾個步驟來製作：

1. 晶圓清洗
2. 襯墊氧化層 (pad oxide) 成長
3. 氮化矽層成長
4. 淺溝絕緣層 (shallow trench isolation)
5. 井區光罩
6. 離子植入
7. 閘極介電層成長

8. 多晶矽閘極成長
9. 閘極蝕刻
10. 氮化矽間隙層 (spacer) 成長
11. 金屬接觸層的沉積
12. 前金屬介電層沉積
13. 鎢插塞 (Tungsten plug) 蝕刻與沉積
14. 鋁金屬導線沉積與蝕刻

圖3-12表示電性量測所需試片的剖面示意圖。

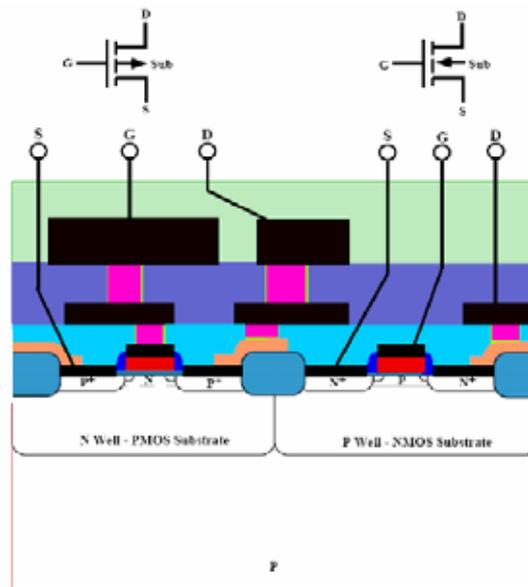


圖 3-12 MOSFET 晶圓製作剖面圖

3.3 實驗流程

如圖 3-13，整個實驗從選定適當的光譜波長開始，再將 OES 總承安裝在製程反應室上。為了確定實驗結果不被前後相關製程與光譜本身的訊號影響，相關製程穩定性也在實驗開始前作確認。接下來進入主要的實驗：

測量試片經過電漿氮化製程反應後氮濃度的值，再比對反應過程中 OES 訊號的大小試圖找出兩者是否有合理的關聯性。最後再延伸前述實驗的結論：應用 OES 來對元件的電性的最佳化。最後歸納整個實驗的結果作一結論。

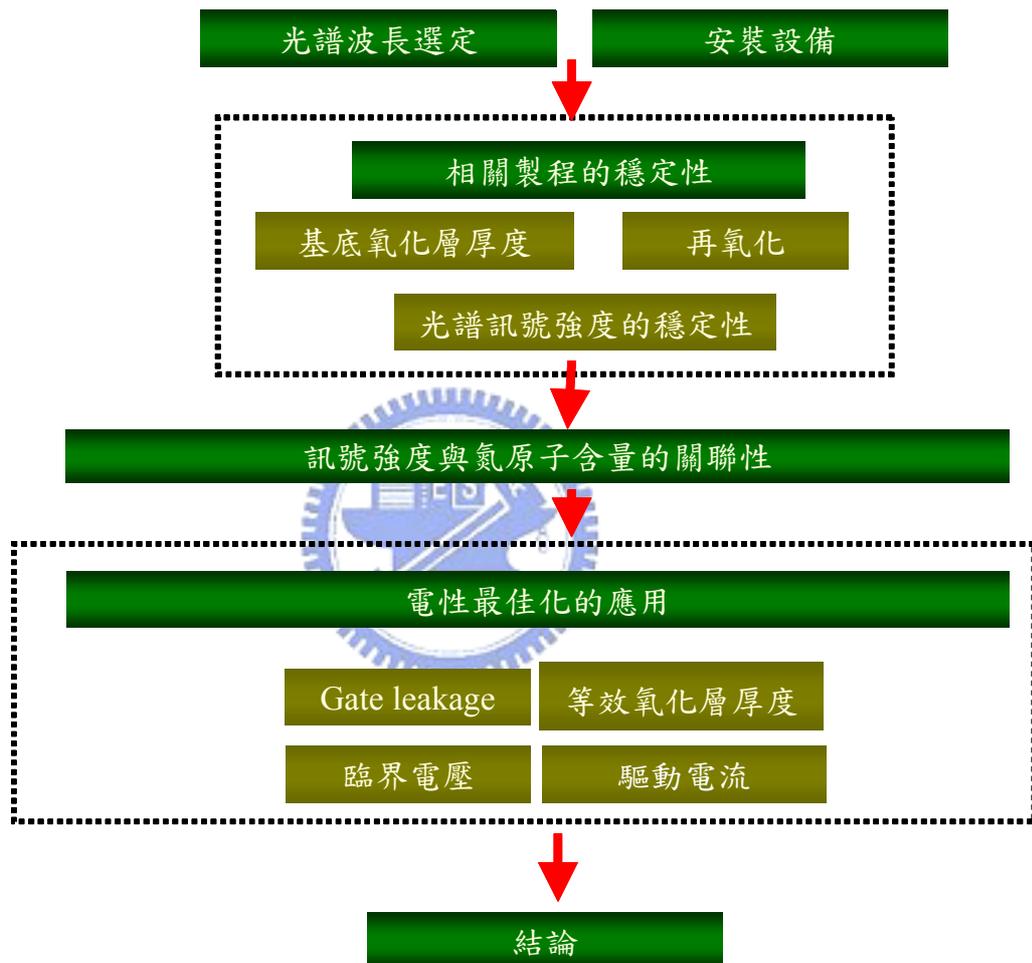


圖 3-13 實驗步驟規劃流程

第四章、結果與討論

4.1 光譜波長選定

以壓力為 10 mt，功率為 500 瓦，氮氣為 300 sccm 和時間為 35 秒的標準製程條件下，從 250 nm 到 650 nm 的全光譜掃描圖譜中選出光譜訊號較強之波長，再以波段穿越濾光鏡 (Band pass filter) 過濾出這些特定波長，再試著以 OES 在前述標準製程條件下訊號強度與氮濃度作相關性分析。圖 4-1 所示為此製程從波長 250 nm 到 850 nm 全波段的圖譜。表 4-1 為選定的光譜波長。

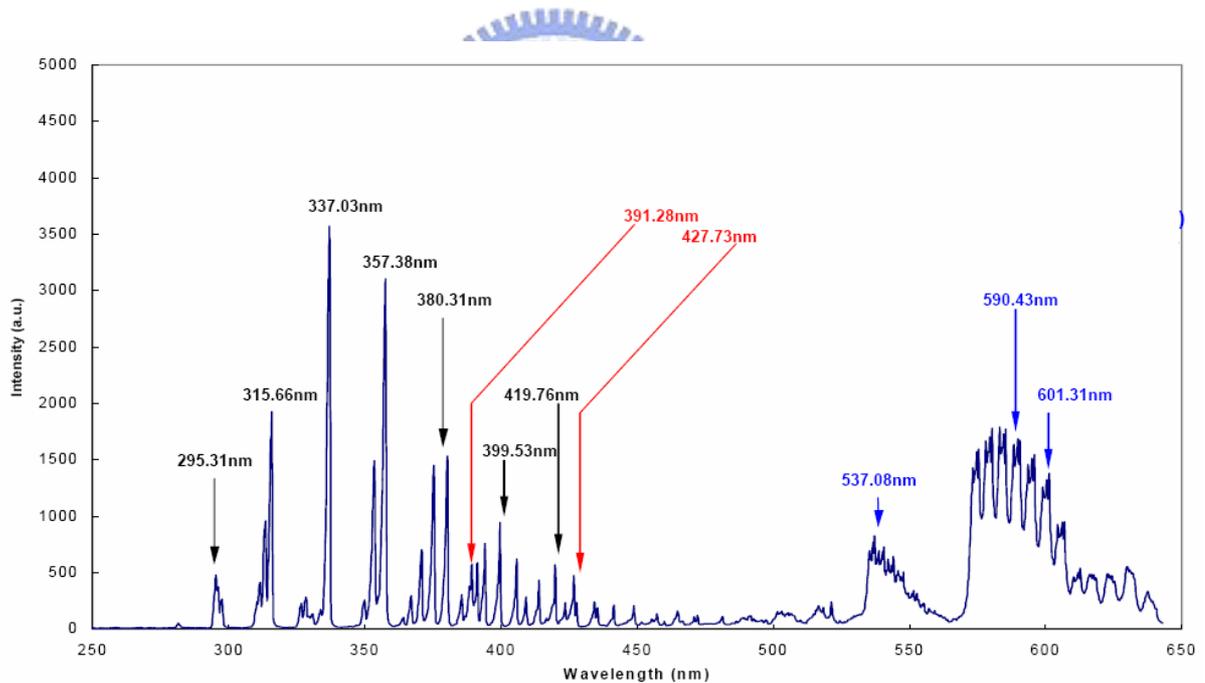


圖 4-1 標準製程下高解析度全波段光譜圖

表 4-1 光譜波長的選定表

Channel #	Wavelength (nm)	Species
1	337.03	Nitrogen Radical
2	357.38	Nitrogen Radical
3	391.28	Nitrogen Ion
4	590.43	Nitrogen Radical
5	601.31	Nitrogen Radical

4.2 實驗設備安裝

如圖 4-2 所示將光纖安裝在製程反應室的側壁上，用以收集電漿放射輝光，在經過波段穿越濾光鏡篩選出特定波長後經由 OES 總承，作能量與電子訊號轉換。經由電腦讀取後，以此作為實驗上量化的數據。

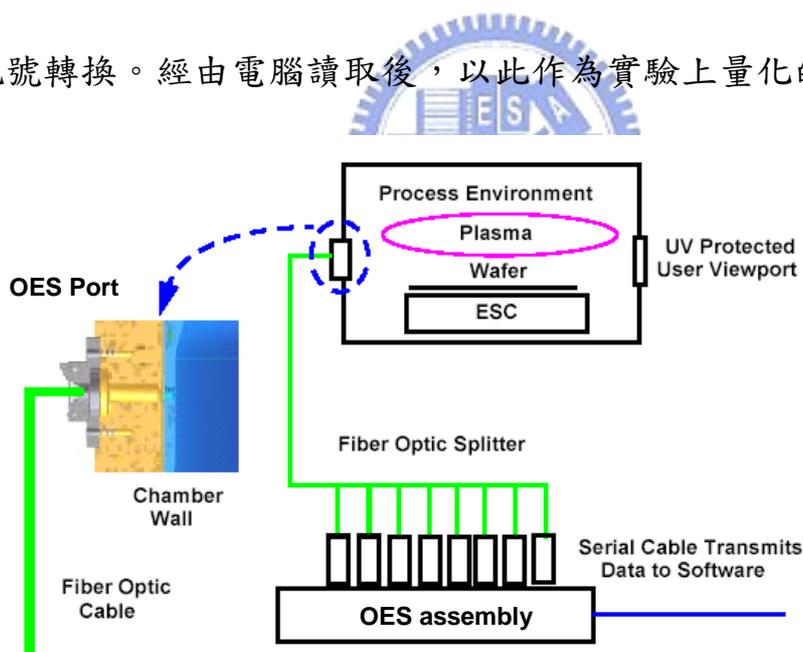


圖 4-2 系統安裝示意圖

4.3 相關製程之穩定性

由於集束型設備之故，此一整合製程除電漿氮化製程為主要研究標地外

還包含了基底氧化層、成長後氮化回火製程和多晶矽閘極沉積製程，為確保實驗結果不被前後製程所影響，前後製程的厚度重複性必須在實驗前作確認。表 4-2 與表 4-3 分別為電漿氮化集束型設備前後相關製程的條件與製程結果的重複性，實驗結果顯示三個製程在晶圓與晶圓（Wafer to Wafer, WtW）的不均勻性（Non-Uniformity, NU）皆能達到小於 1% 的標準差百分比。

表 4-2、電漿氮化集束型設備前後相關製程的條件

反應室	溫度/功率 (°C/Watt)	壓力 (mTorr)	時間 (s)	流量 (sccm)	標準膜厚 (Angstrom)
基底氧化層	900	20,000	15	O ₂ =10,000	12.5
後氮化回火	1000	0.5	45	N ₂ =20,000 O ₂ =5,000	16
多晶矽閘極	720	275	60	SiH ₄ = 40	1,000

表 4-3 電漿氮化集束型設備前後相關製程的厚度穩定性

Slot	基底氧化層		後氮化回火		多晶矽閘極	
	膜厚(Angstrom)	NU 1σ%	膜厚 (Angstrom)	NU 1σ%	膜厚 (Angstrom)	NU1σ%
1	12.62	0.23	16.04	0.34	1007	0.76
2	12.82	0.18	16.03	0.25	998	0.97
12	12.71	0.22	16.22	0.45	1002	0.91
13	12.64	0.25	16.18	0.48	1001	0.88
24	12.78	0.23	16.16	0.28	989	0.71
25	12.63	0.32	16.05	0.24	993	0.84
WtW U%	0.70%	N/A	0.84%	N/A	0.65%	N/A

4.4 光譜訊號強度的穩定性

光譜訊號為此實驗在對電漿氮化製程作判讀與量化的指標，所以訊號本身的穩定性與誤差範圍有必要在實驗前作確認。實驗方法是在製程條件不變下連續收集各波長的訊號強度.再以此分析各波長本身訊號的標準差，圖 4-3 表示五個不同波長訊號的穩定性。從表 4-4 的標準差數據得知，各波長在標準製程下皆有小於等於 10 個單位的誤差。

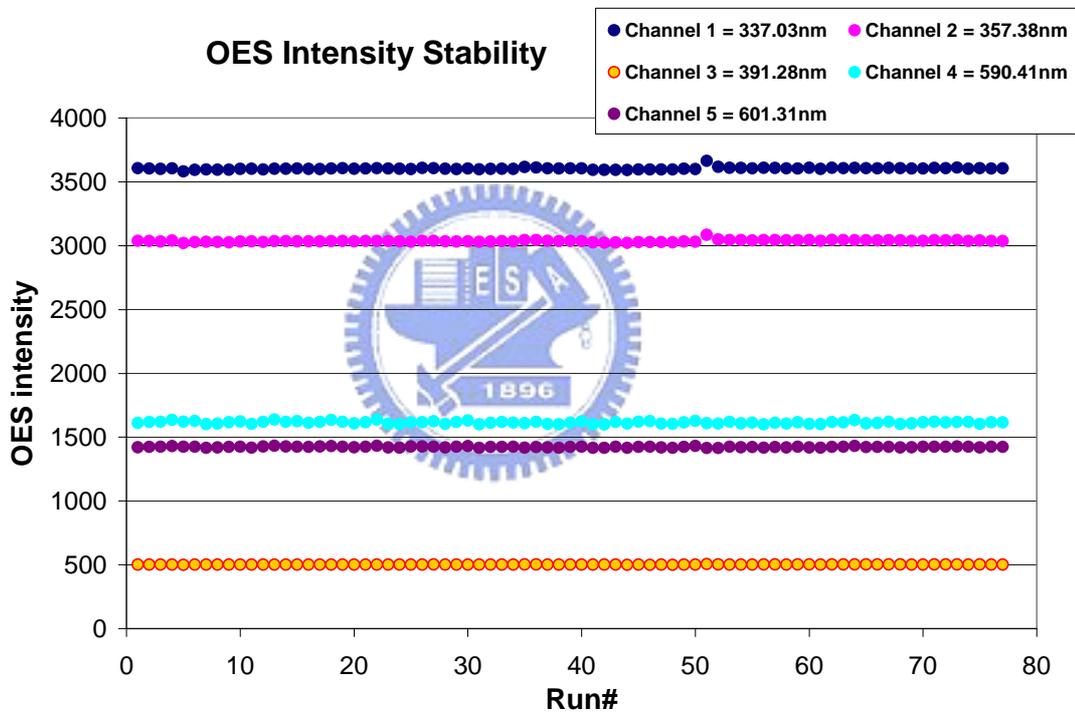


圖 4-3 光譜訊號強度的穩定性

表 4-4、各波長訊號變化的標準差

Channel #	Wavelength (nm)	Standard Deviation
1	337.03	9
2	357.38	8
3	391.28	1
4	590.43	10
5	601.31	4

4.5 光放射光譜與二氧化矽層中氮濃度的相關性

此實驗以 9 個不同的氮濃度樣本與其在電漿氮化閘集製程時各個波長所收集到的 OES 訊號強度作分析，圖 4-4 到 4-8 分別表示各波長之關聯。從表 4-5 對各波長與氮濃度的相關性 (correlation) 與靈敏度 (sensitivity) 所作的比較可知，Channel#1-Channel#3 有大於 0.5 的 Rsquare，Channel#4-Channel#5 的 Rsquare 較差，皆小於 0.4。就靈敏度而言 Channel#1 又有著最高的斜率 214；換言之，單位氮濃度的變化，Channel#1 有最大的 OES 訊號變化。於是得到的結論是，Channel#1 有著對氮濃度最好的關係與最敏感的變化。在接下來的應用上，我們將以此訊號來作為對電性最佳化的指標。

Channel 1 (W.L.=337.03nm)

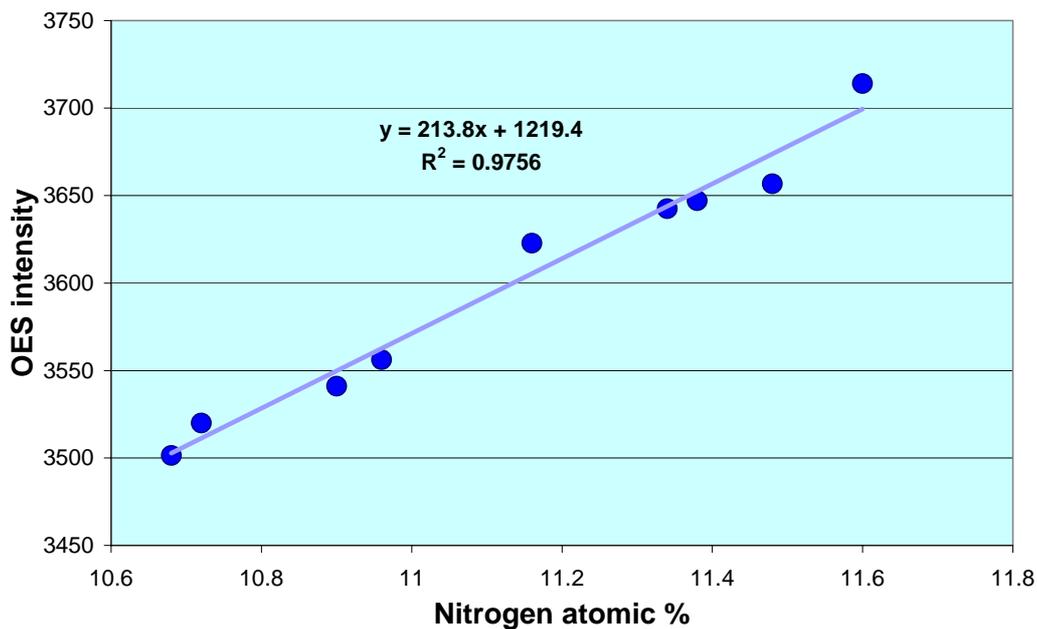


圖 4-4 光放射光譜 Channel#1 與氮濃度的關係

Channel 2 (W.L.=357.38nm)

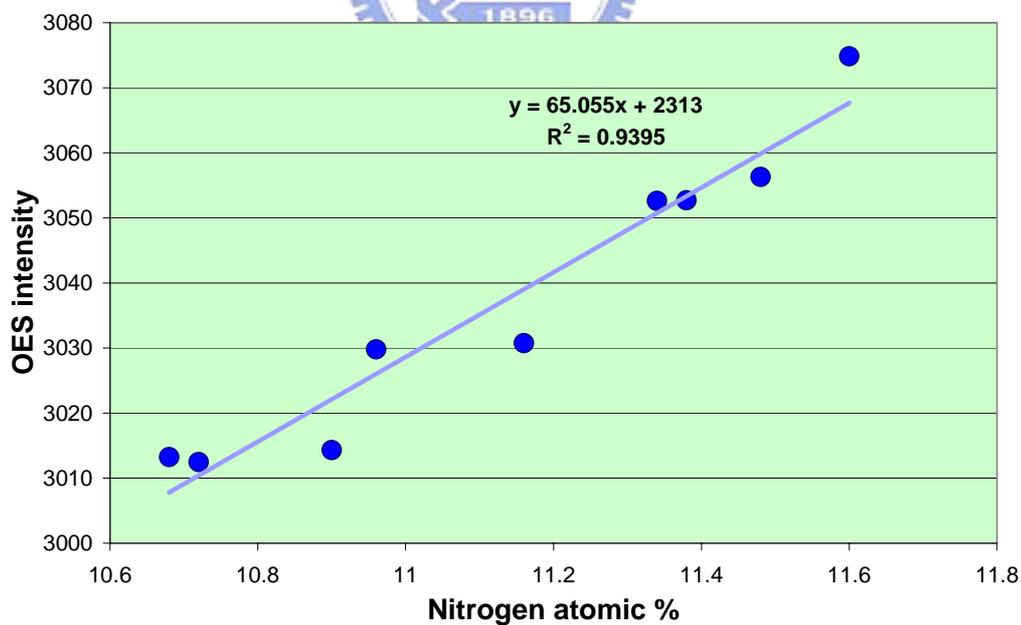


圖 4-5 光放射光譜 Channel#2 與氮濃度的關係

Channel 3 (W.L.=391.28nm)

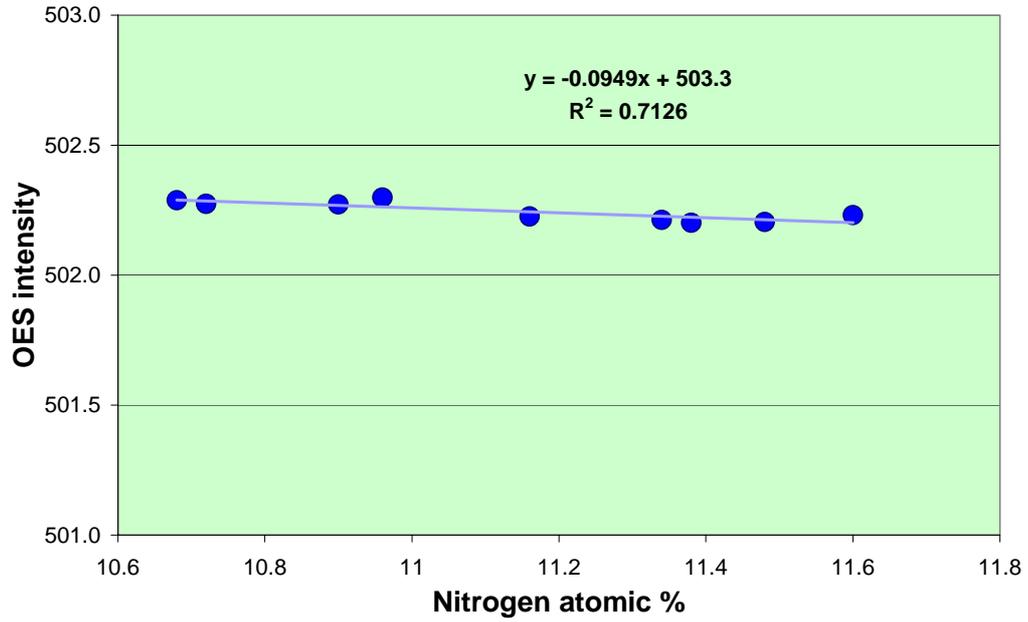


圖 4-6 光放射光譜 Channel#3 與氮濃度的關係

Channel 4 (W.L.=590.43nm)

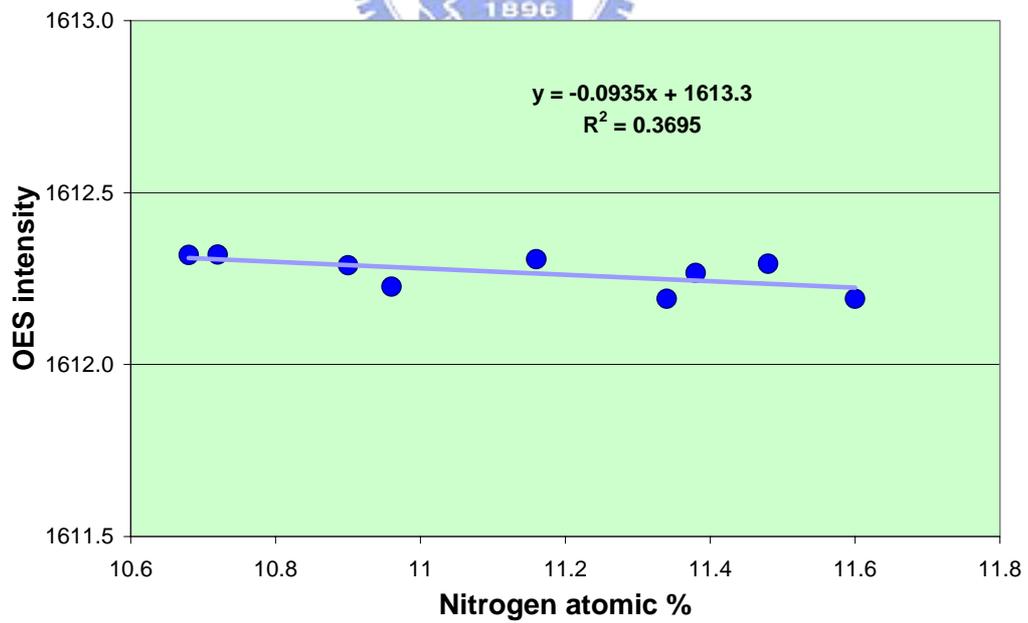


圖 4-7 光放射光譜 Channel#4 與氮濃度的關係

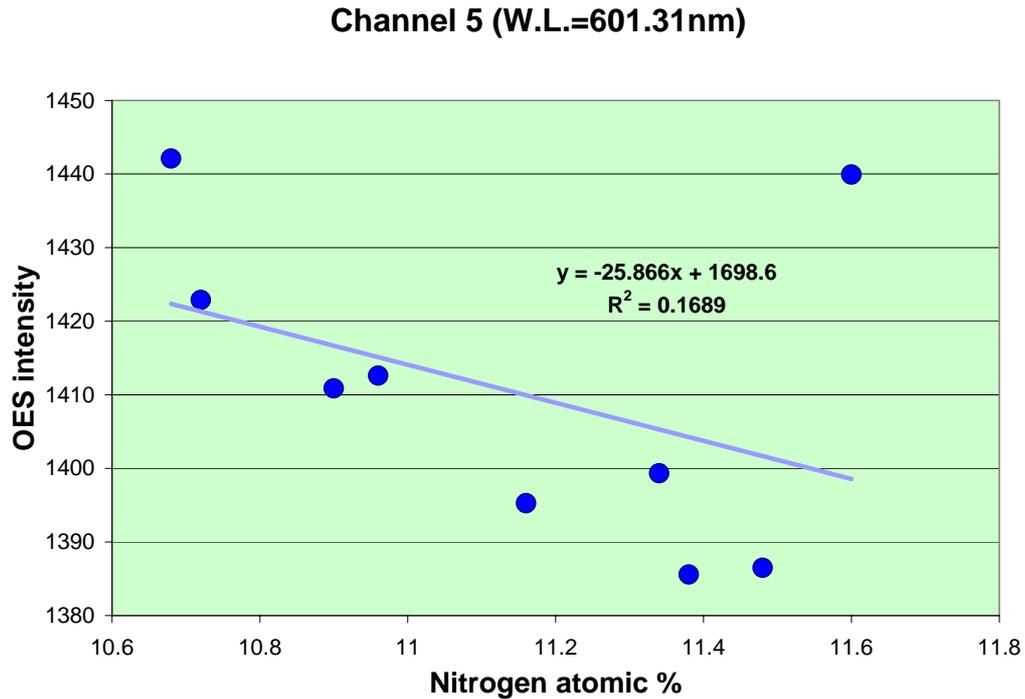


圖 4-8 光放射光譜 Channel#5 與氮濃度的關係

表 4-5 氮濃度與各波長的相關性和靈敏性比較表

Channel#	Wavelength (nm)	Rsquare	Correlation	Slop	Sensitivity
1	337.03	0.9756	Excellent	214	Excellent
2	357.38	0.9395	Excellent	65	Fair
3	391.28	0.7126	Fair	0.09	Poor
4	590.43	0.3695	Poor	0.09	Poor
5	601.31	0.1689	Poor	26	Fair

4.6 光放射光譜訊號強度與電性的關係

以氮氧化矽作為閘極介電層時，氮在此薄膜中的濃度對電晶體的影響極為重要。不同的濃度將造成不同的臨界電壓、等效氧化層的厚度和可靠性等的電性表現。除此之外，氮在氮氧化矽薄膜中的深度輪廓也將影響電晶體通道 (channel) 中載子 (carrier) 的遷移率 (mobility) [28][29]。又從 4-5

節所得到的結論：光放射光譜訊號與氮濃度有著良好的線性關係，於是合理的推論下，光放射光譜訊號應該與元件電性參數有著某種程度上的相依。本實驗從總共 47 個以圖 3-12 所示的 MOSFET 製作流程的晶圓樣本，分別收集 NMOS 與 PMOS 其電性數據後，與其在電漿氮化閘製程時 OES 所收集到的訊號強度作關聯性的分析，再與理論對結果作驗證。最後以一般對 WAT 電性參數不得超過正負 5% 的規範[30]找出最佳 OES 訊號區間。由 4-4 節的結論得知 channel#1 (波長 337.03) 與氮濃度有最佳關聯性與靈敏性。所以在對電性的分析上我們僅針對 channel#1 來作關聯以得到最佳的實驗結果。

4.6.1 光放射光譜與等效氧化層的厚度的相關性

圖 4-10 與圖 4-11 的分析得知，OES 訊號與等效氧化層的厚度有著良好的線性關係：Rsquare 大於 0.8 和反比的關係。在理論驗證方面，從式 4-1 對 EOT 的定義來看圖 4-10 與圖 4-11 為何有如此的關係。

$$EOT \equiv \frac{d}{k} \quad \text{式(4-1)}$$

d ：物理厚度(physical thickness)

k ：為介電常數

當氮濃度越高時氮氧化矽特性從遠離 SiO_2 而越接近 Si_3N_4 。又由表 4-6 得知， Si_3N_4 比 SiO_2 有較高的 k 值，所以越高的氮濃度會得到越小的 EOT。結合 4-4 節 OES 與氮濃度關係的結論，圖 4-10 與圖 4-11 所示，EOT 與 OES 的訊

號成反比的關係符合式 4-1 的關係式。

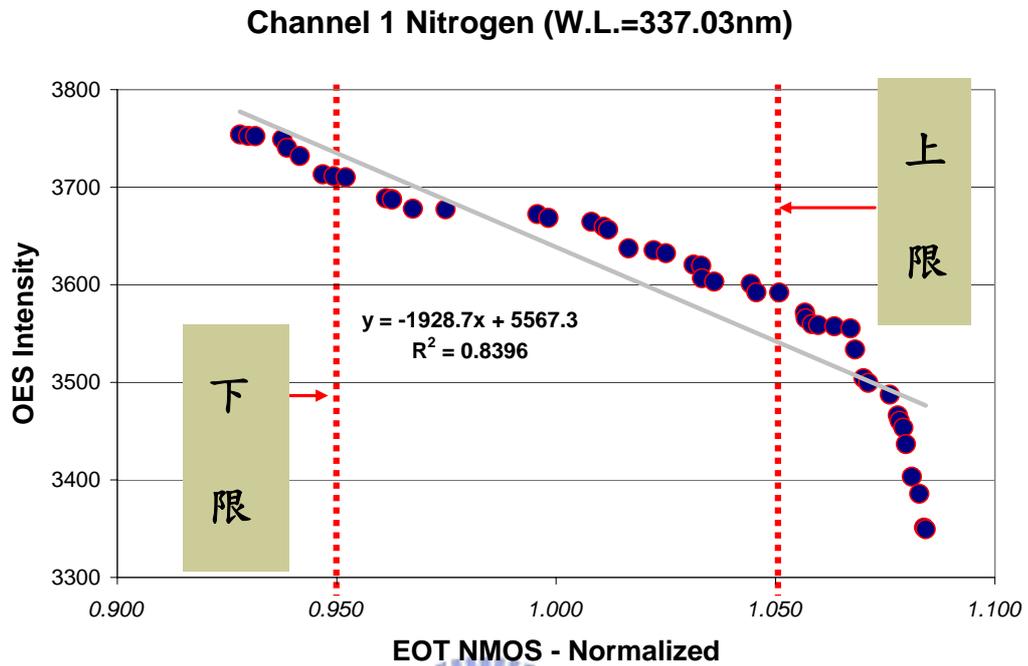


圖 4-9 光放射光譜與等效氧化層厚度的相關性-NMOS

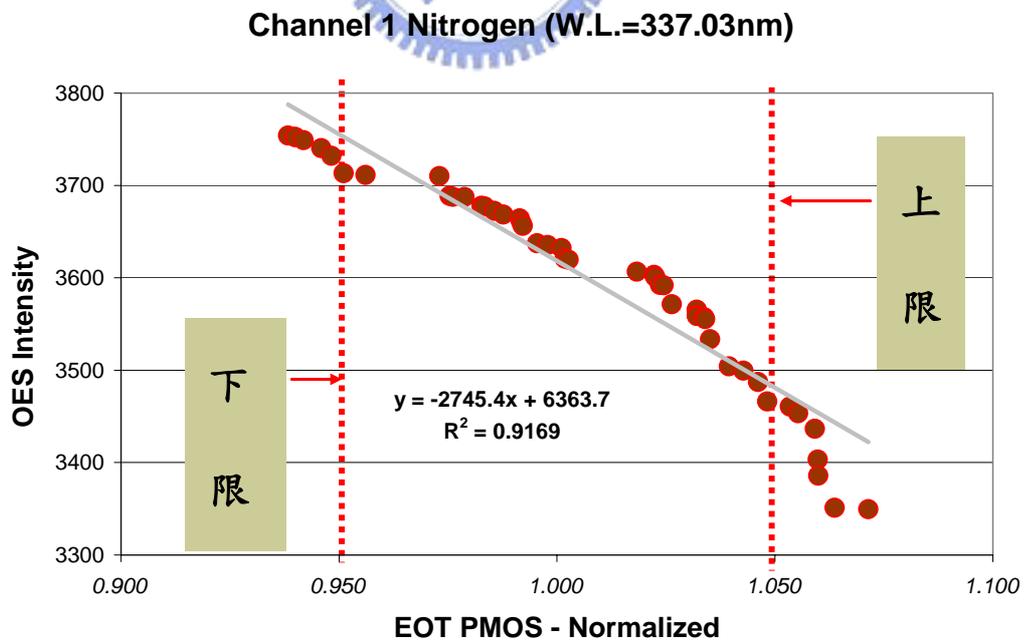


圖 4-10 光放射光譜與等效氧化層厚度的相關性-PMOS

表 4-6 SiO₂與Si₃N₄的特性比較

Properties	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Structure	Amorphous	Amorphous
Density (g/cm ³)	2.2	3.1
Refractive Index	1.46	2.05
Dielectric Constant	3.9	7.5
Dielectric Strength (V/cm)	10 ⁷	10 ⁷
Energy Gap at 300K (eV)	9	approx. 5.0

4.6.2 光放射光譜與臨界電壓的相關性

臨界電壓就具體的意義而言，是 MOSFET 中井區 (well) 形成反轉層 (Inversion layer) 所需的電壓值，如圖 4-12 所示。以 n 型半導體為例來看，當外加正偏壓大於臨界值時，會使原來 p 型半導體的部分轉變成 n 型，而讓電子積聚在半導體層和氧化層間而行成通道。

經由電漿氮化製程置入閘極介電層的氮會在矽基底與閘極介電層的介面形成 Donor like 的 fixed charge[30]。由於 NMOS 為 p 型的井區，這造成臨界電壓的降低，而由於 PMOS 為 n 型的井區，這造成臨界電壓的增加。換言之，愈高的氮濃度將造成 NMOS 與 PMOS 的臨界電壓分別減少與增加。綜合 4-4 節光放射光譜與氮濃度關係的結論，圖 4-12 與圖 4-13 顯示實驗的結果符合理論上的預期。

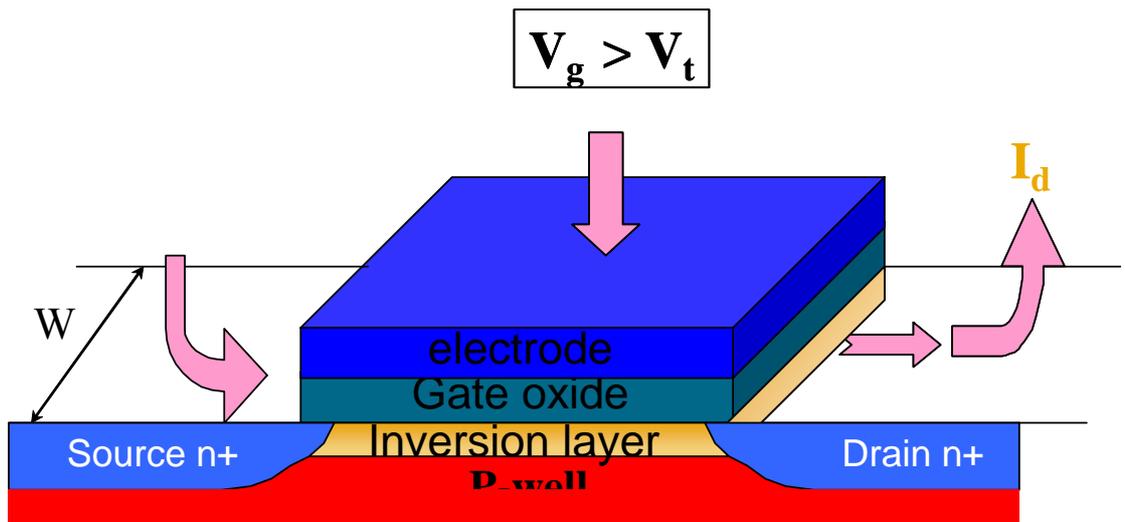


圖 4-11 MOSFET 中逆轉層的示意圖

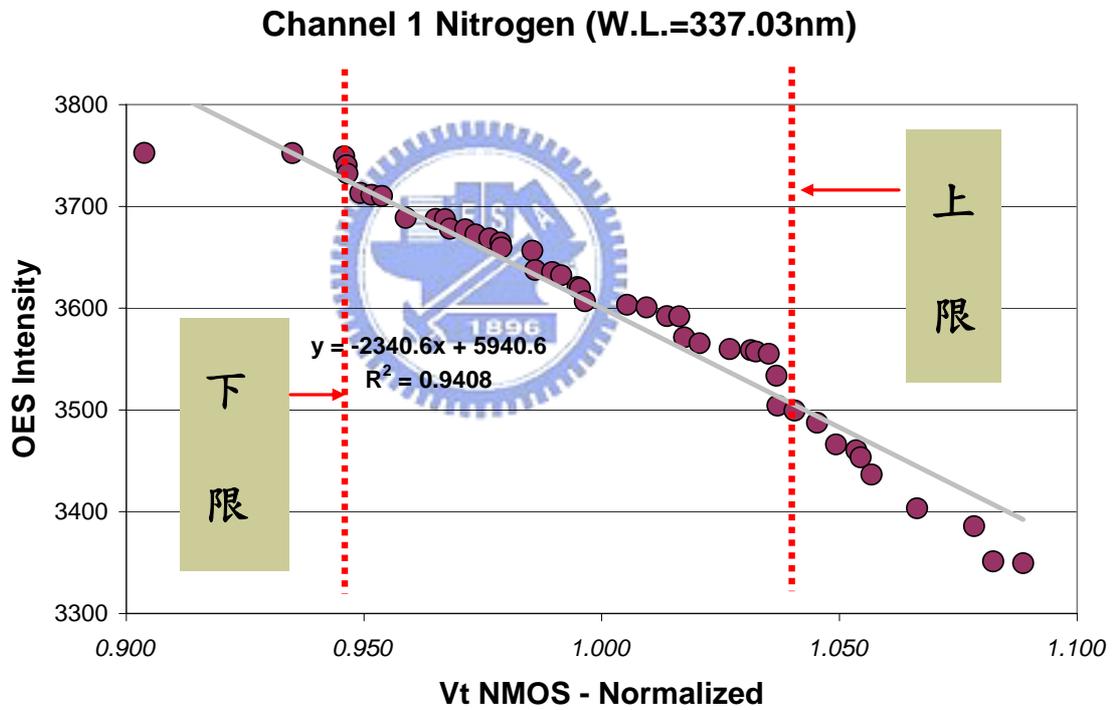


圖 4-12 光放射光譜與臨界電壓的相關性-NMOS

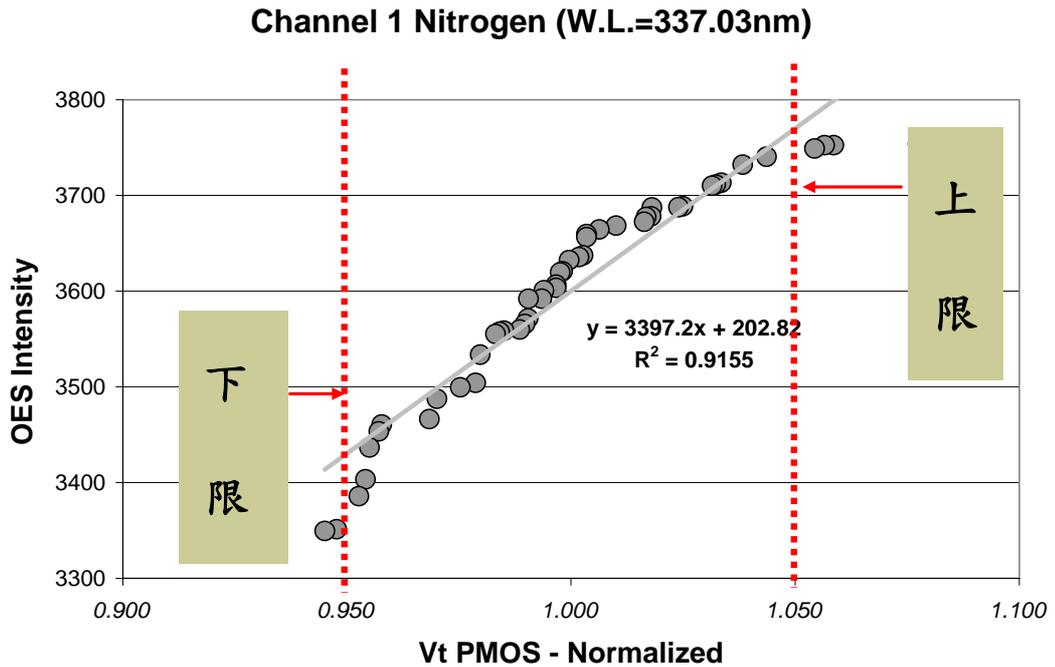


圖 4-13 光放射光譜與臨界電壓的相關性-PMOS

4.6.3 光放射光譜與汲極飽和電流的相關性

MOSFET 通道中的汲極飽和電流可以用式 4-2 來表示。

$$I_{dsat} = \frac{W}{L} C_{ox} \mu (V_g - V_t)^2 \quad \text{式(4-2)[30]}$$

W ：閘極寬度

L ：閘極長度

C_{ox} ：氧化層電容

μ ：遷移率

V_g ：閘極電壓

V_t = 閘極臨界電壓

其中氧化層電容 C_{ox} 又可以用式 4-3 來表示。

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} \frac{A}{EOT} \quad \text{式 (4-3) [30]}$$

ϵ_{ox} ：氧化層的電容率

A：面積=閘極寬度 x 閘極長度

由式 4-2 對汲極飽和電流的定義來看，當電晶體的幾何尺寸沒有改變時，汲極飽和電流將 $(V_g - V_t)^2$ 正比於與 C_{ox} 。結合式 4-3 可以得到式 4-4 的關係。

$$I_{dsat} \propto \frac{(V_g - V_t)^2}{EOT} \quad \text{式(4-4)}$$

從 4.6.1 節的結論與式 4-3 可知，當氮濃度增加時 NMOS 與 PMOS 的 EOT 值都將減少；又從 4.6.2 節的結論得知隨氮濃度的增加將分別造成 NMOS 的 V_t 減少與 PMOS 的 V_t 增加。以式 4-4 定性上來分析汲極飽和電流的變化可知，對 NMOS 而言氮濃度的增加將造成汲極飽和電流的增加；就 PMOS 而言則較為複雜，端視 EOT 與 $(V_g - V_t)^2$ 的變化量的比例而定。依圖 4-14 與圖 4-15 所示的實驗結果，NMOS 與 POMOS 的汲極飽和電流都隨著 OES 的訊號增加而變大，在定性上與理論相符合。

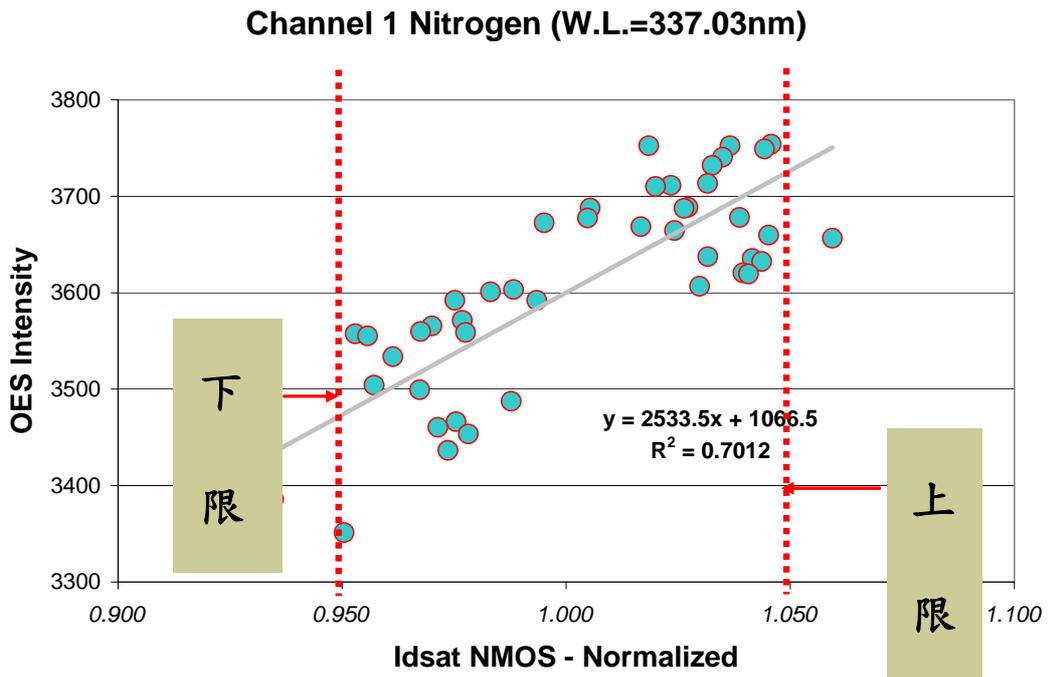


圖 4-14 光放射光譜與汲極飽和電流的相關性-NMOS

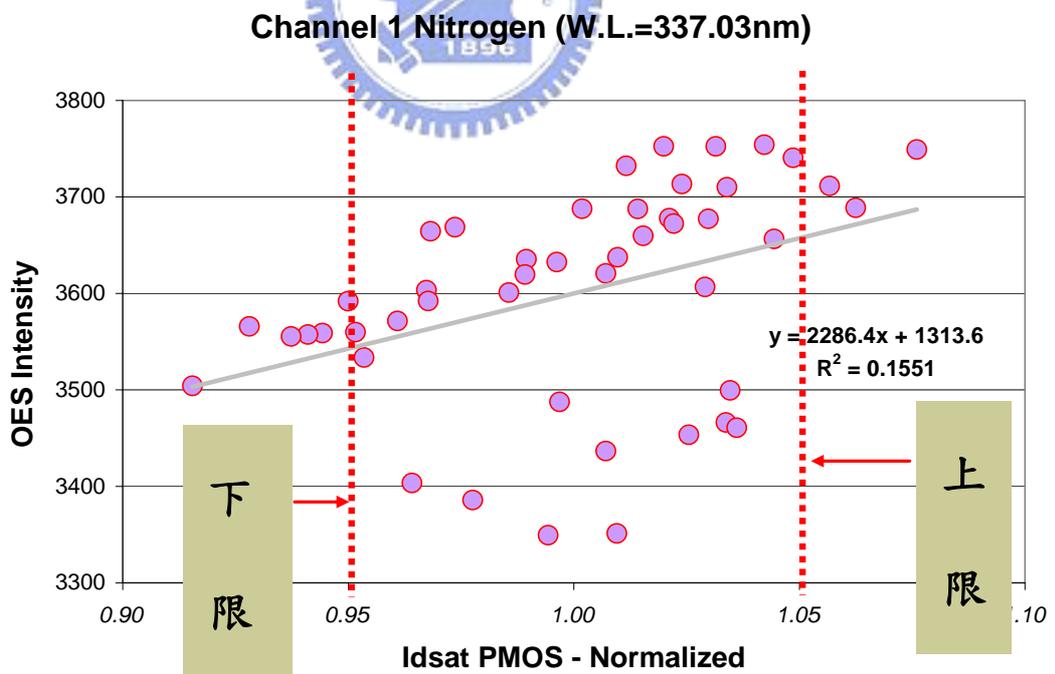


圖 4-15 光放射光譜與汲極飽和電流的相關性-NMOS

4.6.4 光放射光譜與閘極漏電流的相關性

閘極漏電流在 MOSFET 元件中的大小可以用式 4-5 來表示。

$$J_g \propto \exp\left(-\frac{2\sqrt{2m_d\Phi_b}}{\hbar}T_{ph}\right) \cdot \exp\left(\frac{q}{\hbar}\sqrt{\frac{m_d}{2\Phi_b}}T_{ph}V_{ox}\right) \quad \text{式(4-5)[30]}$$

T_{ph} ：物理厚度

M_d ：穿透質量

ϕ_b ：矽與介電層間的位能障

V_{ox} ：施加於介電層上的電壓

由式 4-5 可知閘極漏電流 $\sqrt{m_d\Phi_b}T_{ph}$ 與的變化量有關。從表 4-6 得知 Si₃N₄ 的帶溝 (band gap) 較 SiO₂ 小所以當氮濃度增加時 ϕ_b 將減少；但是在圖 4-16 與 4-17 並未見到如此的結果，這或許與氮濃度變化時穿透質量亦隨之改變而抵消了閘極漏電流的變化量有關。

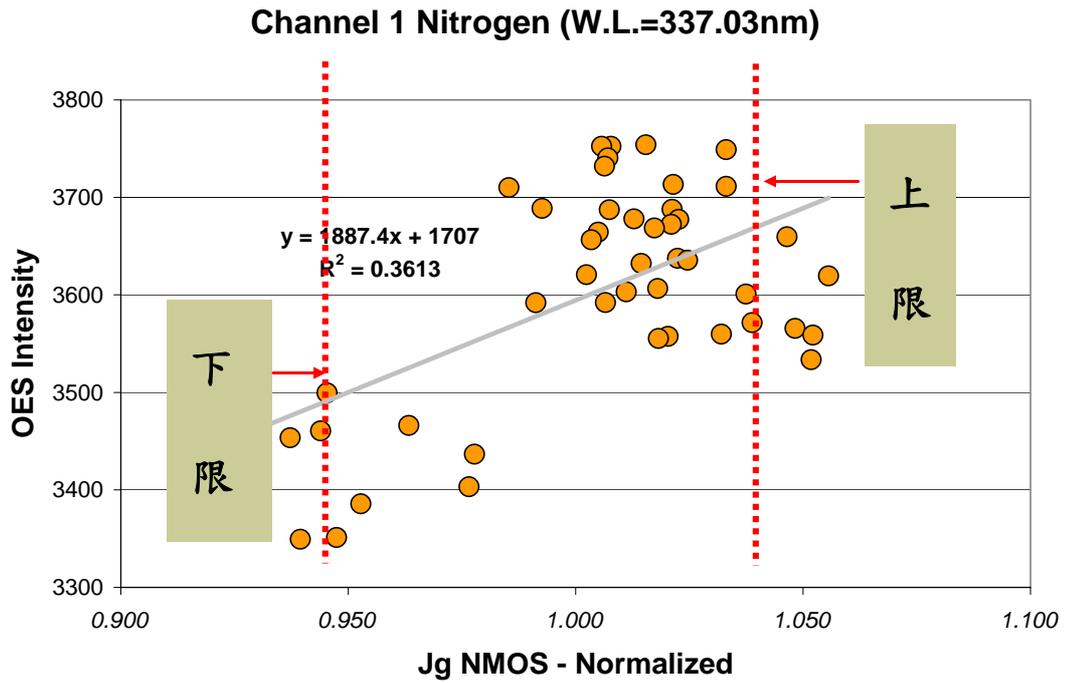


圖 4-16 光放射光譜與閘極漏電流的相關性-NMOS

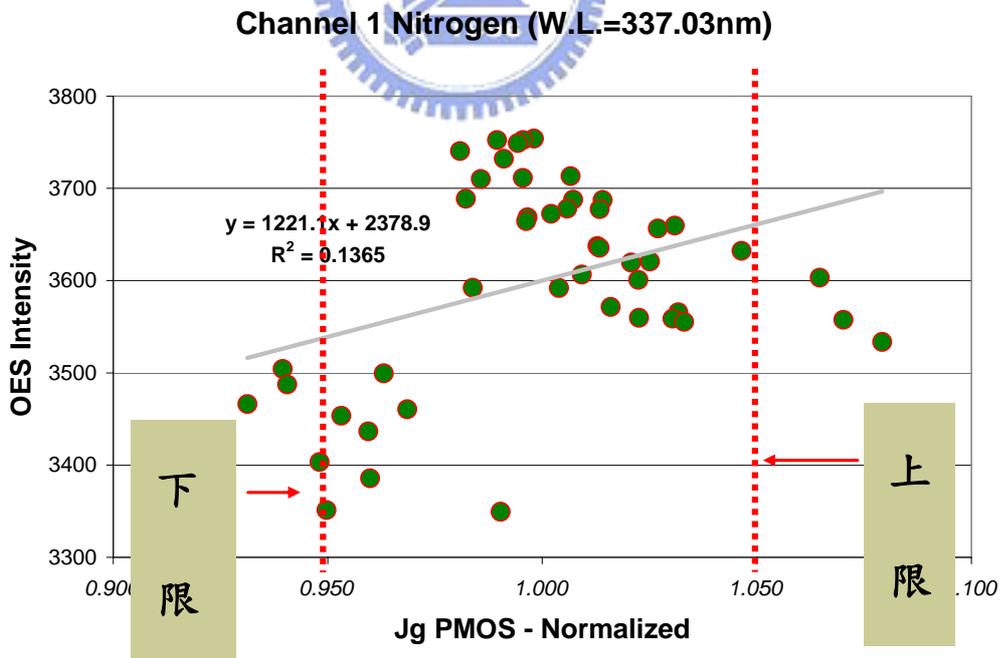


圖 4-17 光放射光譜與閘極漏電流的相關性-PMOS

4.7 電性參數的最佳化

綜合 4.6.1 到 4.6.4 節 OES 對各電性參數關聯性的結論，加上各電性參數在 CMOS 晶圓製造時所規範不得超過上下 5% 的限制。我們利用 OES 的訊號強度來找出最適製程區間。表 4-6 列出在本實驗的標準製程下，各電性參數最適訊號強度區間。

表 4-7 OES 訊號強度與電性參數的關聯與最佳區間

Index	NMOS		PMOS	
	Rsquare	Optimized OES intensity Range	Rsquare	Optimized OES intensity Range
EOT	0.84	3590~3700	0.92	3460~3710
Vt	0.94	3466~3713	0.92	3425~3770
Idsat	0.70	3473~3727	0.16	N/A
Jg	0.36	N/A	0.14	N/A

第五章、結論

當元件的閘極氧化層持續下降至 2 nm，如何增加運作的時脈與降低高功率的消耗已經成為元件製程最具挑戰的問題。在更先進的高介電常數介電層與金屬閘極達到簡易與具高成本效益的量產技術前,有效解決這些問題的方法之一為引進氮進入閘極氧化層。氮的引進將使相同等效氧化層厚度的閘極絕緣層具有較厚的物理厚度而減少其穿隧電流，並同時可有效地抑制硼的擴散。電漿氮化製程由於具備單晶圓技術以及多製程整合能力，不同於其他的閘極氮氧化技術，而能產生精確的氮離子分佈控制，此實驗主要提供了一個改善此主流製程技術在量產上的問題。

經本研究利用 OES 的強度來間接預測電漿氮化閘極製程反應下，二氧化矽中氮的含量與製程最佳化。結果，獲得以下的結論：

1. 在波長 337.03nm 的光譜訊號與氮濃度有著最好的相關性。
2. 此製程的氮濃度推測應該主要由波長 337.03nm Nitrogen radical 所貢獻。
3. 光譜訊號強度與電性參數如等效氧化層厚度，汲極飽和驅動電流和臨界電壓有合理的線性關係存在。
4. 光譜訊號強度、電性參數與氮濃度在變化的趨勢上符合理論上的推測。
5. 由於光譜訊號強度與電性參數有相關性，因此利用光譜訊號可以對

電性參數找出最佳化的區間。

6. 此預測之方法具有即時與簡單之優點。



參考文獻

- [1] Nouri, F. Kher, S. Narwankar, P. Sharangpani, R. Muthukrishnan, S. Kraus, P. Ahmed, K. Olsen, C. Thai Cheng Chua Cruse, "Trends in gate stack engineering". Integrated Circuit Design and Technology, pp. 275-281, 2004.
- [2] G. Higashi, T. Lill, "Challenge from 90nm Front End of Line", EETimes, 2003.
- [3] International Technology Roadmap for Semiconductors, Front End Processes, pp. 70-71, 2005.
- [4] J. H. Lee, Y. S. Suh, H. Lazar, R. Jha, J. Gurganus, Y. Lin, V. Misra, "Compatibility of dual metal gate electrodes with high-k dielectrics for CMOS", IEDM, 2003.
- [5] R. B. Beck, A. Jakubowski, "Ultrathin oxynitride films for CMOS technology", Journal of Telecommunications and Information Technology, pp.62-69, 2004.
- [6] 余昱穎，陳經緯，簡昭欣，"在具有超薄（EOT=1.6 nm）氮化閘極氧化層之 0.13 μm n 型金氧半電晶體中由熱電子所引發於閘極絕緣層內之電子捕獲現象"，奈米通訊，第十一卷，第四期，pp. 6-10, 民國九十二年。
- [7] E. Ibok, K. Ahmed, M. Y. Hao, B. Ogle, J. J. Wortman, and J. R. Hauser, "Gate quality ultrathin (2.5 nm) PECVD deposited oxynitride and nitrated oxide dielectrics", IEEE Electron Device Lett., vol. 201, no. 9, pp. 442-444, Sept. 1999.
- [8] C. H. Chen, Y. K. Fang, C. W. Yang, S. F. Ting, Y. S. Tsair, M. C. Yu, T. H. Hou, M. F. Wang, S. C. Chen, C. H. Yu, and M. S. Liang, "Thermally-enhanced remote plasma nitrated ultrathin (1.65 nm) gate oxide with excellent performances in reduction of leakage current and boron diffusion", IEEE Electron Device Lett., vol. 22, pp. 378-380, Aug. 2001.
- [9] Y. Wu, Y. M. Lee, and G. Lucovsky, "1.6 nm oxide equivalent gate dielectrics using nitride/oxide (N/O) composites prepared by RPECVD/oxidation process", IEEE Electron Device Lett., vol. 21, no. 3, pp. 116-118, Mar. 2000.
- [10] N. Kimizuka, K. Yamaguchi, K. Imai, T. Iizuka, C. T. Liu, R. C. Keller, and T. Horiuchi, "NBTI enhancement by nitrogen incorporation into ultrathin gate

- oxide for 0.1- μm gate CMOS generation", VLSI Tech. Dig., pp. 92-93, 2000.
- [11] H. S. Momose, T. Morimoto, Y. Ozawa, K. Yamabe, and H. Iwai, "Electrical characteristics of rapid thermal nitrided-oxide gate n- and p-MOSFET's with less than 1 Atom% nitrogen concentration", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 41, no. 4, pp. 546-552, April, 1994.
- [12] H.-H. Tseng, Y. Jeon, P. Abramowitz, T. Luo, L. Hebert, J. J. Lee, J. Jiang, P. J. Tobin, G. C. F. Yeap, M. Moosa, J. Alvis, S. G. H. Anderson, N. Cave, T. C. Chua, A. Hegedus, G. Miner, J. Jeon, and A. Sultan, "Ultra-thin decoupled plasma nitridation (DPN) oxynitride gate dielectric for 80-nm advanced technology," IEEE Electron Device Lett., vol. 23, no. 12, pp. 704-706, Dec. 2002.
- [13] K. C. Chen, H. H. Shih, C. Hsueh, H. Chung, S. Pam, C.Y. Lu, C.W. Chou and S. S. Chen, "Cycle Time and Process Improvement by Single Wafer Thermal Processing in Production Environment," presented at the 10th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors RTP 2002, September 2002.
- [14] P.A. Kraus, et. al, "Low-energy nitrogen plasmas for 65-nm node oxynitride gate dielectrics: a correlation of plasma characteristics and device parameters", Symposium on VLSI Technology, 2003.
- [15] Hegedus Andy, OLSEN Chris S. ,KUAN Nolan, Madok John, "Clustering of plasma nitridation and post anneal steps to improve threshold voltage repeatability", IEEE Transaction on Semiconductor Manufacture, vol. 16, pp.165-169, 2003.
- [16] Edwin T. Carlen and Carlos H. Mastrangelo, "Statistical Model for Spatial Correlation in Thin Film Deposition and Reactive Growth", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 11, no. 3, Aug. 1998.
- [17] A. M. Acevedo, G. Francisco, "On the Thermal Re-Oxidation of Silicon Oxynitride", Material Research Society, pp. 22-28, 1998.
- [18] 陳家富, "電漿與薄膜製程技術手冊", 民國九十四年九月。
- [19] 張家豪, 魏鴻文, 翁政輝, 柳克強, "電漿源原理與應用之介紹", 物理雙月刊, 廿八卷二期, 民國九十五年四月。

- [20] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", John Wiley & Sons, 1994.
- [21] G. L. Weissler, "photoelectric emission from solids", Handbuch der physic, 21, pp. 342-382, 1956.
- [22] Hamamatsu Photonics K. K., "Photomultiplier Tube Handbook", Feb. 2006.
- [23] H. Bruining, "Physics and Application of secondary electron emission", 1954.
- [24] A. Velosol, FN Cubaynes, A. Rothschild, S. Mertensl, R. Degraevel, R. O'Connor, "Ultra-thin Oxynitride Gate Dielectrics DPN for 65nm", Extended Abstracts of International Workshop on Gate Insulator, pp.140-145, 2003.
- [25] 潘扶民, "半導體材料分析講義", 民國九十五年六月。
- [26] H. H. Tseng, Y. Jeon, P. Abramowitz, T. Y. Luo, L. Hebert, J. J. Lee, J. Jiang, P. J. Tobin, G. C. F. Yeap, M. Moosa, J. Alvis, S. Anderson, N. Cave, T. C. Chua, A. Hegedus, G. Miner, J. Jeon, and A. Sultan, "Ultra-thin decoupled plasma nitridation" (DPN) oxynitride gate dielectric for 80-nm advanced technology," IEEE Electron Device Lett., vol. 23, no. 12, pp. 704-706, Dec. 2002.
- [27] V M Donnelly, M V Malyshev, M Schabel, A Kornblit, W Tai, I P Herman and N C M Fuller, "Optical plasma emission spectroscopy of plasma used in Si-Based semiconductor processing", Plasma Sources Sci. Technology 11, pp. 26-30, 2002.
- [28] P.A. Kraus, et. al, "Low-energy nitrogen plasmas for 65-nm node oxynitride gate dielectrics: a correlation of plasma characteristics and device parameters", Symposium on VLSI Technology, 2003.
- [29] C. H. Chen, Y. K. Fang, C. W. Yang, "Thermally-enhanced remote plasma nitrided ultrathin (1.65 nm) gate oxide with excellent performances in reduction of leakage current and boron diffusion," IEEE, pp. 124-128, 2003.
- [30] C. Diaz, et. al., "Application-Dependent Scaling Tradeoffs and Optimization in the SoC Era", IEEE, pp. 475-478, Jun 2002.
- [31] S.M. Sze, "Semiconductor Device Physics and Technology 2nd Edition", 2001.

[32] Applied Material DPN process manual rev. 3, pp.36-42, 2004.



自 傳

來自嘉義縣新港鄉的小康家庭，家中成員五人，個人排行老么。早年因父親為勞工階級所以家人皆以儉持家，現今兄弟皆已成家分居各處，但每週末常有家庭聚會，共聚一堂。

大學就讀於中興大學機械系，在校期間除專業課目外，對校外活動也多有參與。由於個性外向善於溝通，常代表系上參加校際公關活動與康輔社團。工作多年後由於在職場上專業技能的需求，在公司的長官與家人的鼓勵下進入交通大學工學院半導體學分班進修。進修期間接受恩師 陳家富教授的薰陶與多位優秀的教授的指導，讓我在專業與工作方式有了長足的進步。



十二年的外商職場生涯從科林研發(Lam Reserch)到應用材料(Applied Materials)大多負責新產品專案管理。由於外商的高度競爭，與實事求的文化倒是造就了抗壓的優勢與責任感。

期待在學業完成後能有更好的升遷管道，也期盼與許多優秀的同學共創更好的未來。