

集光式砷化鎵太陽電池及發電模組的製作 期末報告

計劃編號：NSC 88-TPC -E-009 -006 -

執行時間：88 年 1 月 1 日至 88 年 12 月 31 日

計劃主持人：李威儀 教授

行政院國家科學委員會

88年度電力科技產業學術合作研究計劃

集光式砷化鎵太陽電池 及發電模組的製作

中華民國 89 年 1 月

目錄

第一章緒論.....	(1)
第二章太陽能電池的原理.....	(4)
2-1 太陽能電池工作原理.....	(4)
2-2 太陽電池量測參數與轉換效率.....	(6)
2-3 砷化鎵太陽電池的特性.....	(9)
2-4 背面表面電場的作用.....	(10)
2-5 異質接面的作用.....	(11)
第三章砷化鎵太陽電池的設計及製作.....	(12)
3-1 砷化鎵太陽電池的磊晶成長及結構設計.....	(12)
3-2 太陽電池窗口層之研究.....	(15)
3-3 正面金屬電極的設計.....	(17)
3-4 砷化鎵太陽電池其他製程研究.....	(19)
3-5 砷化鎵太陽電池之測試.....	(23)
第四章集光模組的設計與製作.....	(25)
4-1 集光模組的設計.....	(25)
4-2 佛斯耐透鏡 (Fresnal)	(26)
4-3 接面透鏡 (Secondary lens)	(27)
4-4 太陽電池.....	(29)

4-5 接觸電極的部分.....	(30)
4-6 散熱版的設計.....	(30)
4-7 電池模組合.....	(31)
4-8 整體結構組合.....	(31)
第五章 結論及建議	(32)
第六章 參考文獻.....	(33)

圖表目錄

圖 2-1 太陽輻射 AM0、AM1.5 與 6000 黑體輻射之能譜分佈.....	(34)
圖 2-2 P-N 接面太陽電池之結構即能帶示意圖.....	(35)
圖 2-3 太陽電池在照光條件下之電流-電壓曲線圖.....	(36)
圖 2-4 單接面太陽電池之等效電路圖.....	(37)
圖 2-5 GaAs 太陽電池的頻譜響應量測圖.....	(38)
圖 2-6 太陽電池之理論轉換效率與半導體之能隙寬度的關係....	(39)
圖 2-7 AlGaAs/GaAs 異質接面太陽電池之結構及能帶示意圖.....	(40)
圖 3-1 集光式砷化鎵太陽電池磊晶結構圖.....	(42)
圖 3-2 砷化鎵太陽電池及其窗口層.....	(43)
圖 3-3 不同窗口層材料之砷化鎵太陽電池光頻譜響應圖.....	(44)
圖 3-4 不同磷化銦鎵 (GaInP) 窗口層厚度之砷化鎵太陽電池之光頻 譜響應圖.....	(45)
圖 3-5 非集光式太陽電池光罩圖.....	(46)
圖 3-6 太陽電池內部的橫向電流圖.....	(47)
圖 3-7 集光式太陽電池電極圖案光罩設計圖.....	(48)
圖 3-8 Si ₃ N ₄ 保護樣品表面的效果：(a) 無 Si ₃ N ₄ 保護 (b) 有 Si ₃ N ₄ 保 護.....	(49)
圖 3-9 使用正光阻之微影成向過程及金屬 lift-off 結果.....	(50)

圖 3-10 使用影像反轉之微影成像過程及結果.....	(51)
圖 3-11 顯影時間不足之樣品：(a) 樣品正面顯微鏡放大圖，(b) 光阻剖面圖是意圖.....	(52)
圖 3-12 顯影時間充裕之樣品：(a) 樣品正面顯微鏡放大圖，(b) 光阻剖面圖是意圖.....	(53)
圖 3-13 由於蝕刻砷化鎵金屬接觸層的時間過久，導致太陽電池表面產生方形的凹孔.....	(54)
圖 3-14 不同厚度磷化銦鎵窗口層對砷化鎵太陽電池光頻譜響應的影響：(a) 25nm GaInP，(b) 10 nm GaInP.....	(55)
圖 3-15 在 AM1.5，100mW/cm ² 的照光條件下，砷化鎵太陽電池的效率量測結果.....	(56)
圖 3-16 在 1.2W/cm ² 的聚光條件下（12X），用兩點探針所量到電壓電流關係圖與輸出功率圖.....	(57)
圖 3-17 在 1.2W/cm ² 的聚光條件下（12X），用四點探針所量到電壓電流關係圖與輸出功率圖.....	(58)
圖 4-1 集光式太陽電池模組簡圖.....	(59)
圖 4-2 太陽電池模組分解圖.....	(60)
圖 4-3 Fresnal 透鏡之結構圖.....	(61)
圖 4-4 Fresnal 透鏡之穿透率對光波長關係圖.....	(62)

圖 4-5 砷化鎵太陽電池轉換效率對集光倍率的關係圖.....	(63)
圖 4-6 BK7 透鏡之穿透率對光波長關係圖.....	(64)
圖 4-7 Secondary 透鏡設計圖.....	(65)
圖 4-8 Secondary 透鏡入射光與反射光夾角關係圖.....	(66)
圖 4-9 太陽電光入射至 Secondary 折射圖.....	(67)
圖 4-10 BN 絕緣板與其接觸電極圖.....	(68)
圖 4-11 電池溫度對效率的影響.....	(69)
圖 4-12 太陽電池模組散熱板設計圖.....	(70)
圖 4-13 太陽電池模組蓋子設計圖.....	(71)
圖 4-14 太陽電池模組底座圖.....	(72)
圖 4-15 太陽電池模組剖面圖.....	(73)
圖 4-16 集光模組底板設計圖.....	(74)
圖 4-17 集光模組支撐架圖.....	(75)
圖 4-18 集光式太陽電池磨組合之零件分解圖.....	(76)
圖 4-19 集光式太陽電池磨組合，組合後之照片.....	(77)
圖 4-20 集光式太陽電池模組照片：(上) 模組整體照片，(下) 電池 模組盒照片.....	(78)
表 3-1 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ ， $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 三種窗口層材料之比 較.....	(41)

一、緒論

太陽能具有乾淨、無污染，而且來源不虞匱乏等優點，因此在石化能源逐漸消耗殆盡的疑慮下，太陽能的利用逐漸受到重視。太陽電池利用半導體材料的特性，可以直接將太陽光能轉換成電能，不需要發電機等機械裝置，非常安靜而且方便，同時能量轉換效率也很高。隨著半導體與太陽電池的研究發展逐漸成熟，太陽電池的發電成本也逐漸降低，因此開始顯現出其未來替代傳統發電方式的重要性及潛力。目前太陽電池發電裝置的採光方式主要可分成兩種，這兩種技術分別為：

一、平板式 (Flat-plate) 太陽電池模組：

平板式系統是將大面積的太陽電池鋪在平板上，直接進行採光及並將光能轉換為電能。這一類的太陽電池系統的製造成本中，電池本身的花費佔了一大半，若是想降低電力生產成本，就必須使用低價位的太陽電池，如複晶矽 (polycrystal silicon)、非晶矽 (amorphous silicon) 等，這類電池雖然便宜，但是能量轉換效率較低。最近因為單晶矽 (single crystal silicon) 太陽電池發展逐漸成熟，成本降低，也開始出現單晶矽太陽電池的平板式模組，但是模組成本仍然比前兩種高出許多。

二、集光式 (optical concentrator) 太陽電池模組：

由於高效率的單晶矽及化合物半導體太陽電池的電池成本居高不下，因此利用集光透鏡可以大幅降低太陽電池的使用量，降低發電成本，同時可以享有高能量轉換效率的好處。

砷化鎵 (GaAs) 太陽電池的轉換效率相當高，超過 20% 以上，但是由於造價昂貴，所以在地表發電應用方面有成本方面的顧慮，但是如果採用集光式太陽電池系統，將可以大量減少太陽電池的需

求及成本，再配合砷化鎵太陽電池的高能量轉換效率，便適合用於地表發電，因此集光式太陽電池發電系統可能是未來電力的重要來源。

本計劃的目的在研究以砷化鎵太陽電池為主的集光式太陽電池模組。在去年的研究計劃中，我們已經完成效率達 20% 的砷化鎵太陽電池，今年我們將繼續改善砷化鎵太陽電池的可靠性，使之更適合在地表發電使用。另外，在集光的條件下，每個電池的輸出電流將達數安培，必須改變電池設計，以避免因電池的串聯電阻損耗電能。根據去年我們所完成的集光式太陽電池發電的評估報告，集光倍數要達 400 倍以上才能有效降低發電成本，而在如此高的集光倍數下，必然會出現一些問題，包括如何聚光，如何解決散熱問題。因此我們也設計一個集光模組，實際去了解並解決集光發電模組可能會遇到的問題。

此報告內容包括聚光用砷化鎵太陽電池設計製作，以及聚光模組的設計，要點如下：

一、砷化鎵太陽電池的設計製作，內容包括：

- (1) 改變砷化鎵太陽電池的磊晶結構，使其較適合在高倍數聚光條件下運作。
- (2) 砷化鎵太陽電池製程研究，包括微影成像方式，電極蒸鍍，以及蝕刻條件的嘗試，以提高砷化鎵太陽電池的製作良率。
- (3) 砷化鎵太陽電池窗口層之研究：研究不含鋁成分的磷化銦鎵窗口層，以降低水氣與氧氣對砷化鎵太陽電池的損害，增加砷化鎵太陽電池的可靠性。
- (4) 集光用砷化鎵太陽電池之正面電極設計：改善正面電極的圖形，以降低串聯電阻，減少發電功率損耗。

二、集光式太陽電池發電模組的設計，內容可分成以下幾項：

- (1) 集光式太陽電池發電模組設計的基本原理及概觀
- (2) 光學路徑之考量及光學透鏡的選用
- (3) 太陽電池的固定、散熱、及電流的導引方式

二、太陽能電池的原理

2-1 太陽能電池工作原理

太陽之所以能連續產生巨大的光和熱，是因為太陽內部的核融合反應，產生大量的輻射能。根據愛因斯坦的質能轉換關係式（ $E=mc^2$ ）來計算，每秒鐘約可產生 4×10^{20} 焦耳的能量，這些能量以電磁輻射的方式發射出來，其輻射範圍由紫外光區至紅外光區，波長範圍約 $0.2 \mu\text{m}$ 至 $3 \mu\text{m}$ 。

在真空中，由太陽到地球的平均距離下，太陽光的輻射強度被定義太陽常數（solar constant），其值約為 1353W/m^2 。而地球表面上大氣影響太陽輻射的吸收程度，其定義為空氣質量（air mass）在大氣層外的太陽光譜，太陽輻射強度最強，空氣質量為零（AM0），功率 1353W/m^2 ；當陽光垂直入射到地球表面時，空氣質量為 1（AM1），功率為 925W/m^2 。而空氣質量和陽光入射角度的關係為

$$\text{Air mass} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.1)$$

其中 θ 為太陽光與地表垂直方向的角度。AM0 及 AM1.5 與 6000 K 黑體輻射的光譜如圖 2-1 所示。

最常見的太陽電池結構為 P-N 接面太陽電池，它包含由 p-型與 n-型半導體材料所形成的 P-N 接面，在上方稱為射極（emitter）而在下方稱為基極（base）、電池正面有部分區域覆蓋歐姆接觸電極，而無電極覆蓋的部分則允許太陽光進入表面，設計太陽電池時會儘量

減少正面電極的覆蓋面積比，讓更多的太陽光進入電池中，同時也會在正面鍍上抗反射層降低太陽光的反射，背面也會鍍上歐姆電極，整個太陽電池結構與半導體能帶圖如圖 2-2 所示。

太陽電池的工作原理，是當光線入射到電池內部時，能量大於太陽電池材料能隙（energy bandgap, E_g ）光子（ $h\nu \geq E_g$ ）會被材料吸收，而產生具有能隙相同能量的電子-電洞對（electron-hole pair），這些多餘的少數載子經由擴散到達 P-N 接面後，受 P-N 接面間內建電場的作用穿過空乏區而形成光電流；而入射光激發電子-電洞對後所剩餘的能量（ $h\nu - E_g$ ），則以熱能的形式消耗掉。另外一部份能量小於材料能隙的光子（ $h\nu < E_g$ ），將穿透過太陽電池而不會被材料所吸收，這也是造成太陽在長波長的部分，量子效率極差的原因。

對一個理想的太陽電池而言，其電流-電壓的關係式為

$$I = I_0 * (e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (2.2)$$

其中 I_L 是太陽光輻射產生的光電流（photo-current）， I_0 為二極體的反向飽和電流（reverse saturation current）， T 為絕對溫度， k 為波茲曼常數（Boltzmann constant）， I - V 曲線如圖 2-3 所示。

太陽電池的等效電路如圖 2-4 所示，其中包含了一個與二極體平行的電流源以及串聯電阻 R_s 和並聯電阻 R_{sh} ，而太陽電池的負載為 R_L 。根據克西荷夫電壓定律，可得到等效定律中輸出電流 I 與輸出電壓 V 的關係式為

$$I \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_L - I_0 * \left[\exp\left(\frac{qV + qIR_s}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

當光電流很大時，例如在強照光條件下，串聯電阻的影響顯得較為

重要，此時因串聯電阻損失的功率大約為 $I_L^2 * R_s$ 。如果假設並聯電阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$ ，則 (2.3) 式化簡為

$$V = \frac{nkT}{q} * \ln\left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1\right) - IR_s \quad (2.4)$$

當光電流很小時，此時串聯電阻可以忽略，而以並聯電阻的影響較為重要。這時假設串聯電阻 $R_s \rightarrow 0$ ，則 (2.3) 式簡化為

$$I = I_L - I_0 * \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

若同時假設太陽電池的串聯電阻 $R_{sh} \rightarrow 0$ ，並聯電阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$ ，則可以得到如 (2.2) 式理想太陽電池的結果。

2-2 太陽電池的量測參數與轉換效率

太陽電池的量測包括電性量測與光頻譜響應量測，電性量測主要是量測太陽電池的 I-V 特性曲線，從 I-V 特性曲線得到太陽電池的短路電流 I_{sc} 、開路電壓 V_{oc} 以及填充因子 (fill factor FF) 三個參數，並換算出太陽電池的能量轉換效率 η ，以作為衡量太陽電池特性的依據。而頻譜響應量測可以得知太陽電池中對各種不同波長的太陽光線的吸收效率。

(一) 電性量測

太陽電池的電性量測是以太陽光模擬系統，模擬在一個太陽 (one sun) 的照光條件下進行，其 I_{sc} 、 V_{oc} 以及 FF 在 I-V 曲線中的對應點，標示於圖 2-3 中。

A. 短路電流 I_{sc} (short circuit current)

短路電流是太陽電池在無負載的狀態下，也就是外部短路的輸出電流，此時輸出電壓 $V=0$ 。從 (2.3) 式可得

$$I_{sc} * \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = I_L - I_0 * \left[\exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{nkT}\right) - 1\right] \quad (2.6)$$

對理想太陽電池而言，當串聯電阻 $R_s \rightarrow 0$ ，並聯電阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$ 時，則上式簡化為

$$I_{sc} = I_L \quad (2.7)$$

即短路電流 I_{sc} 將等於太陽電池在照光後所產生的光電流 I_L ，而 I_L 的大小與照光條件（如 AM1、AM1.5）以及材料對光譜的吸收程度（如吸收係數、能隙寬度等）有非常密切的關係。

B. 開路電壓 V_{oc} (open circuit voltage)

開路電壓是太陽電池在負載電阻無限大的狀態下，也就是外部電路斷路時的輸出電壓。此時輸出電流 $I=0$ 從 (2.3) 式可得

$$V_{oc} = R_{sh} \left\{ I_L - I_0 * \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nkT}\right) - 1\right] \right\} \quad (2.8)$$

在理想太陽電池的條件下，串聯電阻 $R_s \rightarrow 0$ ，並聯電阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$ ，上式可簡化為

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} * \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_0}\right) \quad (2.9)$$

由上式中 V_{oc} 與 I_0 的關係可得知，太陽電池的 V_{oc} 隨 I_0 的增大而減少，而隨 I_{sc} 的增大而增大，其中 I_0 的大小與材料的性質（如摻雜濃度、能隙寬度等）有關，故開路電壓的大小與材料的性質也是密切相關的。

C. 填充因子 FF (fill factor)

填充因子的定義為測量太陽電池照光 I-V 關係時，最大輸出功

率值 P_{max} 與 $(V_{oc} \cdot I_{sc})$ 乘積的百分比。因此，若太陽電池的 I-V 特性曲線在最大輸出功率點之電流及電壓個別為 I_m 、 V_m ，則 $P_{max} = I_m \cdot V_m$ ，填充因子可表示為

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \cdot 100\% = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

從另一方面而言，太陽電池的最大輸出功率 P_{max} 為太陽電池的 I-V 曲線上的最大方形面積。

D. 能量轉換效率 η (efficiency)

能量轉換效率的定義為太陽電池的最大輸出功率與輸入功率的比值。若入射光之輸入功率為 P_{in} ，則經由 (2.10) 式可得

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.11)$$

因此只要知道太陽電池之 I_{sc} 、 V_{oc} 及 FF ，即可換算出太陽電池能量轉換效率 η 。

(二) 頻譜響應量測 (spectral response)

頻譜響應的定義是在一定的照光條件下，太陽電池在不同波長的光照射時產生的光電子數與入射光光子數的比值，也就是太陽電池對不同波長的量子效率。量子效率又分為內部量子效率 (internal quantum efficiency, IQE) 與外部量子效率 (external quantum efficiency, EQE)，內部量子效率是考慮太陽電池表面經過反射之後的入射光子數，而外部量子效率則不考慮反射的效應。故其關係式可表為

$$IQE = \frac{i_{ph}}{q \cdot F(\lambda) \cdot [1 - R(\lambda)]} \quad (2.12)$$

$$EQE = \frac{i_{ph}}{q \cdot F(\lambda)} \quad (2.13)$$

其中 $F(\lambda)$ 及 $R(\lambda)$ 分別為在波長 λ 時的入射光子數及反射率，而 i_{ph} 為光電子流。

透過頻譜響應量測，我們可以瞭解太陽電池對不同波長的吸收效率，並加以改善。圖 2-5 為 GaAs 單接面太陽電池的頻譜圖，圖中顯示在波長 870nm 附近，太陽電池的量子效率急速下降為零，這是因為 GaAs 的能隙寬度為 1.42eV，截止波長為 870nm，故只能吸收波長小於截止頻率；而在波長約 300nm 左右，太陽電池的量子效率有下降的趨勢，這是因為 GaAs 對高能量的光子吸收的非常的快速，這些高能量的光子幾乎在太陽電池表面就已經完全被吸收，但是由於表面復合效應的影響，吸收後所產生的少數載子在太陽電池表面無法被有效被收集，因此量子效率下降。

2-3 砷化鎵太陽電池的特性

在化合物半導體材料中，我們選擇砷化鎵（GaAs）作為製作太陽電池的材料，主要是因為砷化鎵太陽電池具有直接能隙、高轉換效率、高抗輻射性等特性，使其具有適合太空使用的優點。

圖 2-6 顯示太陽電池轉換效率與半導體材料能隙寬度的關係，由圖可之能隙寬度在 1.4~1.6eV 之間的半導體材料，具有最佳理論轉換效率，而當空氣質量從 AM0 增至 AM1.5 時，其理論轉換效率從 26% 增至 29%，而砷化鎵材料便具有最接近理想得能隙寬度（1.424eV）。

砷化鎵雖然具有與矽相類式的鑽石結構，但是矽材料為間接能隙（indirect bandgap），而砷化鎵因為具有直接能隙（direct bandgap），

不但對入射光的吸收效率較快，而且其少數載子的生命期與擴散長度均比矽材料小，這些造成砷化鎵太陽電池與矽太陽電池在設計上有很大的差異。以矽太陽電池而言，若要將入射光完全吸收，所需厚度約 $100\ \mu\text{m}$ ，而直接能隙的太陽電池如砷化鎵，只需要 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 就可以吸收 90% 以上的入射光，因此可以大幅度減少材料使用，降低太陽電池的重量，這點非常有利於衛星的使用。

2-4 背面表面電場 (back surface field, BSF) 的作用

背面表面電場 (BSF) 的結構是在 1972 年由 J. Mandelkorn 所提出，其結構設計是在太陽電池的基極部分，成長不同摻雜濃度的區域，利用低摻雜濃度對高摻雜濃度區域間形成的高-低接面 (low-high junction)，作為少數載子的能障，而將少數載子反射回 P-N 接面，因此背面表面場的結構，可以促進基極區域少數載子的收集率。

背面表面場的作用，除了降低少數載子在太陽電池背面的復合速率，提高基極中少數載子收集率，增加太陽電池的短路電流 I_{sc} ，另外也可以降低太陽電池的反向飽和電流 I_0 ，而改善太陽電池的開路電壓 V_{oc} ，使得太陽電池的轉換效率提昇。

傳統的太陽電池結構中，通常會設計一個具有低摻雜濃度的基極，使得基極區域的少數載子有較長的生命時間，但缺點是如果將電極直接做在基極上，會導致歐姆接面的電阻過高，使串聯電阻增加，而降低太陽電池的效率。利用背面表面場可以有效的改善這個缺點，因為 BSF 結構在基極中形成高-低摻雜濃度的兩個區域，在低摻雜濃度區域仍可以得到具有長生命時間的少數載子，而將電極做在高摻雜濃度區域，則可以降低串聯電阻。一般使用磊晶方式成長太陽電池結構，都使用高摻雜濃度的基板 (substrate)，然後再成長

較低摻雜濃度的基極區，而形成 BSF 結構。

2-5 異質界面 (heteroface) 的作用

直接能隙的半導體材料 (如 GaAs)，因為對光子的吸收率比間接能隙的半導體材料 (如 Si) 快，因此受表面復合速率的影響較大，解決這個問題的方法，就是在砷化鎵太陽電池表面成長一層寬能隙材料作為窗口層 (window layer)，以形成異質界面，利用寬能隙窗口層所形成的能障 (barrier) 來阻擋少數載子擴散至太陽電池表面，降低表面復合速率的影響。

成長窗口層時，必須考慮窗口層材料與太陽電池材料的晶格常數是否匹配，以及窗口層材料的能隙寬度是否合適。對 GaAs 太陽電池而言， $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 是一個非常好的選擇，在 x 為 0.85 左右時， $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 具有約 2.16eV 的間接能隙，因為材料的間接能隙可以降低對入射光的吸收，因此對 GaAs 而言，AlGaAs 就像是一個透明的窗口一樣，除此之外，因為 AlGaAs 的晶格常數與 GaAs 非常接近，所以成長時不用考慮晶格匹配的問題，因此 AlGaAs 就如 GaAs 的保護層 (passivation)，可以有效的降低載子的表面復合速率。

AlGaAs/GaAs 異質界面太陽電池，是目前轉換效率最高的單接太陽電池，其結構如圖 2-7 所示。但是在 AlGaAs 上比較不容易獲得低串聯電阻值的接觸電極，解決的方法是在 AlGaAs 上成長一層高摻雜濃度的 GaAs 作為覆蓋層 (cap)，而將電極做在 GaAs 覆蓋層上；或者用蝕刻的方法將製作窗口層部分的 AlGaAs 去除，以將電極做在下層 GaAs 之射極上。

三、砷化鎵太陽電池的設計及製作

在去年度的計劃中，我們已經完成能量轉換效率達 20% (AM1.5G, 100 mW/cm² 的照光條件下) 的砷化鎵太陽電池，雖然如此，在本計劃中，我們仍然持續改良砷化鎵太陽電池的結構設計與製程，這些改良是爲了讓砷化鎵太陽電池更適合用於集光式太陽光發電系統，其改善項目包括：一、使用其他半導體材料製作砷化鎵太陽電池的窗口層，以提高砷化鎵太陽電池的可靠性。二、改變正面金屬電極的設計及製作方式，降低砷化鎵電池的串聯電阻，減少發電模組的功率損耗。此外，我們也發現，由於在聚光條件下，太陽電池的照光電流大增，所以必須注意測量方式，以免因不當的測量方式產生的串聯電阻影響測量結果。本章內容包括：

- (一) 砷化鎵太陽電池的磊晶成長與結構設計
- (二) 太陽電池窗口層之研究
- (三) 正面金屬電極的設計
- (四) 砷化鎵太陽電池其他製程研究
- (五) 砷化鎵太陽電池的測試

3-1 砷化鎵太陽電池的磊晶成長與結構設計

本計劃中使用有機金屬氣相磊晶法 (Organometallic Vapor-Phase Epitaxy, OMVPE) 來成長砷化鎵太陽電池的結構。成長時使用

Triethylgallium (TEGa) 及 Arsine (AsH_3) 做爲鎵 (Ga) 及砷 (As) 的原料, 而 n 型及 p 型的摻雜 (dopant) 原料則分別使用 Silane (SiH_4 , 濃度 1000 ppm) 及 Diethylzinc (DEZn)。另外, 在進行窗口層的研究時, 還使用 Trimethylaluminum (TMAI), Trimethylindium (TMIn) 和 Phosphine (PH_3) 做爲鋁 (Al), 銦 (In) 和磷 (P) 的反應原料。爲了生長出高品質的半導體薄膜, 整個反應必須在高純度的氫氣環境下 (氧氣及水氣的濃度低於 0.1 ppm) 完成。在正式進行砷化鎵太陽電池的結構磊晶前, 必須先確定各項生長砷化鎵薄膜的條件, 包括成長溫度、成長壓力、V/III 比 (即 AsH_3 與 TEGa 的濃度比例), 同時確定薄膜成長速率與摻雜濃度的控制, 如此才能正確成長出所需要的砷化鎵太陽電池結構。

在實驗中, 我們改變各項成長變數, 進行砷化鎵材料之磊晶研究, 實驗結果顯示在成長壓力 40 torr, V/III 比 20, 成長溫度 600°C 至 680°C 時, 可以得到均勻, 高品質的砷化鎵薄膜, 其電子移動率 (electron mobility) 在室溫下可達 $7500\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上。爲了配合砷化鎵太陽電池結構中窗口層材料的成長, 最後所選擇砷化鎵太陽電池的成長溫度爲 650°C 。砷化鎵薄膜的成長速率爲 $4\ \mu\text{m}/\text{hour}$, n 型砷化鎵濃度控制範圍爲 $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 到 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, 而 p 型砷化鎵濃度控制範圍爲 $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 到 $1 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 。

在窗口層材料的成長方面, 對於 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 窗口層, 其成長溫度爲 650°C , V/III 爲 40, GaInP 窗口層之成長溫度爲 650°C , V/III 爲 150, AlInP 窗口層之成長溫度爲 720°C , V/III 爲 200。在窗口層材料的摻雜方面, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 與 GaInP 都可達 $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, 而 AlInP 僅能達 $2 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 。在聚光用太陽電池的結構中, 由於窗口層穩定性及電池效率的考量, 最後採用 GaInP 做爲窗口層, 而各種窗口層材料之比較研究結果, 將在 3-2 節作一詳細說明。

聚光用砷化鎵太陽電池的磊晶結構如圖 3-1 所示。太陽電池結構成長在(100)晶面的 n⁺型砷化鎵基板上。在砷化鎵基板上，首先成長 0.5 μm 的 n⁺型砷化鎵緩衝層 (n⁺-type GaAs buffer layer)，其摻雜濃度為 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，接著成長 3.5 μm 的 n 型砷化鎵基極 (n-type GaAs base)，其摻雜濃度為 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，在 n⁺型砷化鎵緩衝層及 n 型砷化鎵基極的界面上，由於摻雜濃度的不同，會形成高低濃度差界面 (low-high junction)，這樣的結構可以稍微增加照光電流及開路電壓。接著，在成長 p 型砷化鎵射極 (p-type GaAs emitter) 之前，先成長一層 0.05 μm 的未摻雜砷化鎵 (undoped GaAs)，其作用是避免 p 型砷化鎵射極區之 p 型雜質擴散到 n 型砷化鎵基極區，如此可以降低元件之漏電流，提昇砷化鎵太陽電池之穩定性。然後，在未摻雜砷化鎵層上成長 p 型砷化鎵射極，其摻雜濃度為 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度為 1 μm 。一般在非聚光用的砷化鎵太陽電池的結構中，p 型砷化鎵射極層之厚度約為 0.5 μm 左右，這個厚度值是由理論模擬及實際製作所得到的最佳化值，但是在聚光用的砷化鎵太陽電池中，由於聚光後產生的光電流相當大，達到安培等級，為了降低串聯電阻，我們將 p 型砷化鎵射極的厚度增加到 1 μm ，如此可以降低一半因橫向電流 (lateral current) 所產生的串聯電阻。在 p 型砷化鎵射極層上，為 p 型窗口層，其材料、摻雜濃度及厚度在 3-2 節“太陽電池窗口層之研究”有詳細說明。最後在窗口層上，長了一層 p⁺型的砷化鎵金屬接觸層 (p⁺-type GaAs contact layer)，由於窗口層為高能隙材料，與金屬之間的接觸電阻較大，所以利用這層 p⁺型砷化鎵金屬接觸層，降低金屬電極與太陽電池的接觸電阻。

在此計畫中，我們所設計之聚光用砷化鎵太陽電池結構與過去一般砷化鎵太陽電池不同的地方主要有 p 型砷化鎵射極層的厚度、p 型窗口層、p⁺型砷化鎵金屬接觸層。這些設計是為降低串聯電阻，

增加太陽電池穩定性，以及其他製程的考量，這些設計的原因，在下列各節相關部分將有更詳細的說明。

3-2 太陽電池窗口層之研究

在砷化鎵太陽電池的設計中，窗口層是非常重要的環節。不同於矽 (silicon)，砷化鎵是一種直接能隙的材料，其光吸收係數非常大，因此百分之八十的太陽光會在砷化鎵表面 $1\mu\text{m}$ 內被吸收，所以砷化鎵表面特性將嚴重影響砷化鎵太陽電池的效能。不過裸露的砷化鎵材料表面的表面態密度(surface states density)非常高，因此表面載子復合速度非常大($\sim 10^8$ cm/sec)，嚴重降低砷化鎵太陽電池的能量轉換效率。為了解決這個問題，一般的做法是在砷化鎵太陽電池表面，再長上一層晶格常數與砷化鎵匹配的高能隙材料(一般採用高含鋁量的砷化鋁鎵 AlGaAs)，利用這層高能隙材料阻擋砷化鎵中的少數載子(minority carrier)，降低表面復合效應的影響，同時，由於高能隙材料的吸光效率較差，大部分的太陽光可以穿透而進入砷化鎵中，所以又稱之為窗口層。圖 3-2 說明了窗口層的作用。

過去再砷化鎵太陽電池的製作上，都採用高含鋁量的砷化鋁鎵作為窗口層，主要的原因是砷化鋁鎵之晶格常數與砷化鎵幾乎完全匹配，在磊晶上的困難較少。但是砷化鋁鎵容易受濕氣及氧氣的影響而氧化，降低砷化鎵太陽電池的穩定性及可靠性。雖然砷化鎵太陽電池上的抗反射膜同時具有保護太陽電池的效果，但是聚光用砷化鎵太陽電池必須有長達 30 年的使用壽命，為了避免砷化鋁鎵窗口層可能造成的不良影響，我們進行不同材料的窗口層研究，希望找出取代砷化鋁鎵窗口層的材料。

在計劃中，我們採用 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (砷化鋁鎵)、 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ (磷化銦鎵)、 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ (磷化鋁鎵)等三種材料進行窗口層的研究，表 3-1 比較這三種材料的特性。一般而言，窗口層必須有較高的能隙，同時最好為非直接能隙，如此才能降低對入射光線的吸收率。在三種材料中， $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 與 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 都為非直接能隙材料，符合低光線吸收率的條件，但是由於含鋁，較易氧化。而 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 雖然為直接能隙材料，而且能隙只有 1.9 電子伏特，但是材料不易氧化，穩定性甚至比砷化鎵還好，同時根據國外研究機構發表的研究報告指出， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$ 介面的表面結合速度非常低，遠低於 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 與 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaAs}$ 的界面，因此是在本計劃中最希望使用的材料。

為了比較不同窗口層材料，實驗中成長三種太陽電池結構，搭配不同的窗口層，其他結構都相同。三種窗口層的厚度皆為 50 nm，而摻雜濃度則依據實驗中使用的有機金屬氣相磊晶系統所能達到的程度而有所不同， $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 為 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 為 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ， $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 為 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。我們將這些砷化鎵太陽電池結構，做成砷化鎵太陽電池，進行光頻譜響應量測。圖 3-3 是三種不同窗口層砷化鎵太陽電池之光頻譜響應比較，其結果顯示 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 窗口層仍然有較好的效率， $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層略差， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層較差。推測可能是 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 透光效率較差所造成，另外從照光 I-V 的結果顯示，三種不同窗口層的砷化鎵太陽電池其照光電流差距不大，只有 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層的砷化鎵太陽電池照光電流略低，與光頻譜響應之趨勢相類似。在照光開路電壓方面， $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 窗口層與 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層的太陽電池結果較好，約在 0.97V 到 0.98V 之間，但是使用 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層的砷化鎵太陽電池較差，只有 0.92V，這也許是 $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 的磊晶條件尚未最佳化所造成。

爲了降低 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層所造成的照光電流損失，我們也比較厚度 25 nm 與 50 nm 的 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層之影響，從圖 3-4 可以看到當降低 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層的厚度後，光頻譜響應變得相當好，量子轉換效率一直維持相當高的數值，到照光波長 350 nm 以下才開始下降。我們也曾嘗試將 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層的厚度降到 10 nm，但是發現當在進行太陽電池製程中的濕蝕刻時， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 窗口層會無法抵擋化學藥品而遭破壞，失去窗口層的效用。

根據這些研究結果，顯示在適當的厚度下， $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 也是很適合做爲砷化鎵太陽電池的窗口層，因此在接下來的實驗中，我們便採用 $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 做爲砷化鎵太陽電池的窗口層，繼續進行聚光式砷化鎵太陽電池的研發製作。

3-3 正面金屬電極的設計

一般太陽電池正面電極的圖案大致如圖 3-5 所示，但這種圖案的太陽電池引導電極，並不適合用在集光式太陽電池上，所以必須重新設計一個適合集光式太陽電池用的圖案。聚光太陽電池之電極的設計的重點，在於如何降低電池的串聯電阻，因爲在集光下產生的光電流非常的大，過高的串聯電阻將造成較多的發電功率損耗。一般太陽電池的串聯電阻來源有三項，一、是光電流產生後，流經電池內部所產生的電阻，二、是金屬電極與半導體之間的接觸電阻，三、是電極本身的電阻，我們所設計的新的正面電極圖形，可以改善第一、三項的電阻，其原因如下：

- 一、太陽電池產生光電流後，必須在射極(emitter)橫向流動，形成橫向電流 (lateral current)，最後到達正面電極的柵狀部分才

能被導引出來，如圖 3-6 所示。由於由於砷化鎵太陽電池射極的厚度很薄，一般約 $0.5\mu\text{m}$ ，而半導體的導電性又不如金屬良好，所以此橫向電流會遭遇相當大的橫向電阻。一般非集光式的電極圖案（圖 3-5），以 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的太陽電池而言，金屬柵狀電極的間距為 0.05cm ，如果 p-型射極的厚度為 $5 \times 10^{-5}\text{cm}$ ，而摻雜濃度為 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ，則電阻係數約為 $1 \times 10^{-2}\Omega\text{-cm}$ ，根據理論上的估算，電池上的橫向電阻約為 0.125Ω ，這個電阻值也許看起來很小，但是在聚光 100 倍的條件下，電池產生的電流約 2 安培，所以理想砷化鎵太陽電池（串聯電阻為零）的輸出約為 2 瓦，但是如果考慮串聯電阻，由 $P = I^2R$ 估計，電能損失將達 0.5 瓦，佔理想太陽電池輸出的 25% 左右，當聚光強度更強時，電能損失更大。為了降低這部分的損耗，必須增加柵狀電極的密度，降低電池內的橫向電阻。

二、 因為由集光透鏡集光後，聚焦的光點為圓形，如果使用一般太陽電池方形電極圖案，集光效率會較差，同時也會有較高的串聯電阻值，無法順利將電流導出。為了提高集光效率及順利導出光電流，電極圖案要呈圓形，而柵狀電極最好排列成輻射狀。

針對上述要求，我們設計了新的金屬電極光罩圖形，如圖 3-7 所示。重點是柵狀電極的密度很高，降低橫向電阻，同時排列成輻射狀，以利電流的導出。而柵狀電極的寬度有三種，分別為 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ ，所對應的遮光面積比例分別為 5%、9.9%、17.93%。使用柵狀電極較窄的光罩，遮光面積小，光電流較高，但是金屬電極本身的電阻也比較高，會造成較大的功率損失，因此能量轉換效率未必會比較好。我們將從實際量測結果去挑選較佳的電極圖形。

另外，由於這種聚光太陽電池的柵狀電極寬度比較窄，會造成電極圖案的曝光顯影都比較困難，而且金屬電極的蒸鍍製做也需注意，因此在電池結構磊晶完成後的接續製程也必須仔細研究設計。

3-4 砷化鎵太陽電池其他製程研究

砷化鎵太陽電池在完成結構磊晶後，必須繼續進行其他製程，這些製程包括金屬電極與抗反射膜的製做等，其流程與原因如下：

1. 使用 PECVD 在樣品表面成長一層 Si_3N_4 薄膜。

由於製作正面金屬電極圖案需要使用光阻(photoresistance)，這個步驟利用 Si_3N_4 薄膜保護樣品表面，避免光阻殘存於樣品表面。我們在進行砷化鎵製程時發現，如果沒有使用 Si_3N_4 薄膜保護樣品表面，會有少量肉眼或顯微鏡下也無法察覺的光阻殘存在樣品表面，當金屬蒸鍍在砷化鎵太陽電池上時，這些殘存光阻會降低金屬在砷化鎵的附著力，嚴重時會導致完全無法附著在砷化鎵表面。先利用 Si_3N_4 薄膜保護樣品表面，當微影成像的曝光及顯影步驟完成後，此時光阻是殘存在 Si_3N_4 薄膜上，接著使用氟化氫溶液去除 Si_3N_4 後，殘存光阻也會隨著 Si_3N_4 薄膜而被移除。圖 3-8 顯示使用 Si_3N_4 薄膜保護樣品表面的效果，用 Si_3N_4 薄膜保護的樣品，其金屬電極在熱退火後依然非常平滑，但是沒有用 Si_3N_4 薄膜保護的樣品，其金屬電極在熱退火後則出現一些膨脹的氣泡，這是由於殘存的光阻加熱後膨脹所造成。

2. 在樣品正面上一層光阻，然後利用微影成像的方式，在光阻上製

作出正面金屬電極所需的圖案，然後用氟化氫（HF）溶液去除圖案下的 Si_3N_4 。

爲了在樣品表面鍍上所需的金屬電極圖案，必須使用微影成像的方式，先在樣品表面做出電極圖形。其方式是先在玻璃光罩上做出所要的金屬電極圖案，然後在樣品表面上一層光阻，接著用曝光的方式將光罩圖案轉換到光阻上，再用顯影液將不要的光阻去除。爲了能將蒸鍍後不要的金屬順利剝除（lift-off），必須使用影像反轉（image reversal）方式來進行微影成像，影像反轉與一般正常的微影成像方式比較可用圖 3-9 及圖 3-10 來說明。其實影像反轉是利用特殊的化學添加劑與曝光方式將正光阻做爲負光阻使用，由於去除負光阻時要用到硫酸等化學藥品，而硫酸會侵蝕砷化鎵材料，所以必須以影像反轉的方式來代替使用負光阻。在進行微影成像的顯影步驟時，必須找到正確的顯影時間，如果顯影時間過短，則光阻邊緣的剖面會呈垂直的狀況，如圖 3-11 所示，這種狀況會造成蒸鍍後，不要的金屬無法順利剝離。在適當的顯影時間下，光阻邊緣的剖面會呈向下內凹的狀態，如圖 3-12 所示，在這種狀態下，不要的金屬可以順利被剝離去除。

3. 使用熱蒸鍍的方式，在樣品正面蒸鍍金鈹合金（Au/Be alloy Au:Be = 99:1）做爲金屬電極。

由於實驗中砷化鎵太陽電池的正面爲 p 型砷化鎵，必須使用金鈹合金才能形成良好的歐姆界面，降低接觸電阻。由於正面電極會遮蔽部分太陽光，降低轉換效率，所以必須盡量降低正面電極面積與太陽電池面積的比例，但是降低正面電極面積比例又會提高串聯電阻，爲了避免串聯電阻提高，必須增加電極的厚度，

在此實驗中，正面電極的厚度在 $1\mu\text{m}$ 以上。

4. 將樣品泡在丙酮（ACE）溶劑中，去掉光阻，同時也去掉不要的金屬。

在利用丙酮去除光阻時，可以用超音波震盪器做為輔助，較快速將不要的金屬部分剝離，但是超音波震盪器的震盪強度不可太強，否則砷化鎵太陽電池會碎裂。

5. 將樣品泡在氟化氫溶液中去掉 Si_3N_4 薄膜，接著用氨水加雙氧水所合成的溶液蝕刻去除無金屬電極覆蓋部分的砷化鎵金屬接觸層（GaAs contact layer）。

砷化鎵金屬接觸層可以降低電極金屬與半導體的接觸電阻，但是卻會阻擋太陽光進入太陽電池中，所以無金屬電極覆蓋的部分，必須將砷化鎵金屬接觸層除去。要將砷化鎵金屬接觸層除去，首先要用氟化氫溶液蝕刻去掉先前鍍上的 Si_3N_4 薄膜，由於氟化氫溶液對砷化鎵材料及金屬的蝕刻速率非常低，所以幾乎不會破壞砷化鎵太陽電池。接著再用 $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 15$ 的溶液蝕刻砷化鎵金屬接觸層。這個溶液對砷化鎵材料與磷化銦鎵（GaInP）材料的蝕刻選擇性相當好，所以當砷化鎵金屬接觸層被蝕刻完成後，就不會繼續蝕刻磷化銦鎵窗口層。不過我們發現蝕刻的時間仍然相當重要，當蝕刻時間過短時，窗口層上的砷化鎵無法完全被去除，會影響砷化鎵太陽電池的效能。從光頻譜響應量測結果我們發現，蝕刻時間不足會導致太陽電池的量子轉換效率降低，尤其在短波長部分更為明顯。但是過長的蝕刻時間會導致柵狀金屬電極剝落，同時太陽電池的照光開路電壓 V_{oc} 降

低，這些過度蝕刻的樣品其表面在顯微鏡下呈現許多方形凹洞，如圖 3-13 所示，我們認為應該是氨水溶液透過樣品表面的磊晶缺陷向下侵蝕的結果。經過許多嘗試，我們得到在室溫下，蝕刻時間 25 秒到 40 秒可以獲得最佳結果。

6. 使用 PECVD 再度在樣品表面成長一層 75 nm 厚的 Si_3N_4 薄膜，做為抗反射膜 (AR coating)。

砷化鎵材料的折射率 n 值約為 3.856 左右，所以對於單層抗反射膜材料，其最佳 n 值為 $(3.856)^{1/2} = 1.964$ 左右，而用電漿輔助成長方式 (PECVD) 所成長的 Si_3N_4 薄膜其折射率約為 1.9~2.0 左右，其值恰巧落在最佳值附近，所以我們使用 Si_3N_4 做為抗反射膜材料。由於砷化鎵太陽電池所吸收光線波長範圍從 350 nm 到 870 nm 左右，所以反射率的最低點最好落在 550 nm 到 600 nm 之間，根據公式，抗反射膜厚度 $d = \lambda / 4 * n$ ，所以抗反射膜的厚度約為 75 nm 左右。

7. 再次在樣品正面上一層光阻，然後利用微影成像的方式，在光阻上製作出抗反射膜的圖案，然後用氟化氫 (HF) 溶液去除不要的 Si_3N_4 薄膜，露出部分金屬電極供引導電流。
8. 使用熱蒸鍍的方式，在樣品背面蒸鍍金鍺合金 (Au/Ge alloy, Au:Ge = 88:12) 做為背面金屬電極。

由於實驗中砷化鎵太陽電池的背面為 n 型砷化鎵，必須使用金鍺合金才能形成良好的歐姆界面，降低接觸電阻。

9. 利用熱退火機台，在 400°C 加熱一分鐘，降低金屬電極與半導體之間的接觸電阻。

在完成正面與背面金屬電極的製作後，必須在高溫進行熱退火，進一步降低金屬電極與半導體材料間的接觸電阻。

3-5 砷化鎵太陽電池之測試

製作完成之砷化鎵太陽電池，必須進行測試，以了解太陽電池的性能。實驗中的測試主要有三種：(1) 太陽電池的光頻譜響應 (spectral response) 量測。(2) 太陽電池的效率量測。(3) 太陽電池在聚光下的電壓電流特性量測。其詳細說明如下：

- (1) 太陽電池的光頻譜響應 (spectral response) 量測：光頻譜響應量測可以了解太陽電池對各種不同波長入射光之吸收狀況。實驗中使用 Xenon lamp 作為光源，先經過單頻儀後將光源分成單頻光，然後投射在砷化鎵太陽電池上，測量其產生之光電流。最後再用一已知光頻譜響應之標準砷太陽電池校正結果。圖 3-14 為光頻譜響應之量測結果，其中圖 3-14(a) 為效率達 20% 之砷化鎵太陽電池光頻譜響應圖，在我們的實驗中，只要製程沒有發生問題，都可以達到此結果。而圖 3-14(b) 的結果是磷化銻鎵窗口層過薄的砷化鎵太陽電池，由於窗口層太薄，在濕蝕刻時無法抵擋化學藥品的侵蝕，所以遭破壞而失去窗口層的功效，導致量子轉換效率隨波長變短而下降。
- (2) 太陽電池效率量測：製做完成之太陽電池，必須使用太陽光源模擬系統，在 AM 1.5, 100 mW/cm² 的照光條件下，測量其效率。同樣地，只要實驗中製程沒有發生問題，所製作出的砷

化鎵太陽電池的能量轉換效率都可以達 20%。圖 3-15 是砷化鎵太陽電池效率量測之電流電壓關係圖。

- (3) 太陽電池在聚光下的電壓電流特性量測：由於太陽電池在聚光時產生的光電流相當大，所以電池內部的串聯電阻會降低轉換效率，另外，聚光時會提高電池的溫度，也會影響電池的效率，所以我們在聚光下進行電壓電流量測，了解聚光時電池特性。在實驗室中，我們使用 Xenon lamp 作為光源聚光量測，聚光後光強度約為 1.2 W/cm^2 ，大概是 12 倍的太陽光聚光強度，在此狀況下，電池產生的光電流大約為 0.25 A，而電池的照光開路電壓穩定維持在 1 V 左右。在量測中我們發現，在大電流的情形下，一般用兩個探針測量電壓電流的方式並不適用，因為探點接觸電阻和量測導線上的電阻會嚴重影響量測結果，圖 3-16 是使用兩點探針方式的聚光下太陽電池電壓電流量測結果，由於探點接觸電阻和量測導線電阻的影響，導致 Fill factor (FF) 只有 66.11%，最大輸出功率為 165.74 mW。當改用四點探針量測法後，我們可以確切測量元件上的電壓電流關係，而不受探點接觸電阻和量測導線電阻的影響，圖 3-17 是使用四點探針方式的聚光下太陽電池電壓電流量測結果，其結果顯示 Fill factor (FF) 增加到 81.67%，最大輸出功率為 204.88 mW。

四、集光模組的設計與製作

4-1 集光模組的設計

在模組中裝設集光透鏡是集光模組的特點，當光線進入集光透鏡後，可以依所調整透鏡與太陽電池之間的距離而將光線聚焦成所要的面積大小，如此一來即可集光，但其他部分亦需特別設計才能將集光後的效率發揮到最大。如散熱設計、太陽電池設計、電極接觸以及整體的架構設計都是重要的考量。

圖 4-1 是我們所設計的集光模組簡圖。在最上方用四個 Fresnal 透鏡組成透鏡組，利用金屬支撐架將 Fresnal 透鏡與底板相連接，而在每一個 Fresnal 透鏡下有一個電池模組盒，圖 4-2 為電池模組分解圖。

整個集光模組的重要部分包括了：

- 1、 佛斯耐透鏡 (Fresnal lens)
- 2、 接面透鏡 (Secondary lens)
- 3、 太陽電池 (Solar cell)
- 4、 接觸電極 (Electrical contact)
- 5、 BN 絕緣板(Isolation BN disk)與散熱銅板(Copper heat spreader)
- 6、 電池模組盒 (Cell module box)

接下來將逐一介紹各部分的設計理念。

4-2 佛斯耐透鏡：

在集光模組中，將使用兩個透鏡，一為集光透鏡，另一個透鏡是為降低因聚焦誤差所造成的光線損失，稱為 Secondary 透鏡。集光透鏡的主要功用是集光，選擇集光透鏡有幾個重點：輕薄、透光性佳、聚焦容易，焦距適中。高倍率的透鏡必須有較小的曲率半徑，當聚光透鏡的面積很大時，透鏡的厚度將會太厚，重量也會太重，由於太厚太重的緣故我們無法使用這一類的透鏡；所以一般玻璃製的凸透鏡，並不適合用在高集光倍率的集光模組上，必須選用特殊的透鏡。我們採用 Fresnal 透鏡作為集光透鏡，Fresnal 透鏡如圖 4-3 所示，它的厚度相當薄（2 mm），所使用的材質為壓克力（Acrylic），因此非常的輕。

在光的穿透率方面，砷化鎵太陽電池主要的吸光範圍為 350 nm~870 nm，而 Fresnal 透鏡在這一部份波長的透光率高達 90%以上，如圖 4-4 所示，這種透光率是可以接受的。Fresnal 透鏡聚焦點設計可長可短，可以自由選擇所需的透鏡，Fresnal 透鏡有許多規格，EFL：焦點長度（mm），Dimensions：尺寸（mm），DIA：直徑（mm）CT：厚度（mm）。選擇 Fresnal 透鏡需注意下列幾點。

- (1) 希望能選擇 EFL 為 100mm 到 200mm 之間的，因為太長的焦距會增加空間，太短會影響收光的效率。
- (2) 希望集光倍率在 400 倍以上，對於集光式砷化鎵太陽電池而言 100 倍到 600 倍將會有最高效率，如圖 4-5，而且要有效降低電池成本，集光倍率需達 400 倍以上。

目前透鏡廠商現有的規格中，沒有完全相符我們需要的透鏡，如要訂作價格相當高，故我們選用 EFL：286.0，DIA：250 的 Fresnal 透鏡，其焦點為 286mm，雖然大了點但可以用這個透鏡來嘗試看看，實際上量產時可以訂做比較適合的 Fresnal 透鏡，模組中使用的太陽電池尺寸為直徑 1 cm，而 Fresnal 透鏡為 DIA：25cm x 25cm，所以估算這個系統的集光倍率為 625 倍，已可以達到所要求倍率。而且 Fresnal 透鏡是用壓克力材質所製，所以非常的輕，適合放置在架高的位置上。

4-3 接面透鏡 (Secondary lens)：

Secondary 透鏡的設計主要是要將 Fresnal 透鏡入射聚焦的光，利用光學全反射的原理將之大部份引導置太陽電池上，雖然 Secondary 透鏡會反射少部分的入射光，但是可以提高聚焦誤差的容忍度。一般選擇 Secondary 透鏡有以下幾個重點，必須透光率良好、價格便宜、容易製作任意形狀、於是選用 BK7 材質的透鏡，BK7 對太陽光的透光率可如圖 4-6 所示，我們可以看到 BK7 亦在 300~1000nm 波段上有很好的透光率，高達 90%以上。由於 BK7 的價格便宜且材質容易磨，我們將 BK7 磨成長錐型，如圖 4-7 所示，其設計全反射的理論很簡單，以下即為其說明。

在 Secondary 透鏡中，我們要造成全反射條件，由思奈耳定律 (Snell's law)： $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

我們做以下的估計：根據圖 4-8

$$n = \sin \theta_3 = 1 \times \sin 90 = 1$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$$

$$90^\circ - (\alpha + \theta_2) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{n}\right)$$

$$(\sin \theta_1 = n \sin \theta_2)$$

$$\therefore 90^\circ - \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{n}\right) > \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \dots \dots \dots (1)$$

for

$$n = 1.45, \text{ from (1) } \rightarrow 90 - \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{1.51}\right) \geq 41.47$$

$$\Rightarrow 48.53 \geq \alpha + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{1.51}\right)$$

$$(i) \text{ if } \alpha = 0^\circ - \rightarrow \frac{\sin \theta_1}{1.51} \leq \sin 48.53 = 0.749 \Rightarrow \theta_1 \leq \sin^{-1}(1.130) \approx 90^\circ \dots \dots \dots (2)$$

$$(ii) \text{ if } \theta_1 = 45^\circ - \rightarrow 90 - \alpha - 27.922 \geq 41.47 \Rightarrow \alpha \leq 20.6 \dots \dots \dots (3)$$

$$(ii) \text{ if } \alpha = 18.41^\circ - \rightarrow 30.12 \geq \sin^{-1}\left(\frac{\sin \theta_1}{1.51}\right) \dots \dots \dots (4)$$

$$\Rightarrow \theta_1 \leq \sin^{-1}(0.7577) \approx 49.26$$

由入射光對 Secondary 透鏡之間的光行進條件用思奈耳定律作簡單的推算，由圖 4-8 中入射光與法線夾角稱為 θ_1 ，鏡面的傾斜度 α 、 θ_2 、 θ_3 就如圖上所示，(1) 式中可以看出入射角 (θ_1) 與折射率 (n) 在鏡面內的全反射條件，在 Secondary 透鏡是用 BK7 的材質其折射率為 1.51 將其帶入。

一、假設鏡面的傾度 α 為 0° ：來作一些估計如 (2) 式所得，可以很清楚的看到在小於 90° 的光都能完全全反設置太陽電池上，光可以很容易的引導到太陽電池上，但這種 Secondary 透鏡有缺點，就是上面的寬度與下面的寬度相等，意思是說 Secondary 透鏡為圓柱狀的，如果太陽電池面積小，那透鏡的受光面積亦相對的減

小，因為波長不同的光經過 Fresnal 透鏡聚焦後焦點不同，而造成光無法完全打在 Secondary 透鏡上時，就會有很高的損失。

- 二、增加 Secondary 透鏡的對光的接觸面積是很重要的，所以設計錐型的 Secondary 透鏡將可方便光的收集，。對於錐形透鏡要傾斜角度我們作一些估計，我們假設我們入射光的夾角為 45° 帶入(1)式得(3)式我們發現在傾斜 20.6° 就可以全部都收集到了。
- 三、設計的 Secondary 透鏡的傾斜角為 18.41° ，帶入(1)式可得(3)式，可知入射角 θ_1 為 49.26° 之內的光都可以接收到太陽電池上，而從 Fresnal 透鏡往下算發現聚焦後的光線夾角大約為 26.2° 遠小於 49.26° ，由以上的分析可知到此種 Secondary 透鏡可以將 Fresnal 透鏡聚焦的光完全的引導到太陽電池上。

亦有人用不同結構的 Secondary 透鏡，如在錐型面加上半圓形的透鏡面，使得光線是打在半圓弧面上，這樣可以增加對於大角度的入射光的收集，但製作上比較困難，成本也較高，所以我們選用平錐式的 Secondary 透鏡，這樣在製作上有很大的便利性，圖 4-9 為太陽光入在 Secondary 透鏡上的示意圖。

估計太陽光入射到太陽電池上理想百分比，從太陽光入射太陽電池上我們大概的估計一下可得 90% (fresnal lens 透光率)
*90%(Secondary lens 透光率)=81%，如果不考慮其他的散失最後到達太陽電池最高的光大約是 81%。一般會有其他效應出現，在此並未考慮其他效應。

4-4 太陽電池：

集光模組內的太陽電池，我們使用自行製作的高效率砷化鎵太陽

電池，測試其在高倍聚光下的效能。

4-5 接觸電極的部分：

接觸電極的功用在於將太陽電池的光電流引導至導電板上，可分為正面電極與背面電極，在正面電極部分需要導電良好且容易彎曲的材質，因為在正面的電極接觸面積小，故需用探點的方式將電流引導出來，於是使用銅片做正面電極接觸，並利用金屬彎曲產生的形變來增加電極與太陽電池之間的接觸緊密性，越緊密可降低太陽電池電阻，同時可以固定太陽電池，而且用探點的方式可便於更換太陽電池。在背面電極部分，因為太陽電池的背面即為電極，故將銅箔或金箔黏在絕緣的 BN 板上，當作是背面接觸電極的部分，其設計圖如圖 4-10 所示。

4-6 散熱板的設計：

太陽電池的操作環境溫度會對轉換效率有相當大的影響，可以從圖 4-11 看的出來，雖然我們是使用砷化鎵的太陽能電池，對溫度的效應較小，但在集光模組下，由於集光的關係太陽光集中在一點，相對的溫度將會增加到很高，所以設計散熱裝置是非常重要的一點，在這方面需作一些設計，在集光模組上用了雙重散熱裝置。一、BN 的散熱板，BN 這的材質一般使用在分子束磊晶（MBE）上用來當導熱的基板。選用 BN 來做太陽電池散熱基板應當是相當好的，同時 BN 是絕緣體，不會發生短路。散熱片所放置的位置是在太陽電池的正下方，BN 形狀如圖 4-12 所示。二、銅製散熱板，希望選擇導熱良好材質所以用銅，銅板位置放置在 BN 下方可將 BN 上的熱傳導至基板

上，由以上的設計將可使得因為集光而產生的熱效應減到最低。

4-7 電池模組盒 (Cell module box) :

模組盒的設計重點是在，輕巧、散熱、方便製造，用塑膠製的模組盒可以很容易的製作我們想要的形式，但在集光系統中模組會產生高溫，使用塑膠材質其散熱不良，會影響太陽電池的效率，所以選用鋁這種材質製作，鋁本身很輕且容易製成我們需要的形狀，模組盒可分兩個部分一是蓋子的部分如圖 4-13 與底座部分如圖 4-14 所示，在蓋子的部分，上方有一個孔洞，這個孔洞的主要目的是為了放置 Secondary 透鏡，其圓孔的大小就等於 Secondary 透鏡的尺寸，在蓋子的兩旁有兩個方型的洞是用來接出電極的；在底座的部分而言我們的太陽電池就是放在底座上，故需注意到散熱問題，所以選用的材質為銅，因為銅的散熱良好，將上下組合即為我們的模組盒如圖 4-15。

4-8 整體結構組合：

在底部為了使的整體的模組穩固，所以設計了一個底板如圖 4-16 所示，在底板上鑽了很多的孔洞，亦將電池模組盒放在設計的孔洞中，增加電池模組盒的穩地性，最上層的 Fresnal 透鏡用金屬支撐架，將 Fresnal 透鏡支撐在適當長度上，支撐架的設計圖如圖 4-17 所示，為了方便調整聚焦，設計兩端有螺紋可用螺絲做上下調整的支撐架。圖 4-18、圖 4-19 與圖 4-20 為集光太陽電池模組之分解零件照片以及組合後之照片。

五、結論及建議

在此計畫裡，我們改良的砷化鎵太陽電池的設計，使之更適合在高倍率聚光條件下操作，也更詳細的研究砷化鎵太陽電池製作程序，提昇電池的製作良率。另外也研究集光模組的設計與製作，供砷化鎵太陽電池測試使用。完成的工作項目有：

- 1、研究使用不含鋁的磷化銦鎵 (GaInP) 材料作為砷化鎵太陽電池的窗口層，以提昇太陽電池的穩定性及使用壽命。
- 2、設計集光式砷化鎵太陽電池專用的正面電極圖形，降低串聯電阻的影響，並且研究各項砷化鎵太陽電池製程，提高製作良率。
- 3、設計並製作集光式太陽電池模組，供研究及測試使用。

合乎環保意識的能源一直是大家所追求的目標，而乾淨無污染的太陽能正是最符合此目標的能源。雖然目前從經濟效益與台灣的能源開發政策來看，太陽電池發電仍然處於成本過高，發電量不大，佔地過多等劣勢，但是我們認為仍然必須要持續開發太陽電池發電這項技術，如此將來要正式應用此發電方式時，才會有足夠的技術與人才。

六、参考文献

- [1] J. M. Olson et al., 'Ultralow recombination velocity at $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ heterointerfaces', Appl. Phys. Lett. 55(12), 1989, p1208
- [2] Sarah R. Kurtz et al., 'High efficiency GaAs solar cells using GaInP2 window layers', Proc. Of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1990, p138
- [3] H. Matsubara et al., 'GaAs Solar Cell with GaInP Window Grown by All Metalorganic Source MOVPE', Proceedings of First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994, p1871
- [4] Neil Kaminar, "High-Efficiency, Low-cost, Passively-Cooled PV Concentrator Module", Contractor report, SAND84-7025, UC-63c, 1985

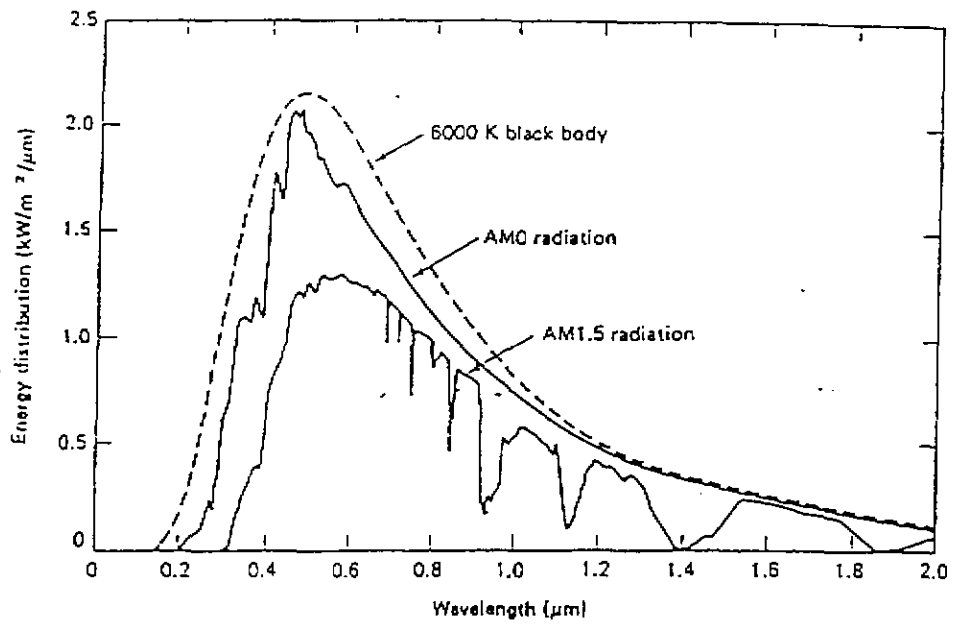


圖 2-1 太陽輻射 AM0、AM1.5 與 6000K 黑體輻射之能譜分佈

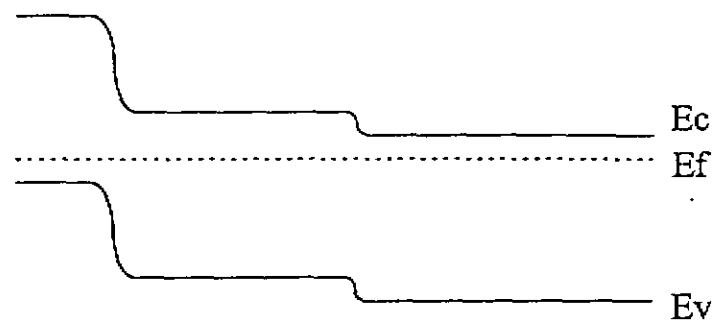
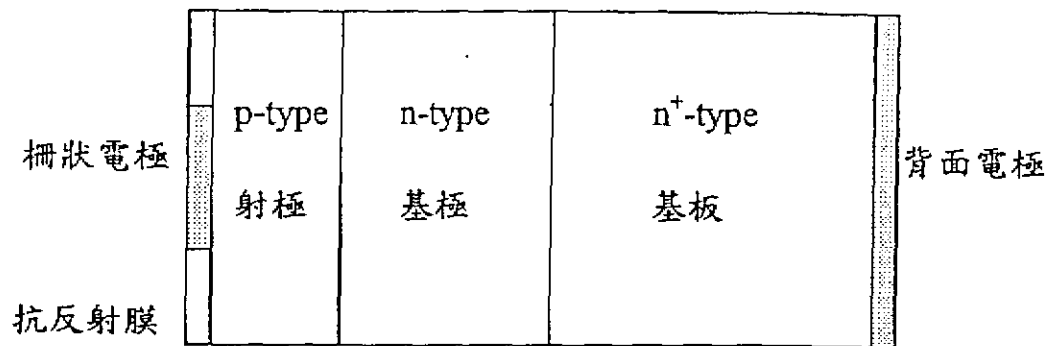


圖 2-2 P-N 接面太陽電池之結構及能帶示意圖。

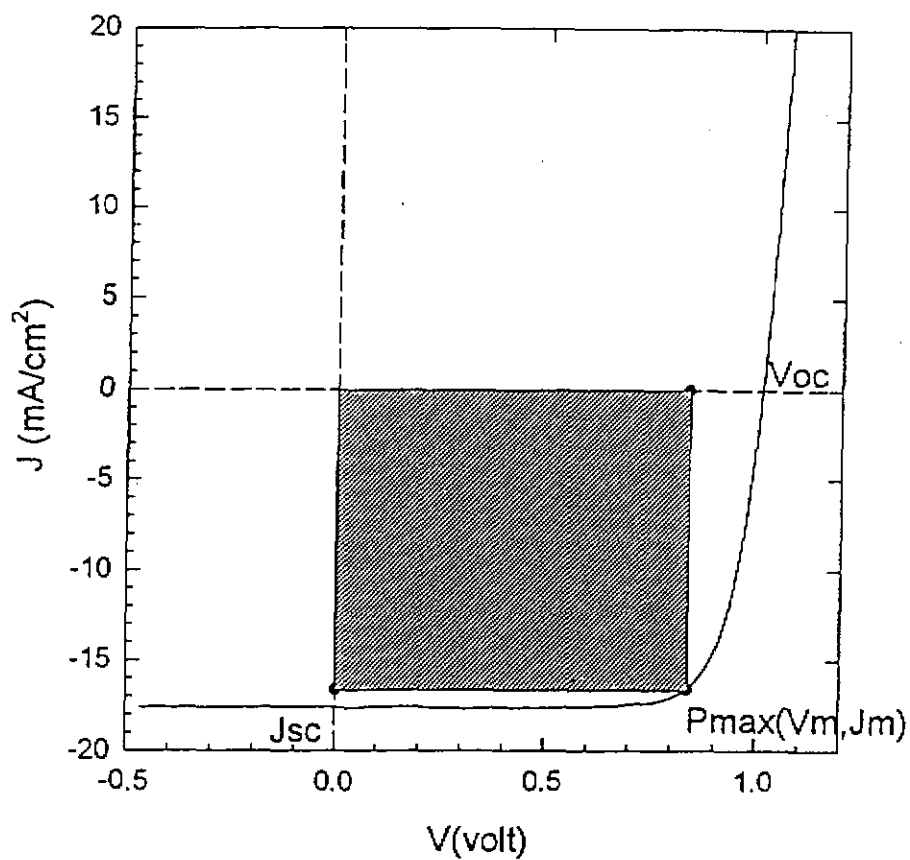


圖 2-3 太陽電池在照光條件下之電流-電壓曲線，
圖中並標示出短路電流 J_{sc} 、開路電壓 V_{oc} 、
及充填因子 FF

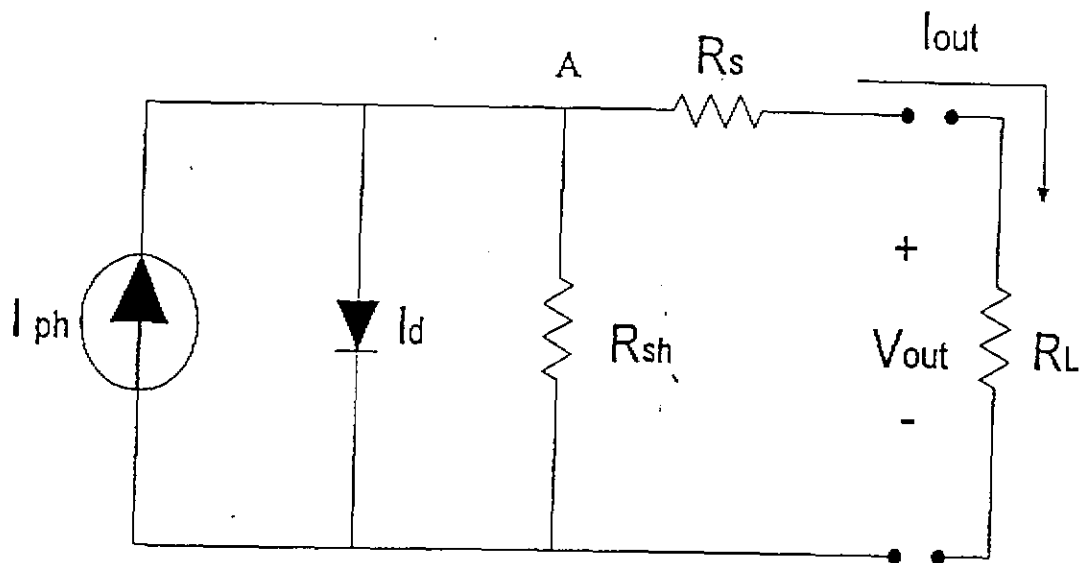


圖 2-4 單接面太陽電池之等效電路圖。其中包括電流源 I_{ph} ，為太陽電池照光後所產生的光電流；二極體的電流 I_d 、串聯電阻 R_s 、並聯電阻 R_{sh} 、負載 R_L 、輸出電流 I_{out} 、輸出電壓 V_{out} 。

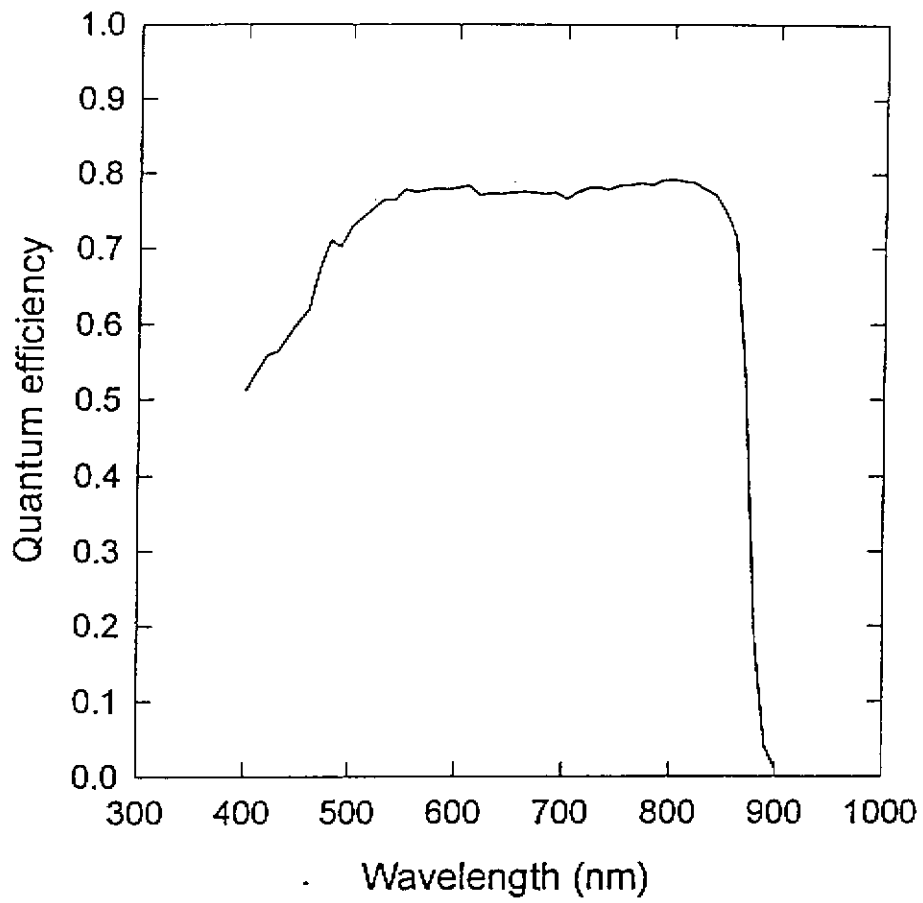


圖 2-5 GaAs 太陽電池的頻譜響應量測圖

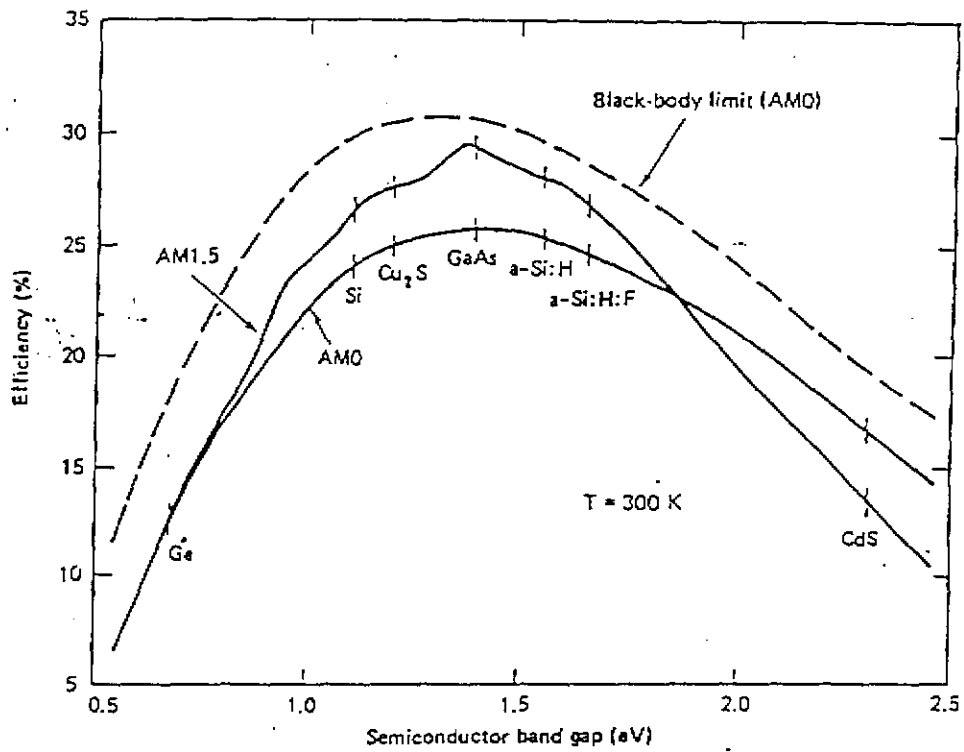
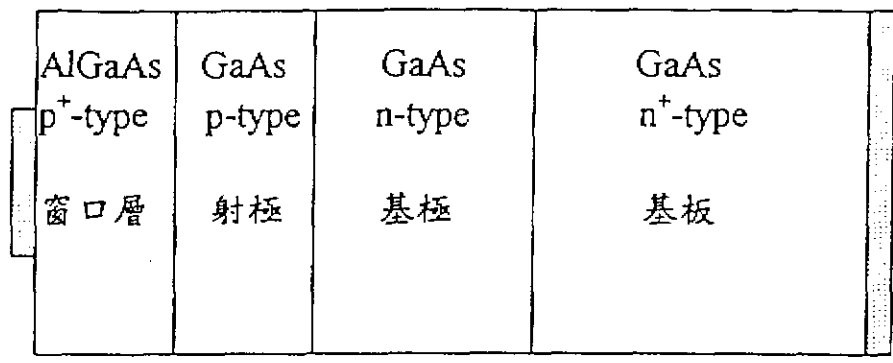


圖 2-6 太陽電池之理論轉換效率與半導體之能隙寬度的關係。圖中包括在 AM0、AM1.5 以及 6000K 黑體輻射下的轉換效率。



Au/Be
柵狀電極

Au/Ge
背面電極

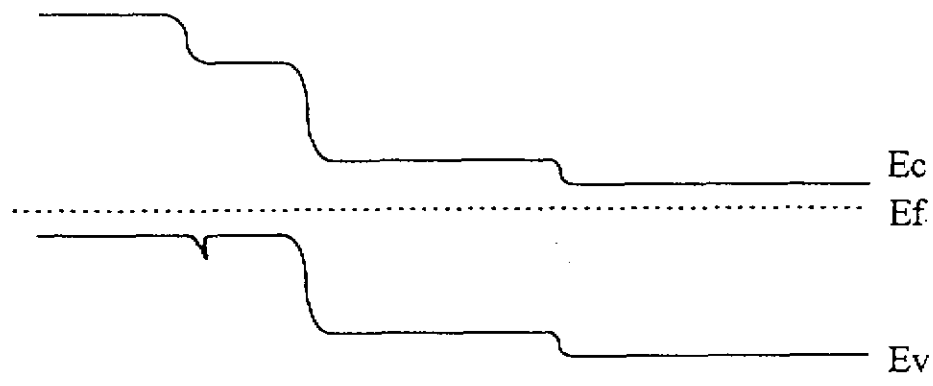


圖 2-7 AlGaAs/GaAs 異質接面太陽電池之結構及能帶示意圖。

	$\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$	$\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$	$\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$
能隙大小(band gap)	2.09 eV	1.9 eV	2.4 eV
能隙形式	非直接能隙	直接能隙	非直接能隙
材料穩定性	差	非常好	普通
磊晶困難程度	簡單	普通	困難
窗口層/砷化鎵介面之 載子結合速度	$\sim 10^4$ cm/sec	$\sim 10^2$ cm/sec	$\sim 10^6$ cm/sec

表 3-1 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$, $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 三種窗口層材料之比較

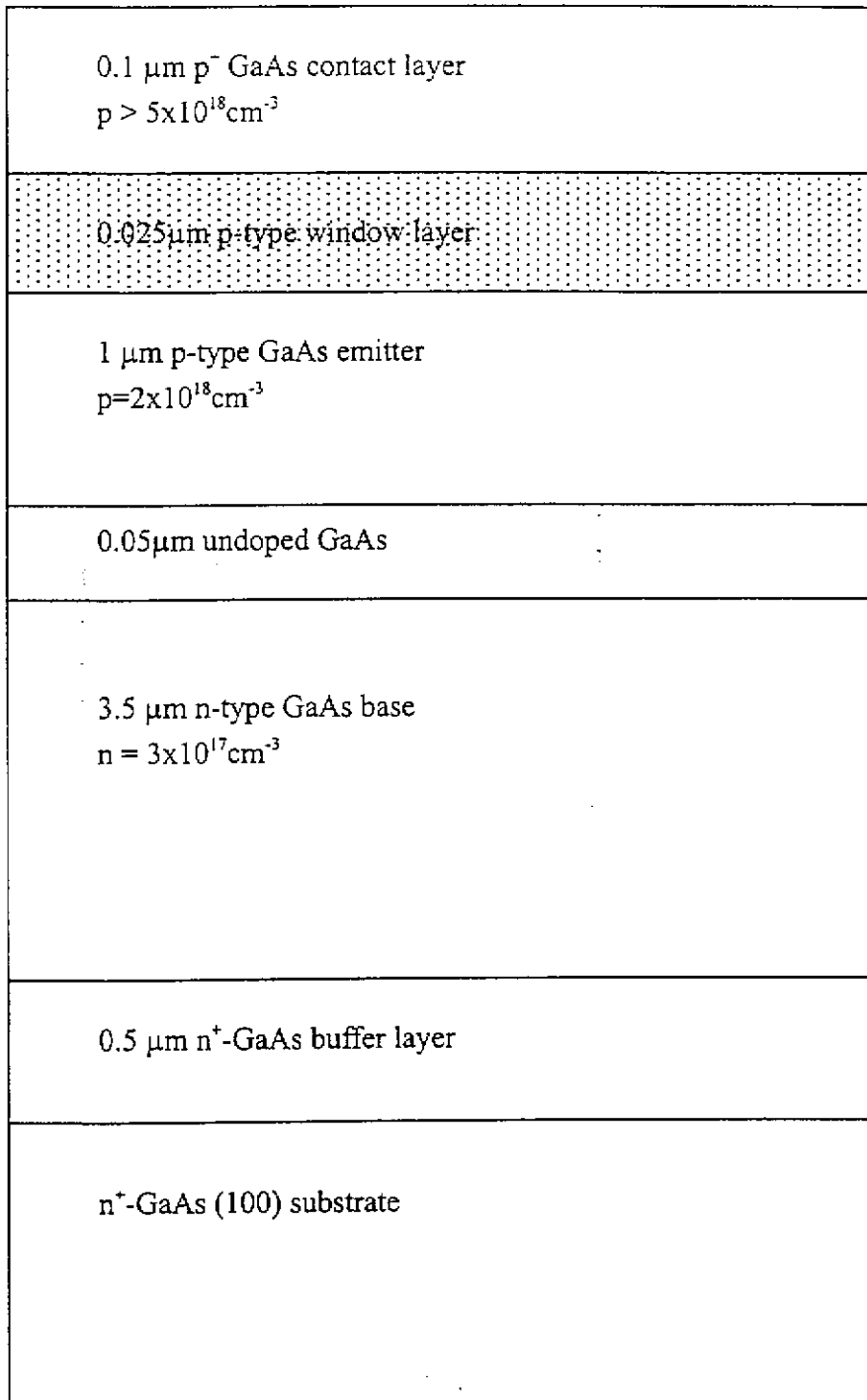
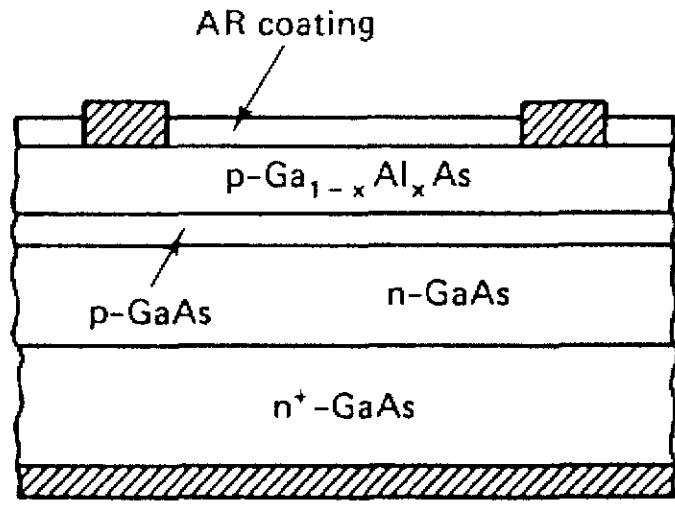
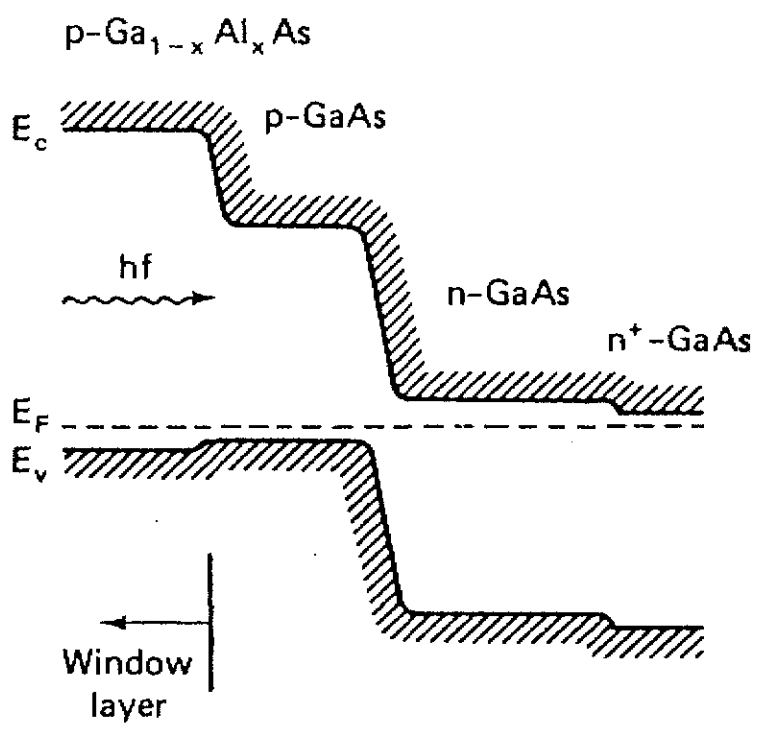


圖 3-1 集光式砷化鎵太陽電池磊晶結構圖



(a)



(b)

圖 3-2 砷化鎵太陽電池及其窗口層

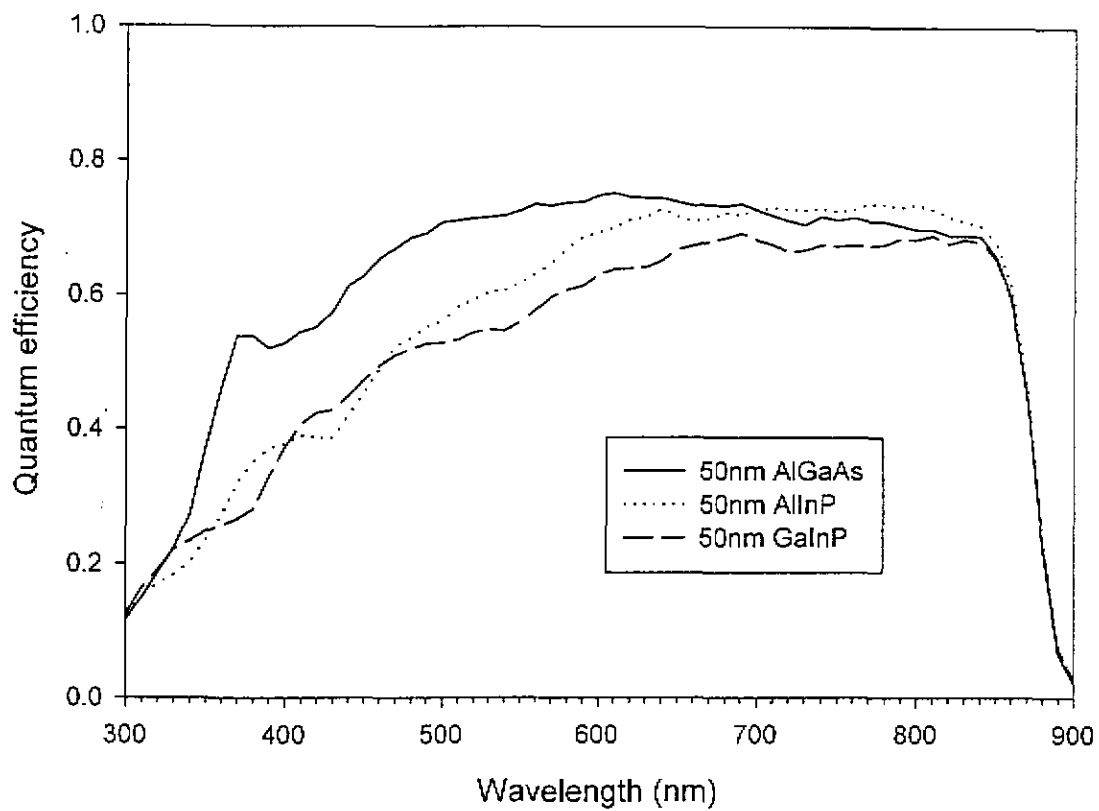


圖 3-3 不同窗口層材料之砷化鎵太陽電池光頻譜響應圖

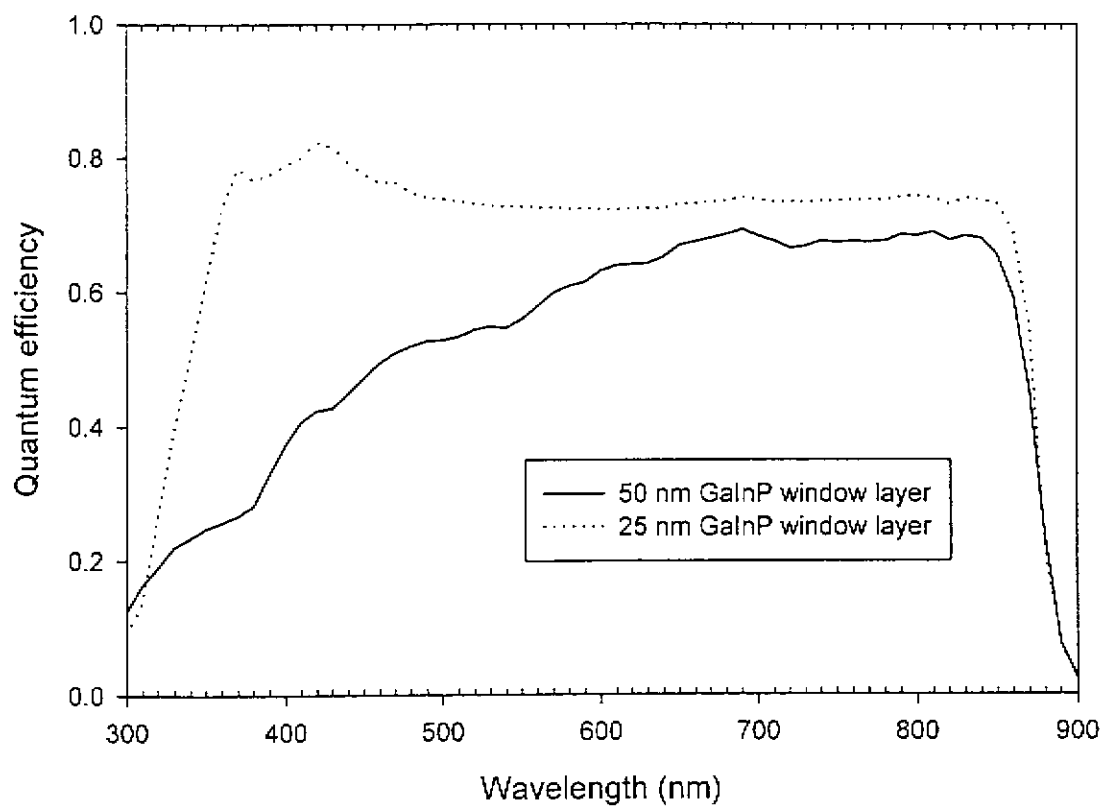


圖 3-4 不同磷化銦鎵 (GaInP) 窗口層厚度之砷化鎵太陽電池之光頻譜響應圖

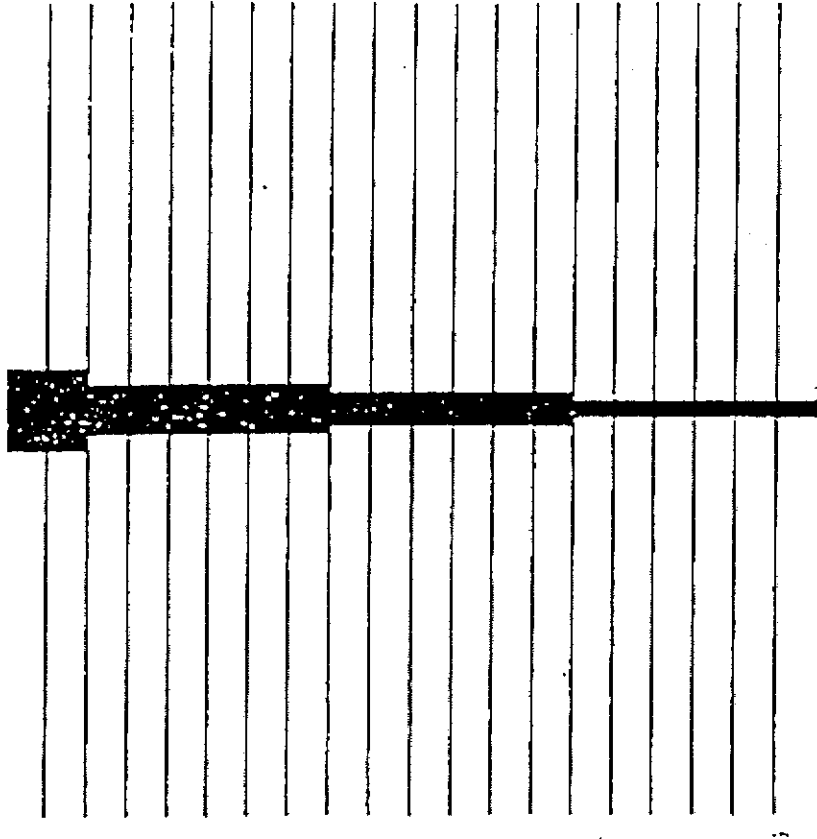


圖 3-5 非集光式太陽電池光罩圖

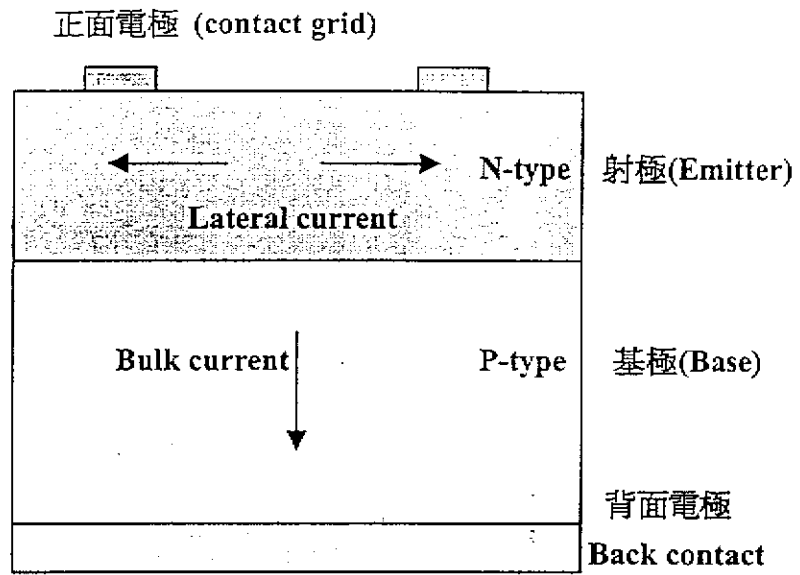


圖 3-6 太陽電池內的橫向電流圖

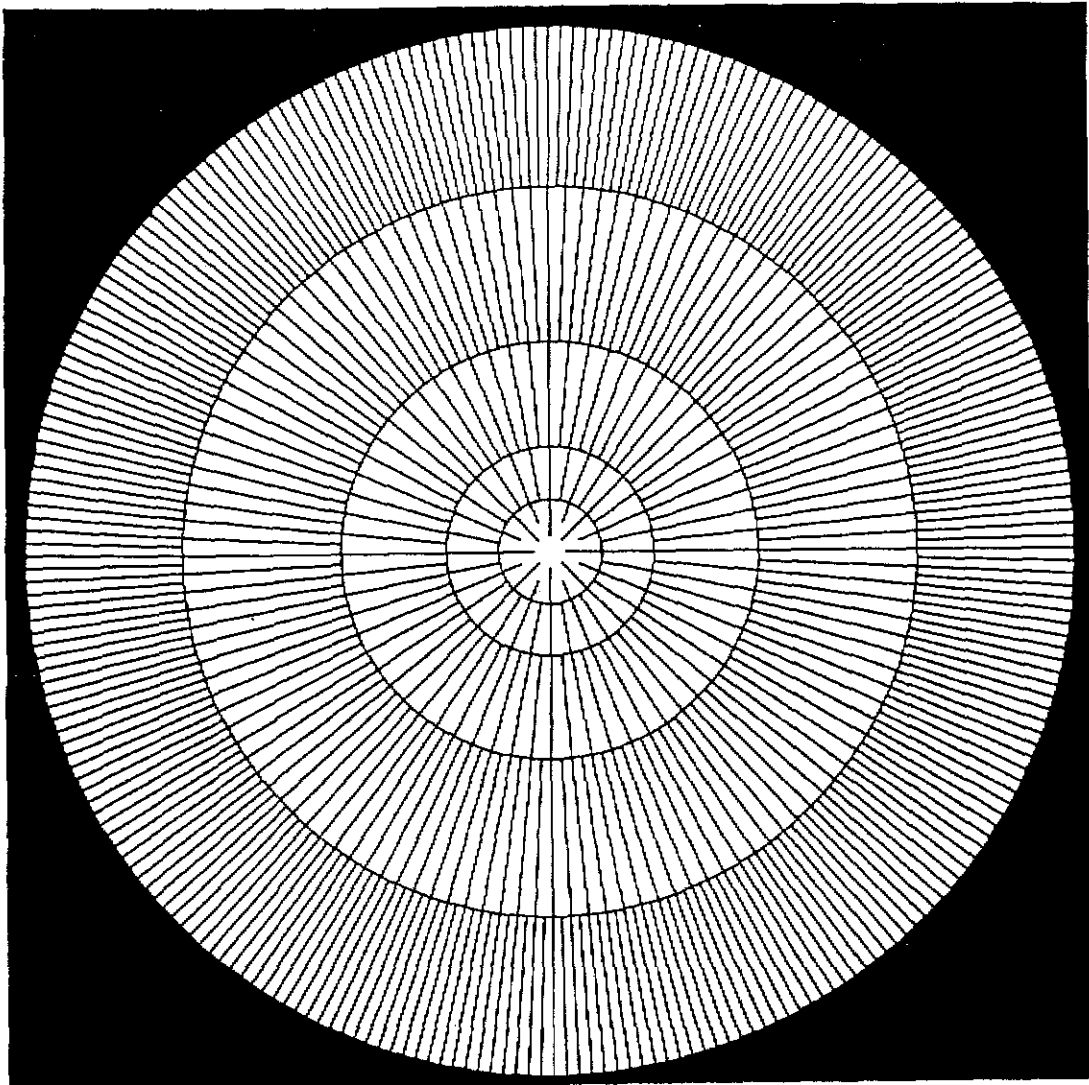
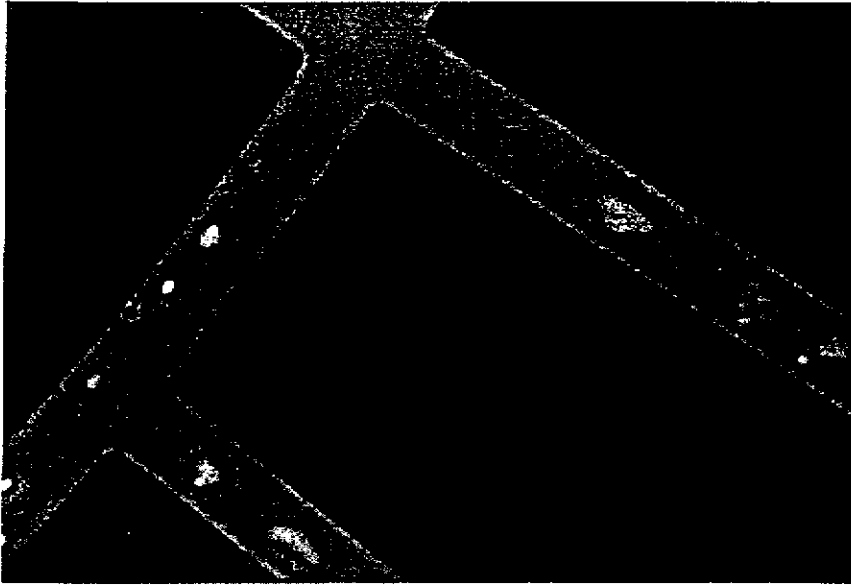


圖 3-7 集光式太陽電池電極圖案光罩設計圖

(a)



(b)

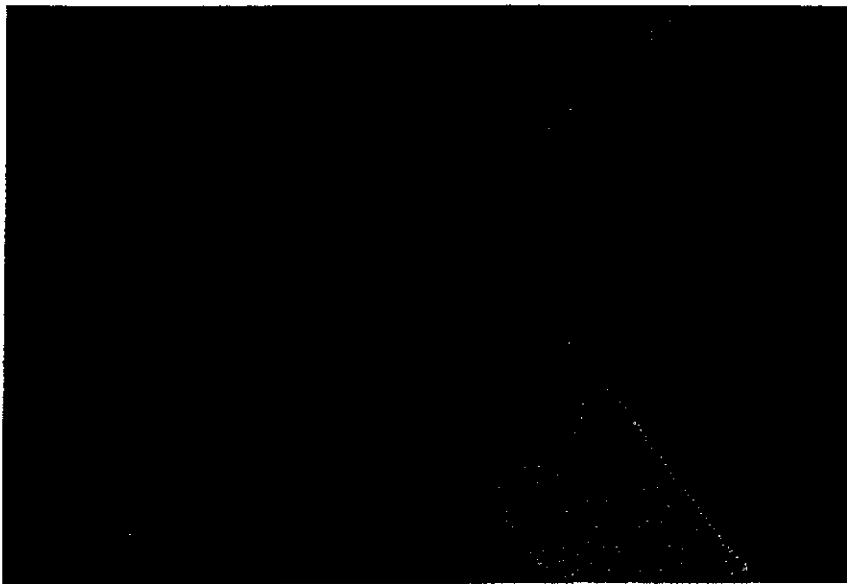


圖 3-8 Si_3N_4 保護樣品表面的效果：(a)無 Si_3N_4 保護

(b)有 Si_3N_4 保護

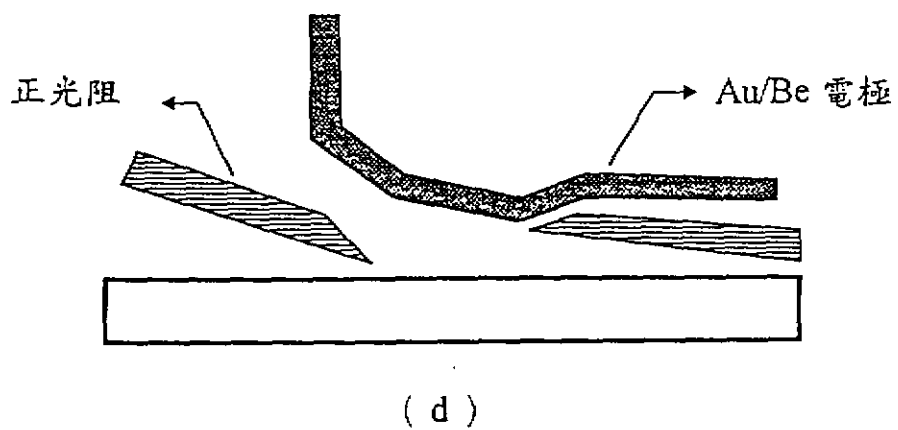
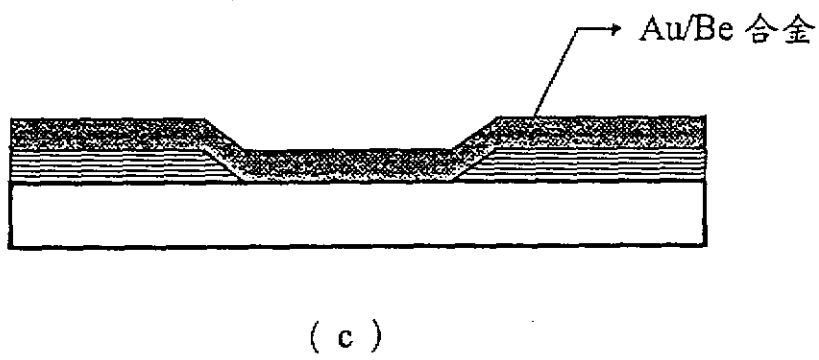
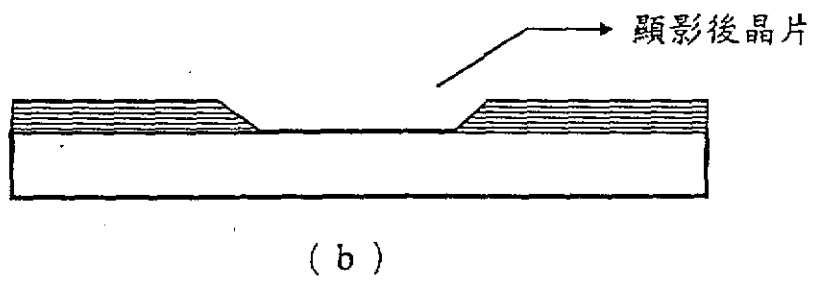
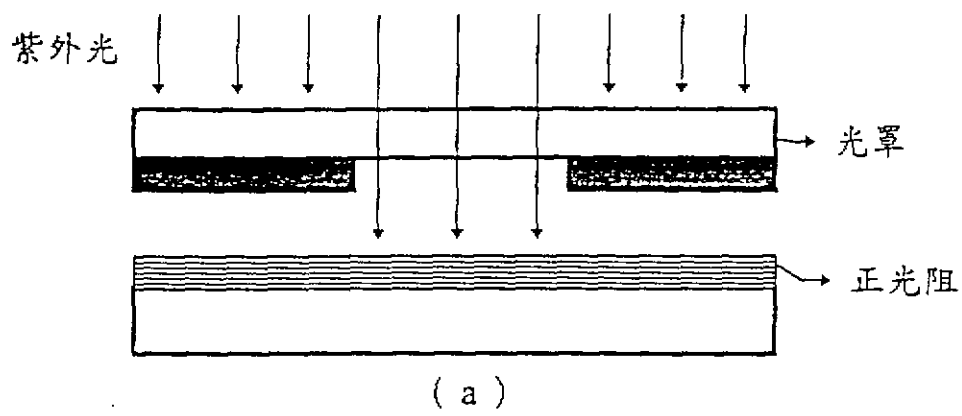


圖 3-9 使用正光阻之微影成像過程及金屬 lift-off 結果

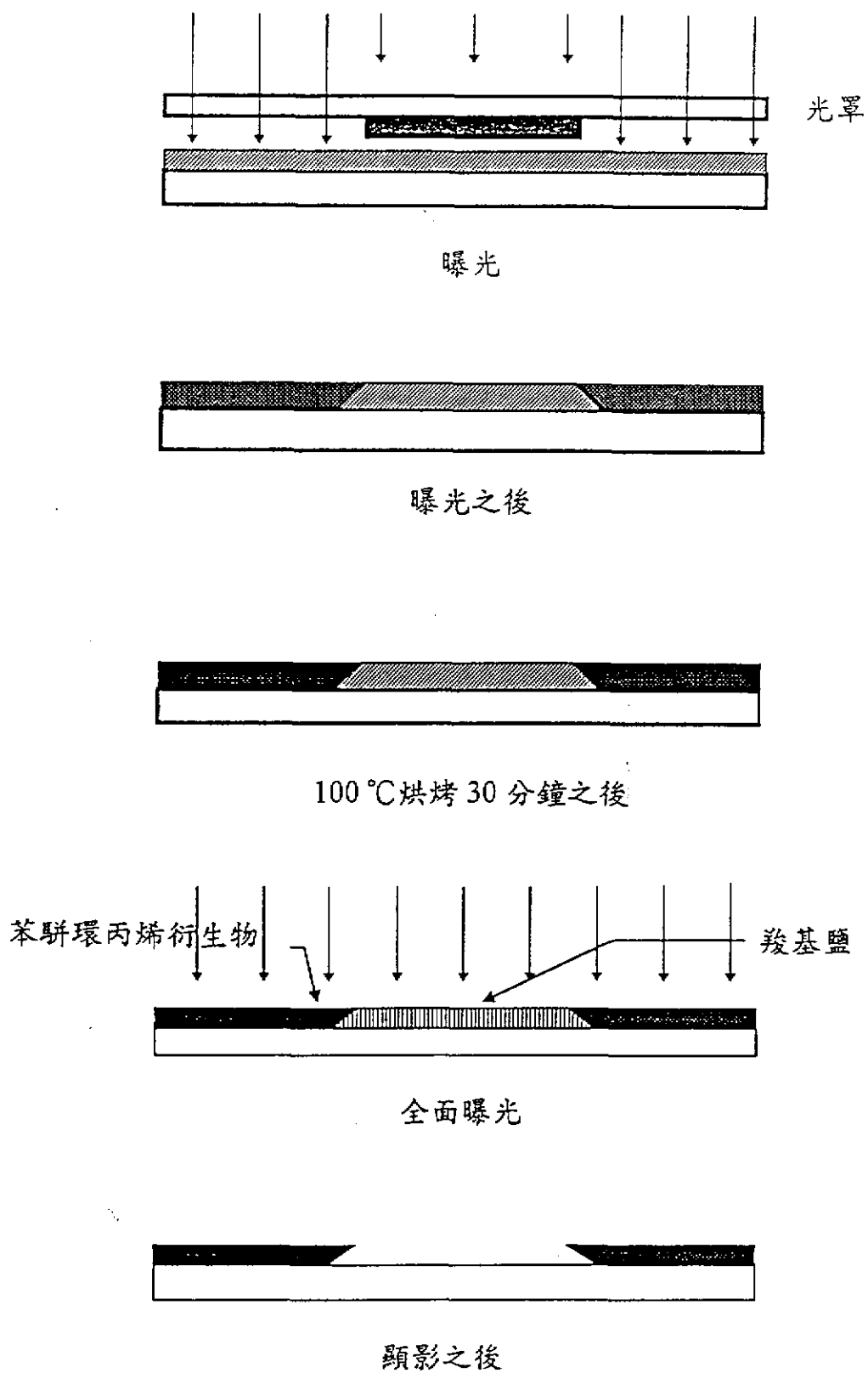
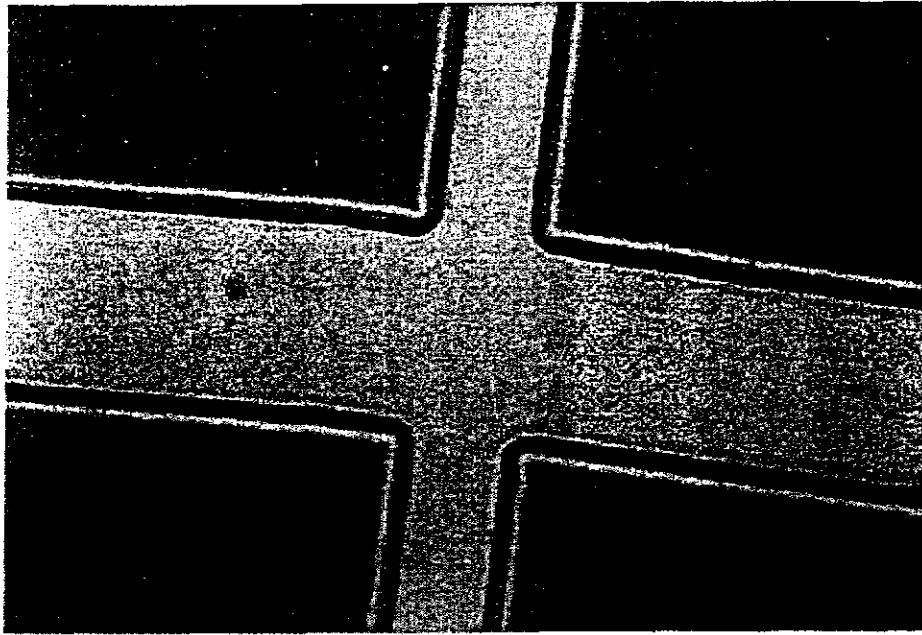
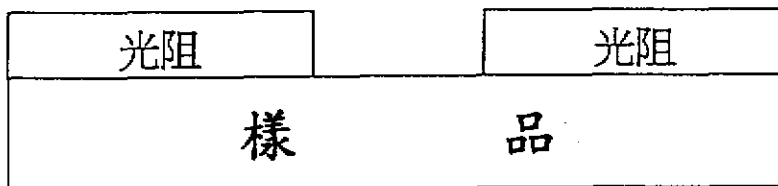


圖 3-10 使用影像反轉之微影成像過程及結果

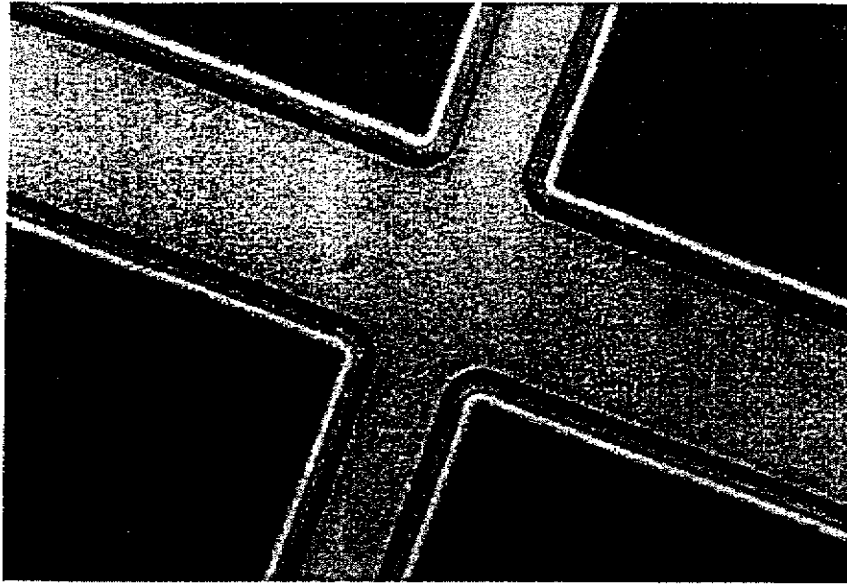


(a)

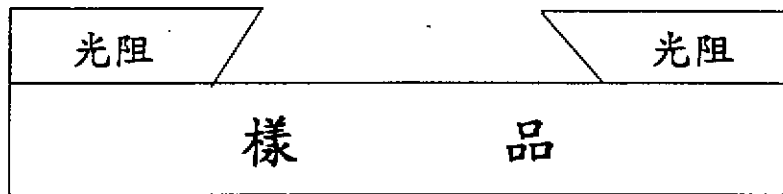


(b)

圖 3-11 顯影時間不足之樣品：(a) 樣品正面顯微鏡放大圖，(b) 光阻剖面示意圖。



(a)



(b)

圖 3-12 顯影時間充足之樣品：(a) 樣品正面顯微鏡放大

圖，(b) 光阻剖面示意圖。

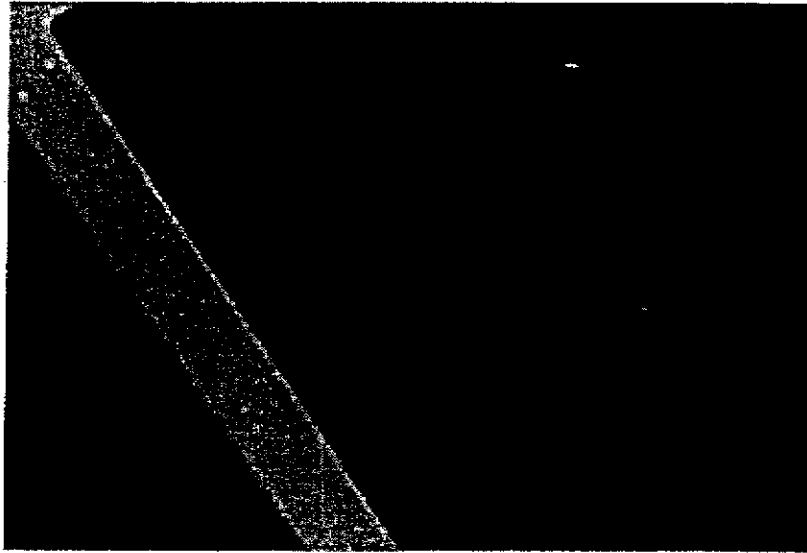
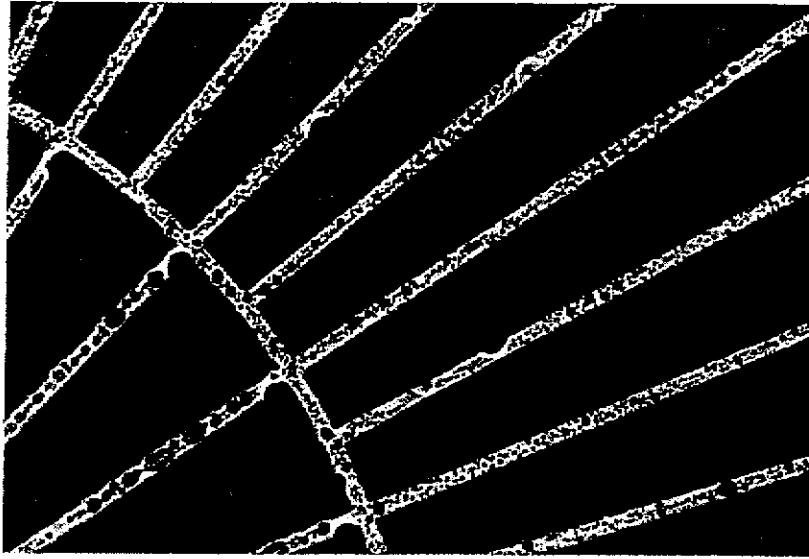


圖 3-13 由於蝕刻砷化鎵金屬接觸層(GaAs contact layer)的時間過久，導致太陽電池表面產生方形的凹孔。

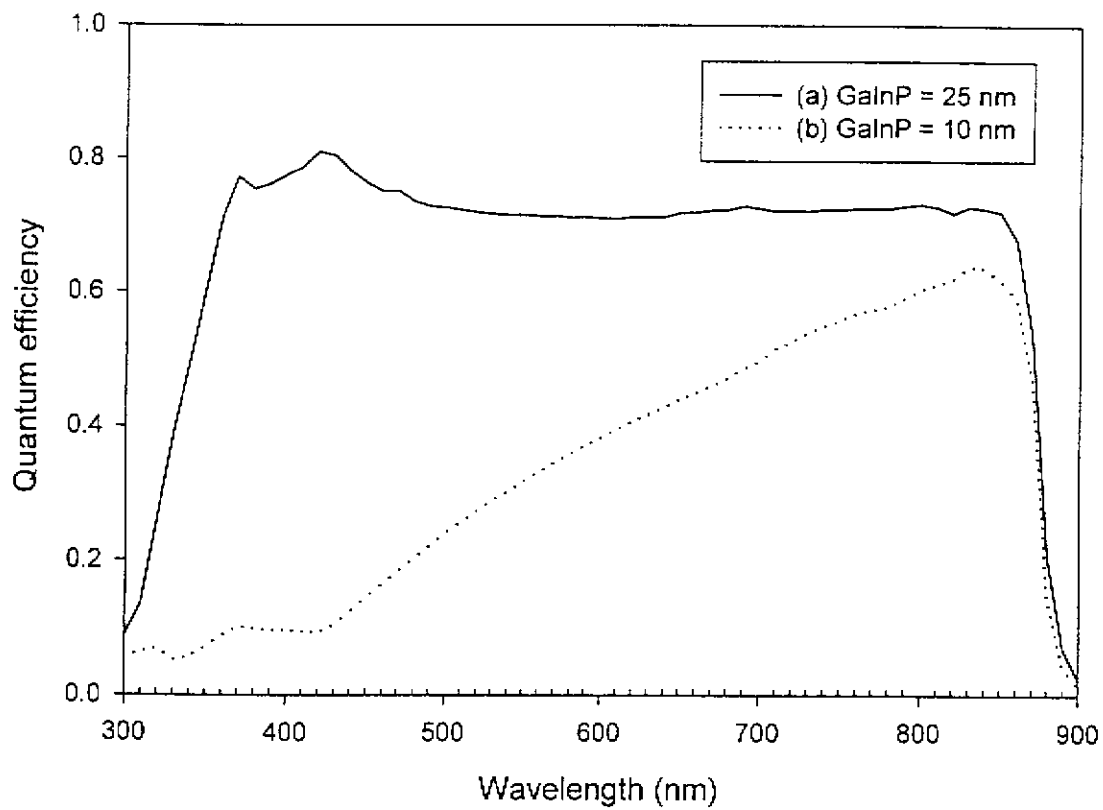


圖 3-14 不同厚度磷化銦鎵窗口層對砷化鎵太陽電池光頻

譜響應的影響：(a) 25nm GaInP，(b) 10 nm GaInP

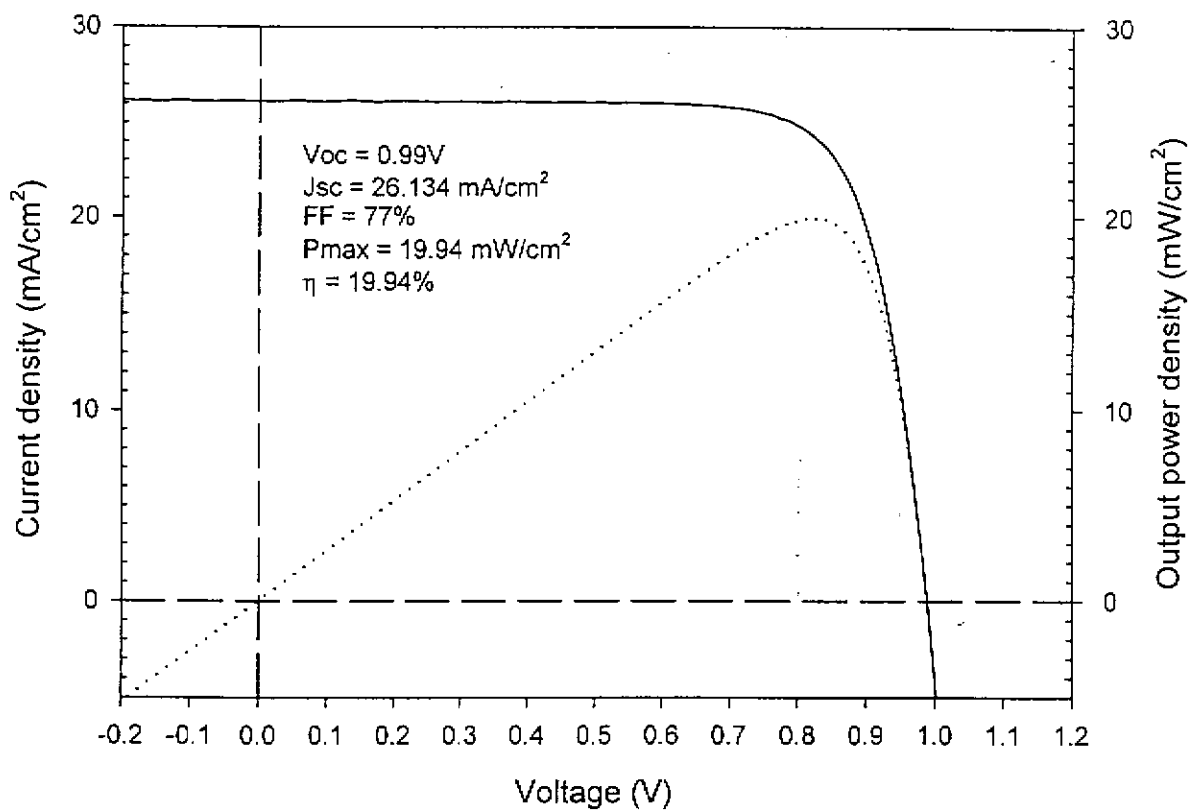


圖 3-15 在 AM1.5, 100 mW/cm^2 的照光條件下，碲化鎘太陽電池的效率量測結果

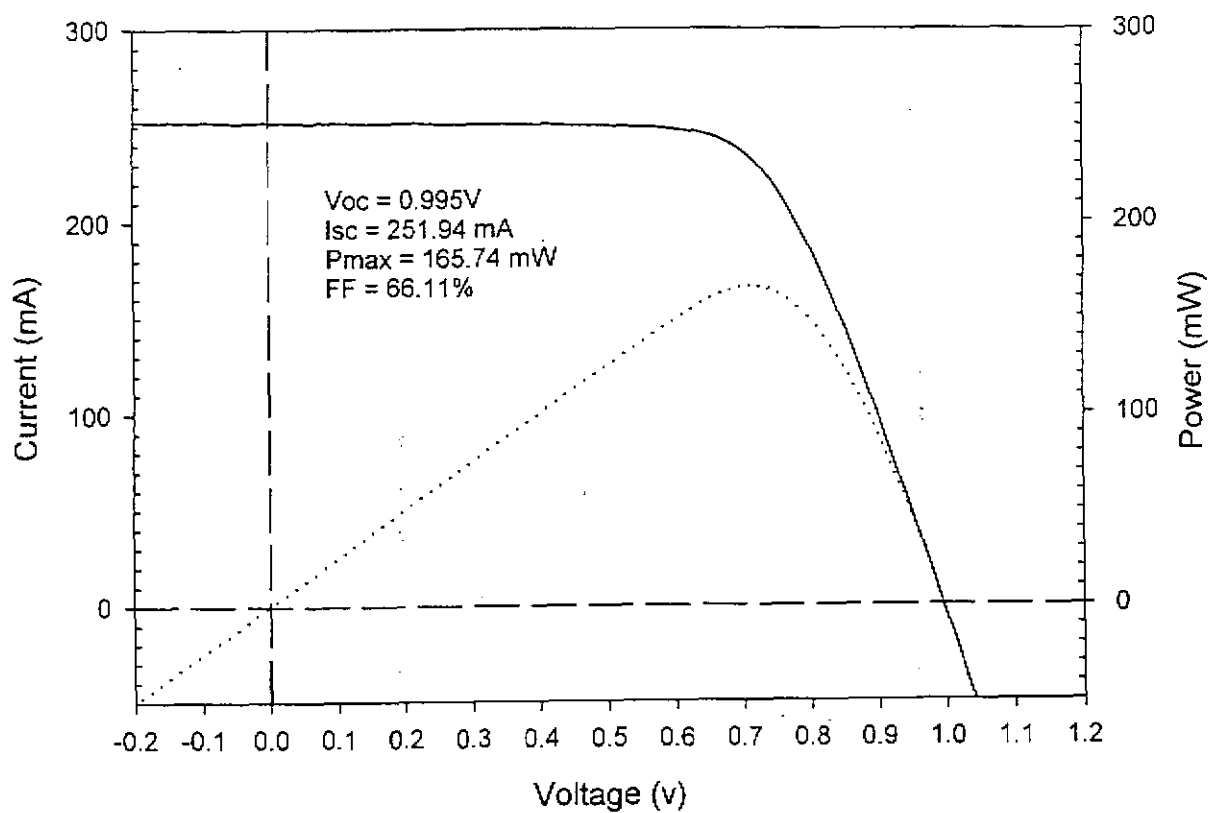


圖 3-16 在 $1.2\text{W}/\text{cm}^2$ 的聚光條件下 (12X)，用兩點探針所量到的電壓電流關係圖與輸出功率圖

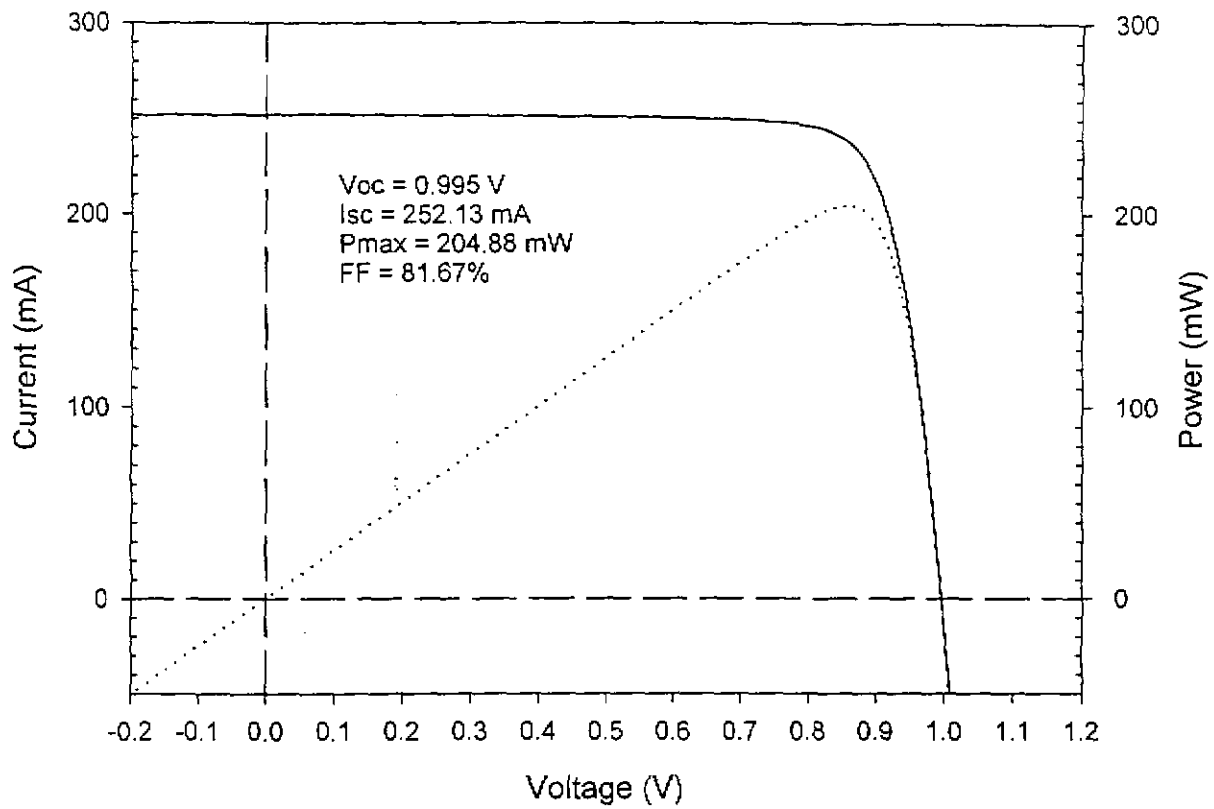


圖 3-17 在 $1.2\text{W}/\text{cm}^2$ 的聚光條件下 (12X)，用四點探針所量到的電壓電流關係圖與輸出功率圖

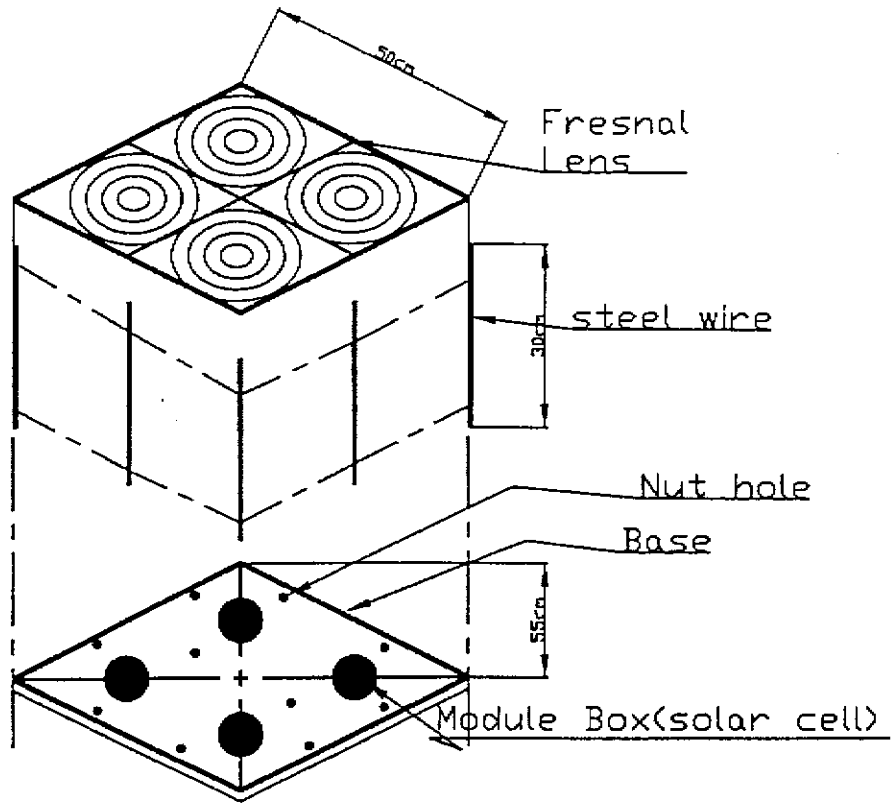


圖 4-1 集光式太陽電池模組簡圖

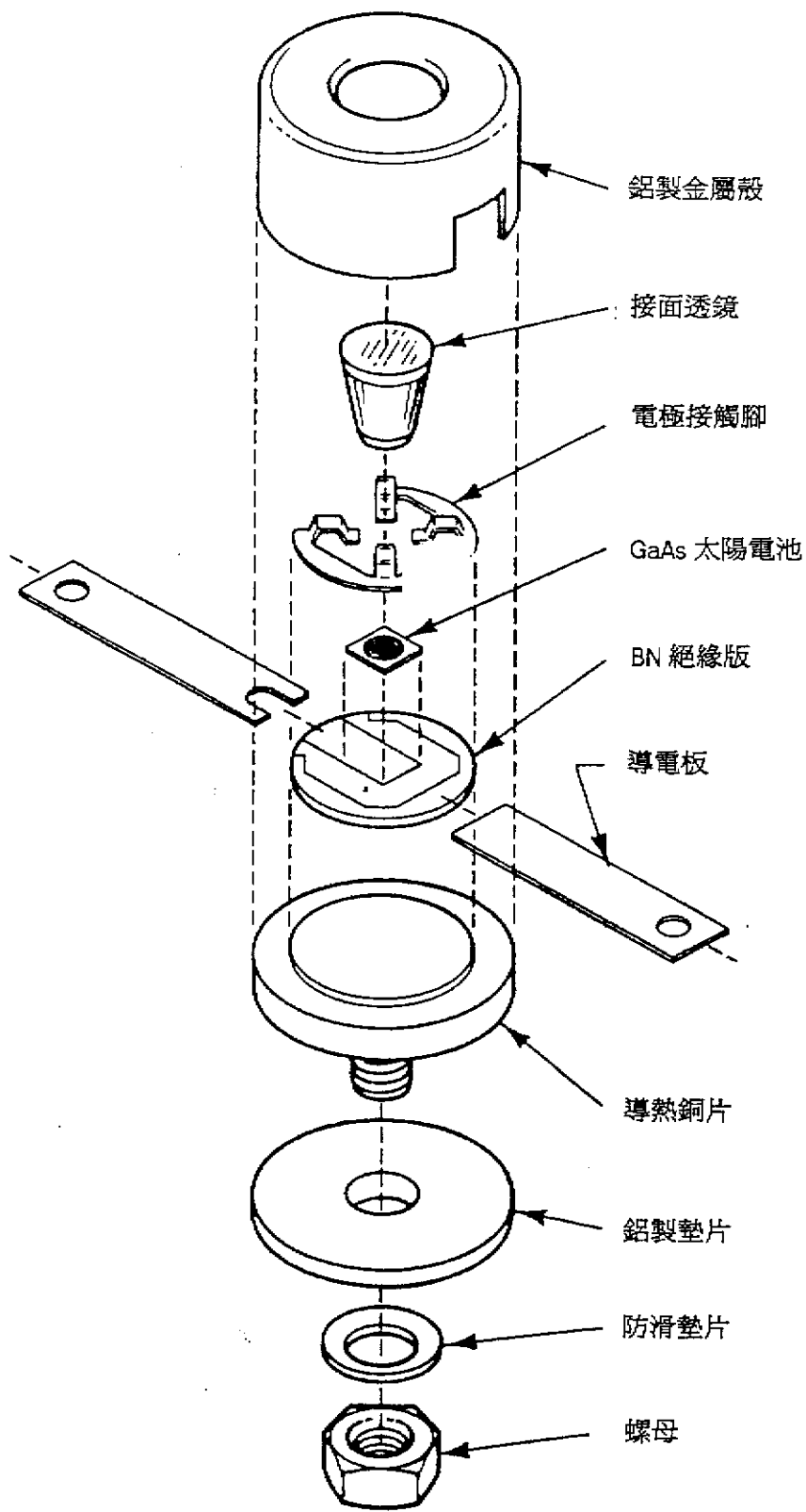


圖 4-2 太陽電池模組分解圖

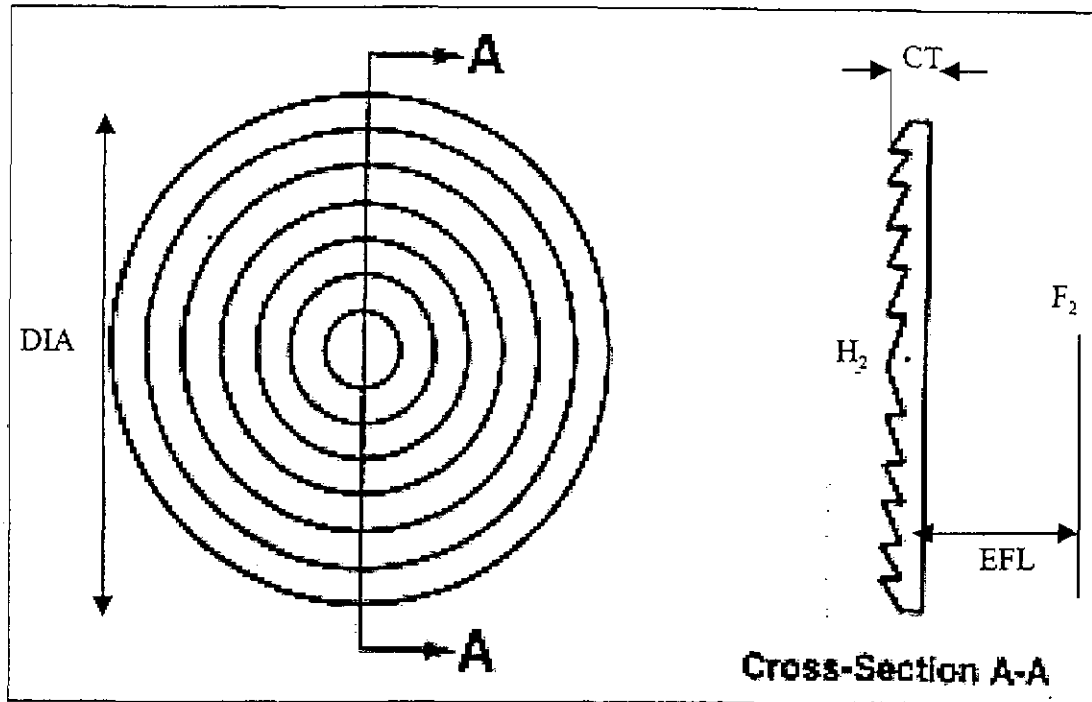


圖 4-3 Fresnal 透鏡之結構圖

Acrylic

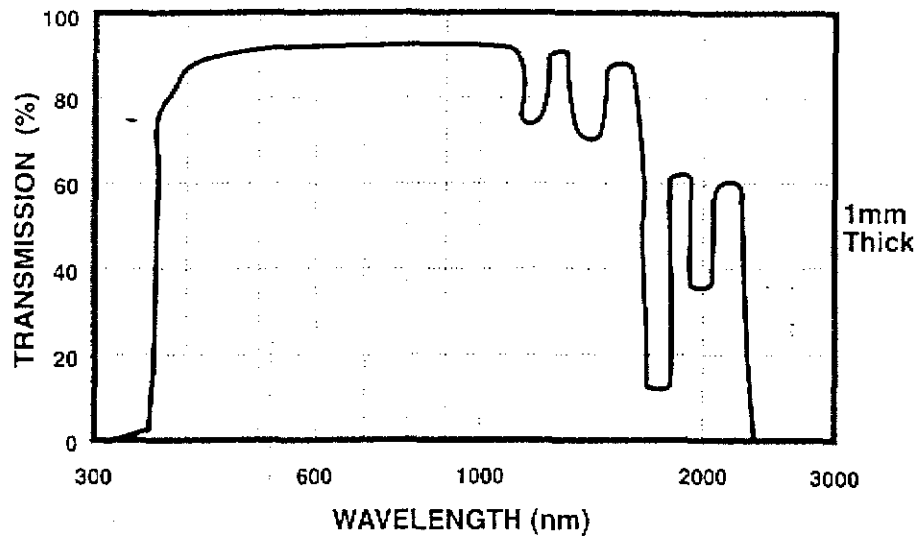


圖 4-4 Fresnal 透鏡之穿透率對光波長關係圖

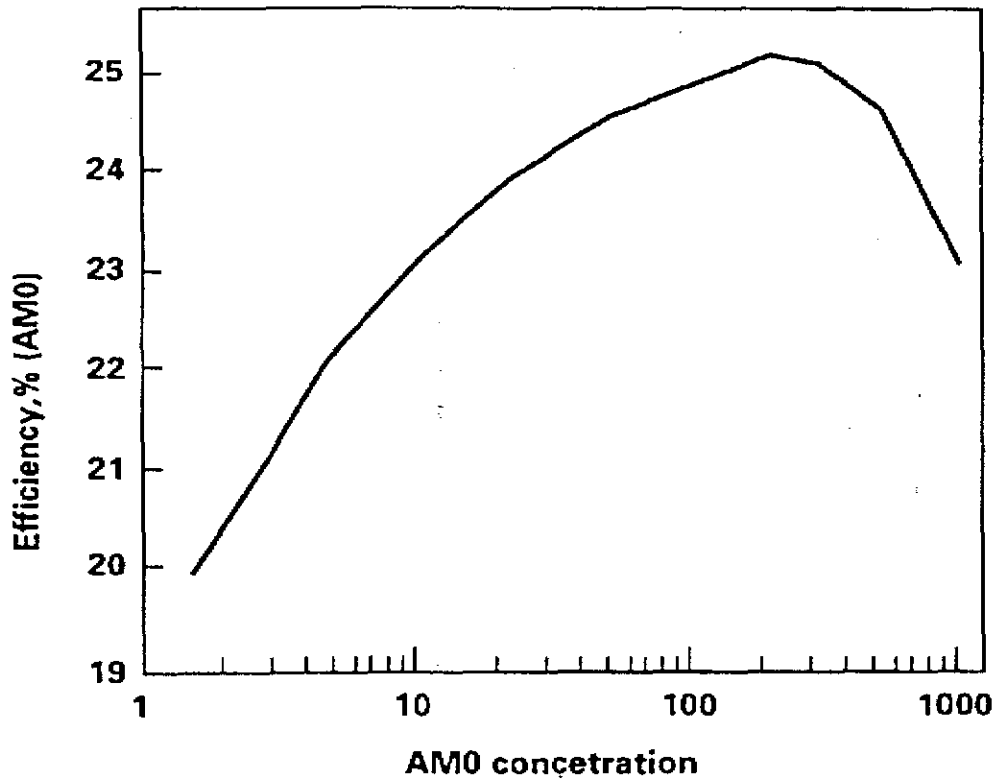


圖 4-5 砷化鎵太陽電池效率對集光倍率的關係圖

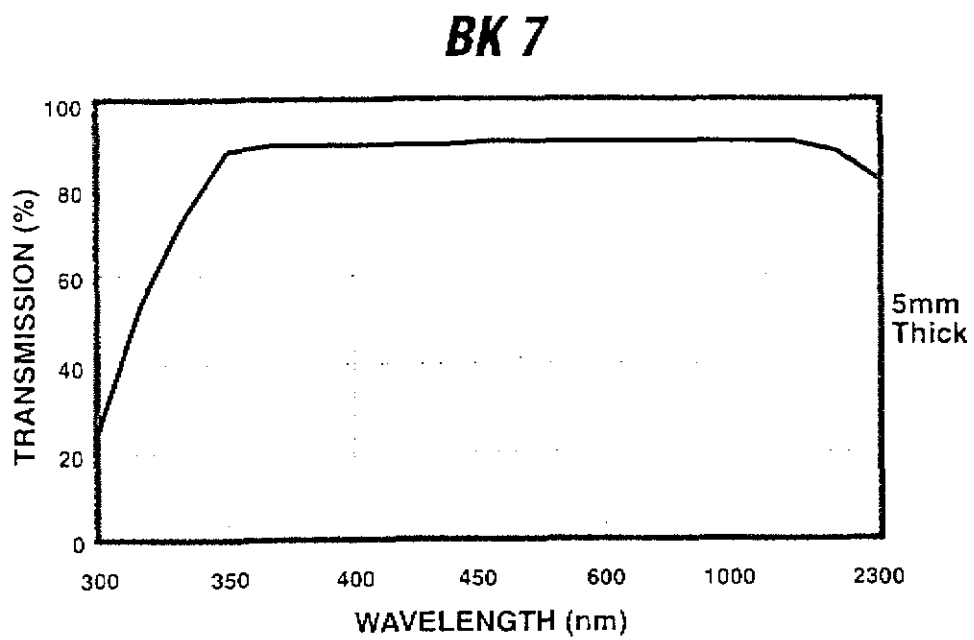


圖 4-6 BK7 透鏡之穿透率對光波長關係圖

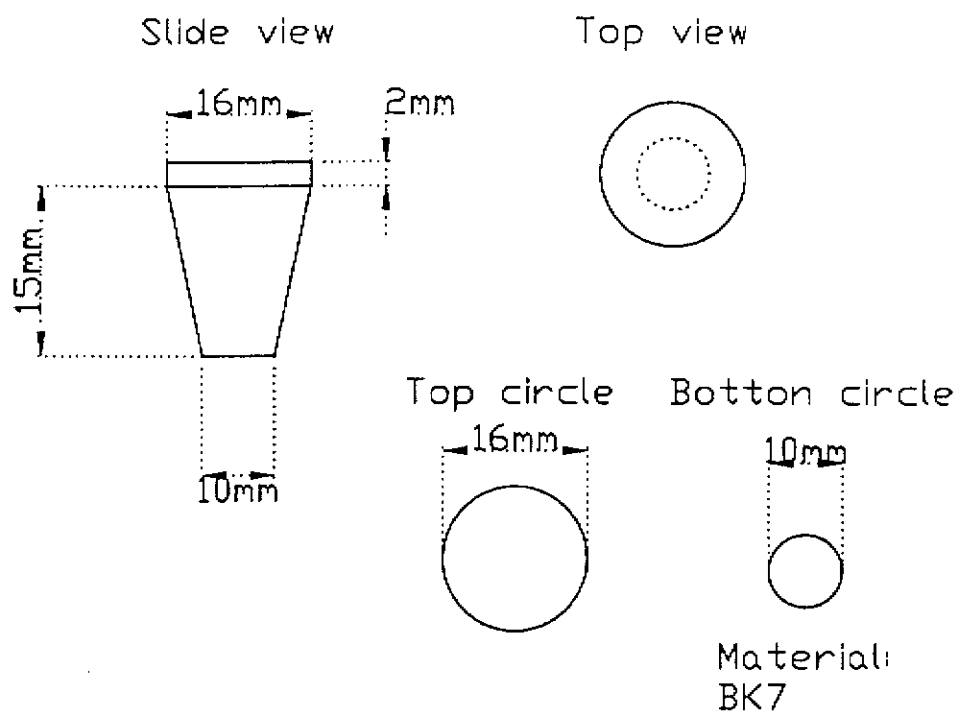


圖 4-7 Secondary 透鏡設計圖

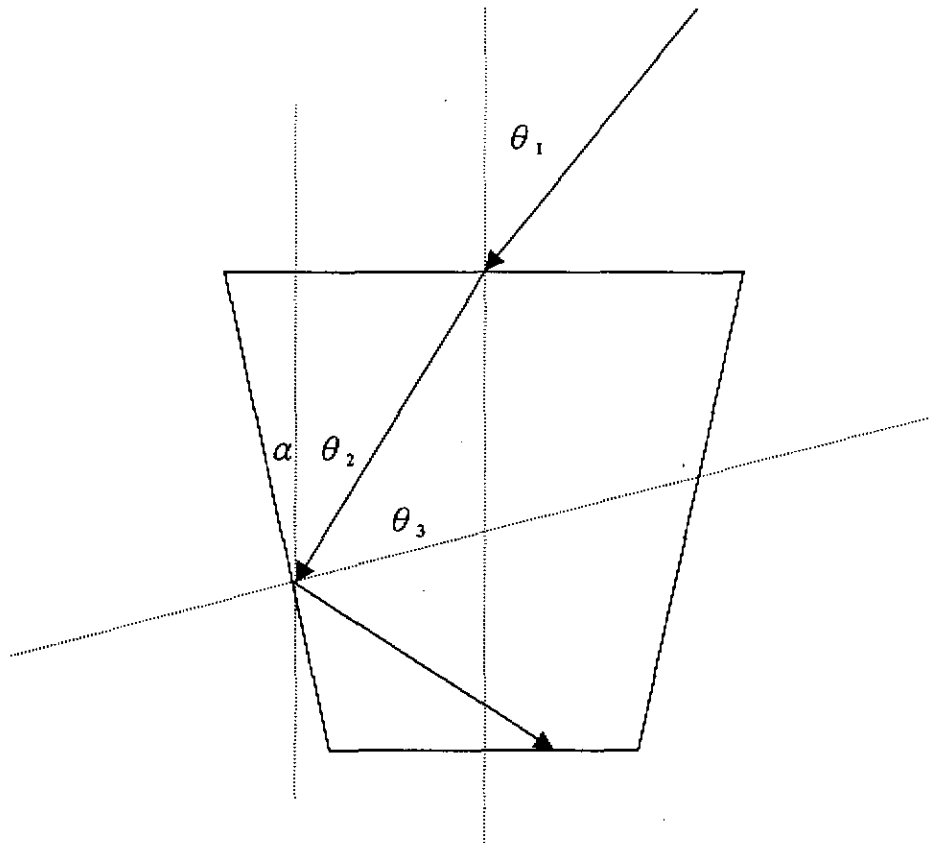


圖 4-8 Secondary 透鏡入射光與反射光夾角關係圖

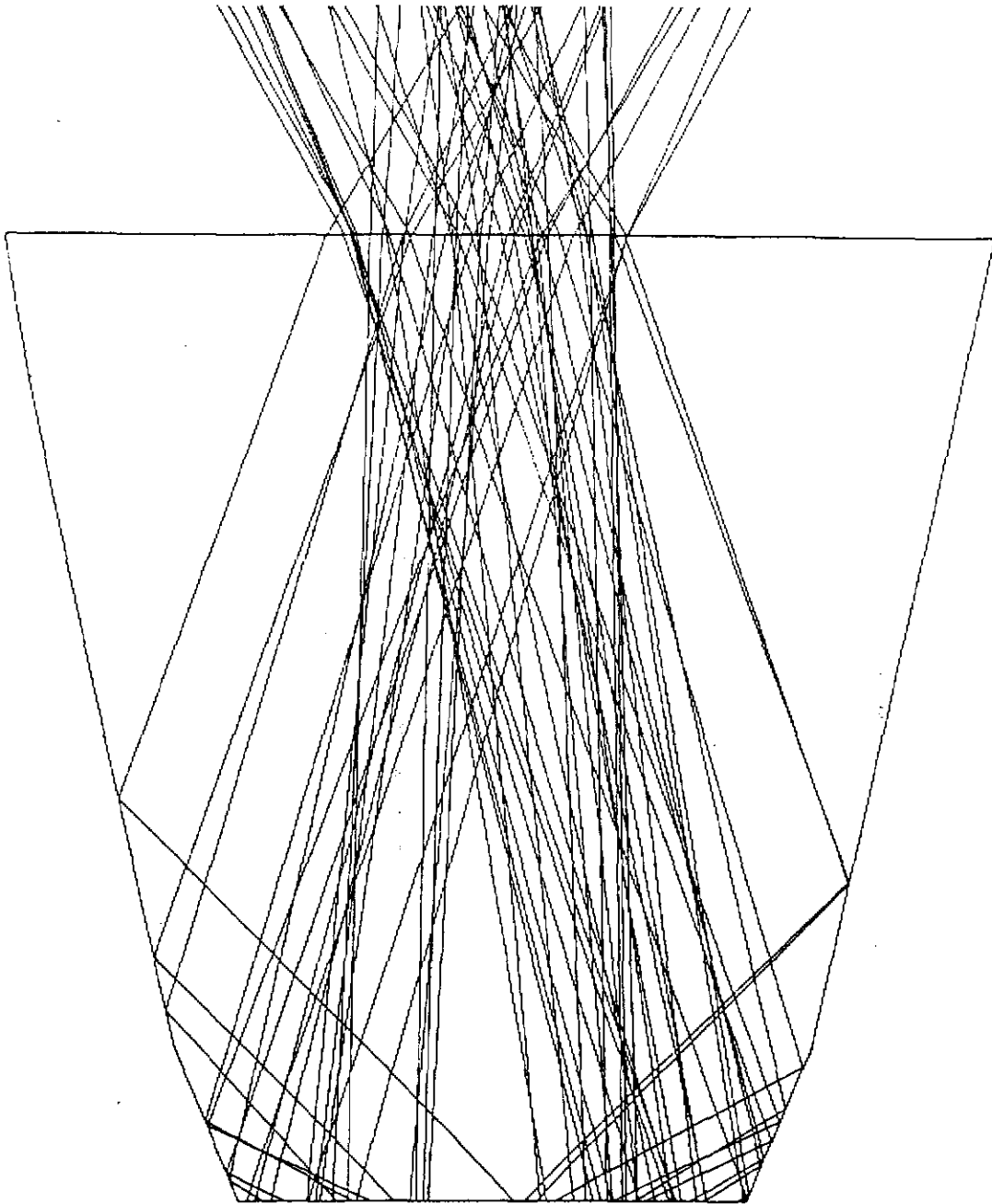
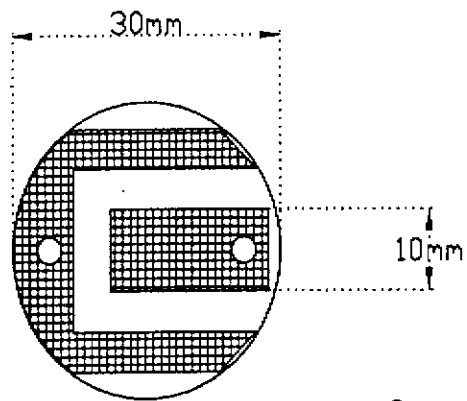
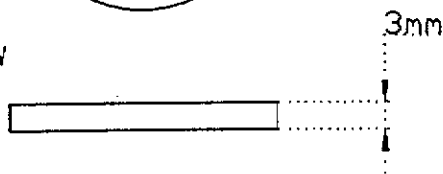


圖 4-9 太陽光入射至 Secondary 折射圖

Top view



Slide view



Material:
Ceramic
(Al₂O₃)

圖 4-10 BN 絕緣板與其接觸電極圖

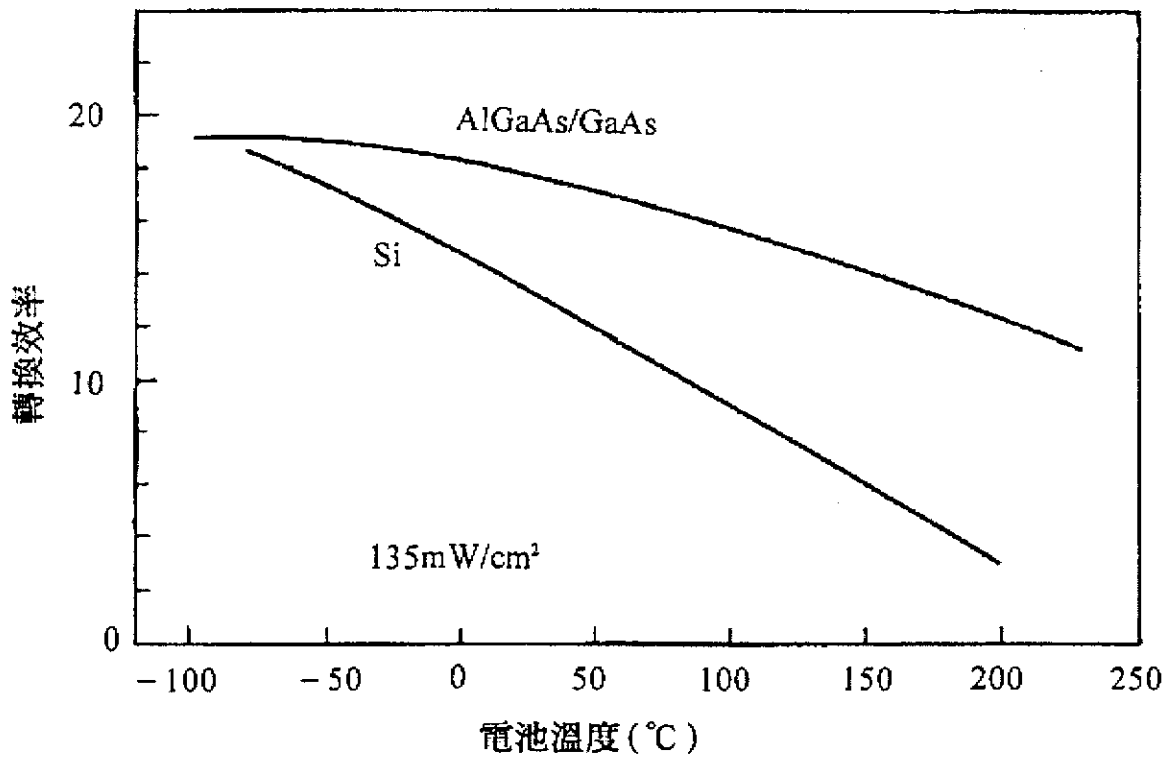
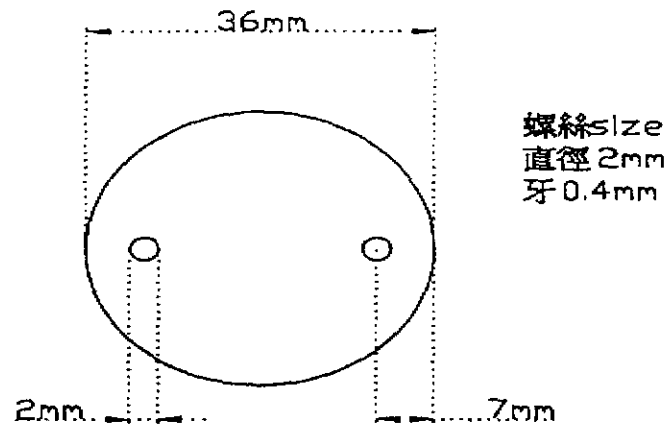


圖 4-11 電池溫度對效率的影響

Top view



Slide view

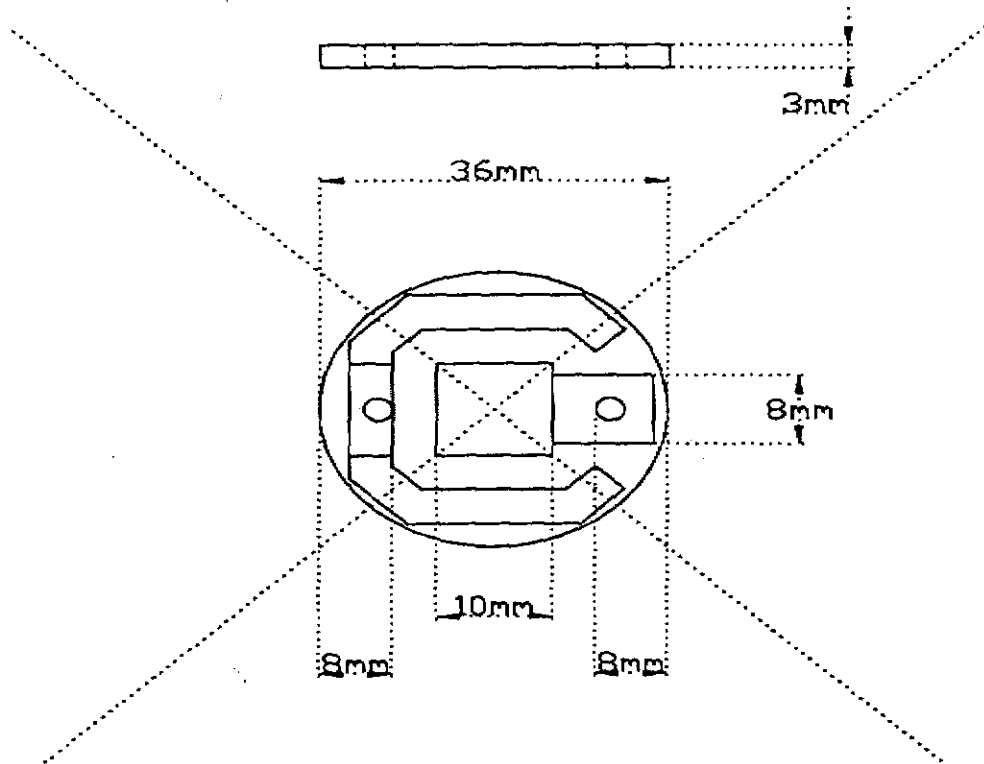


圖 4-12 太陽電池模組散熱板設計圖

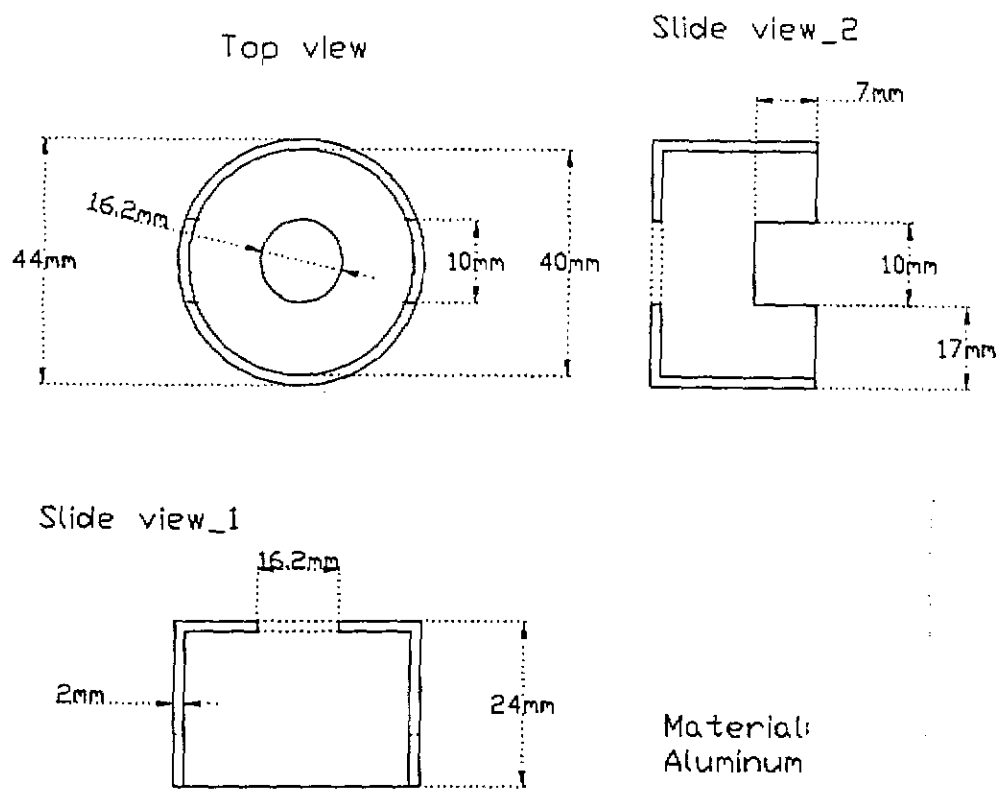


圖 4-13 太陽電池模組蓋子設計圖

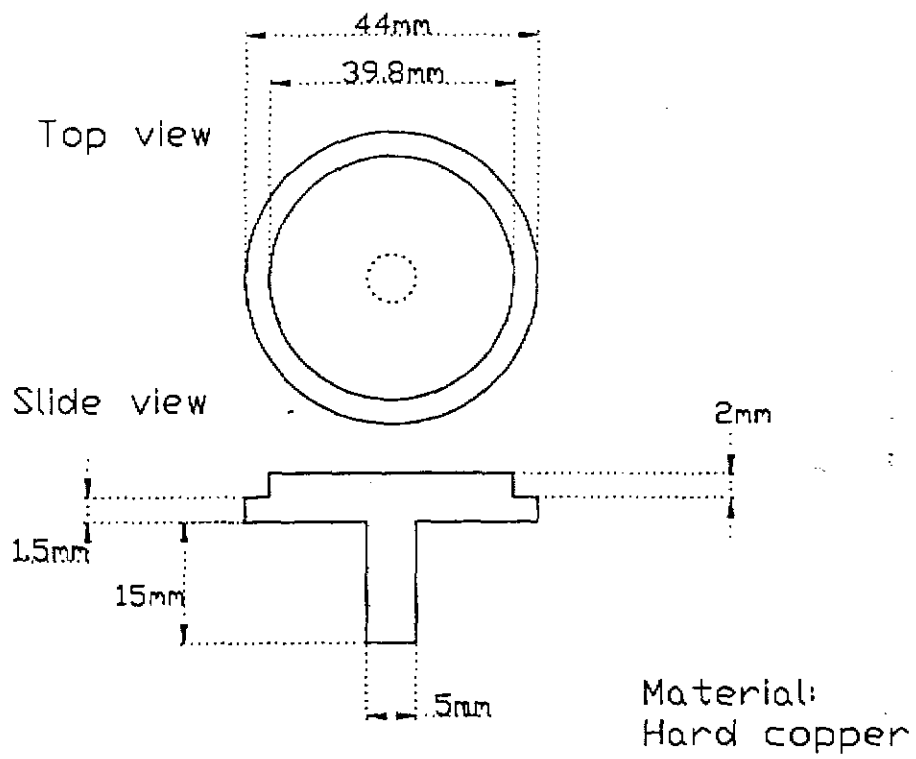


圖 4-14 太陽電池模組底座圖

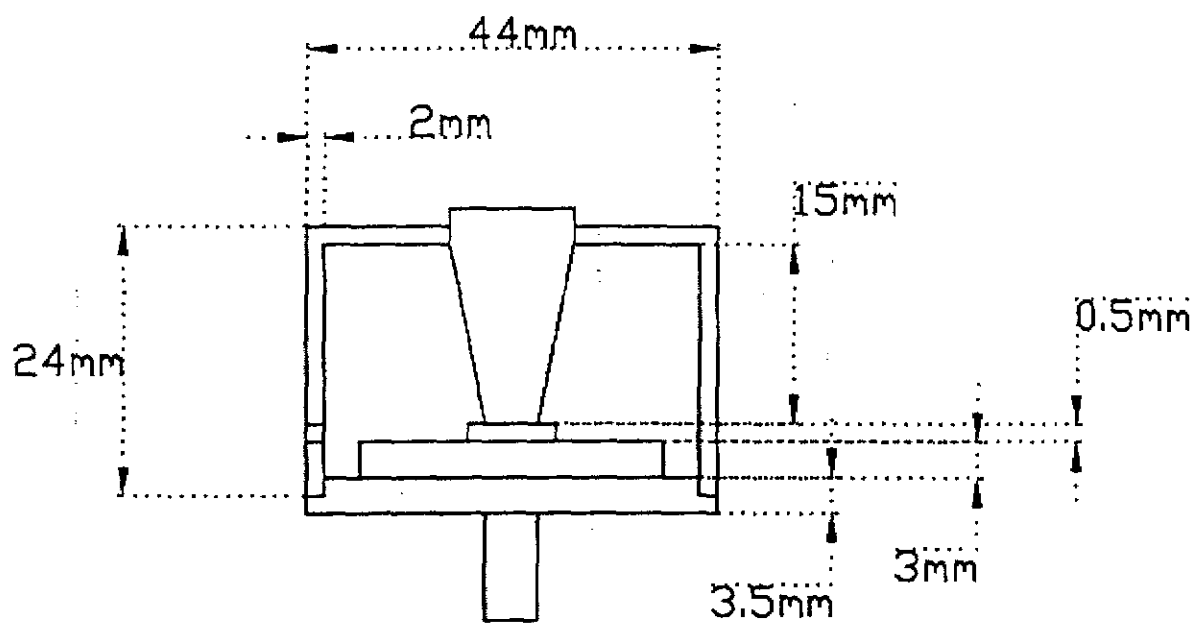
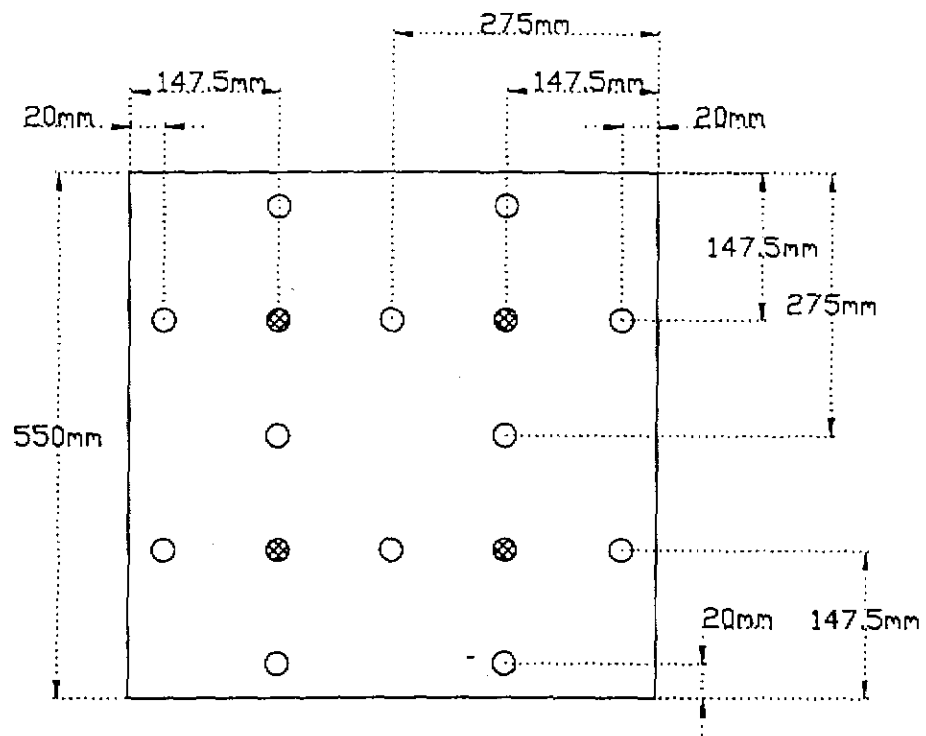


圖 4-15 太陽電池模組剖面圖



Slide view

Material:
Alumium

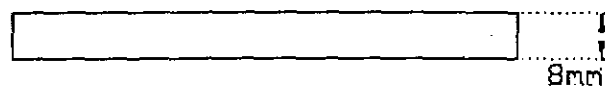


圖 4-16 集光模組底板設計圖

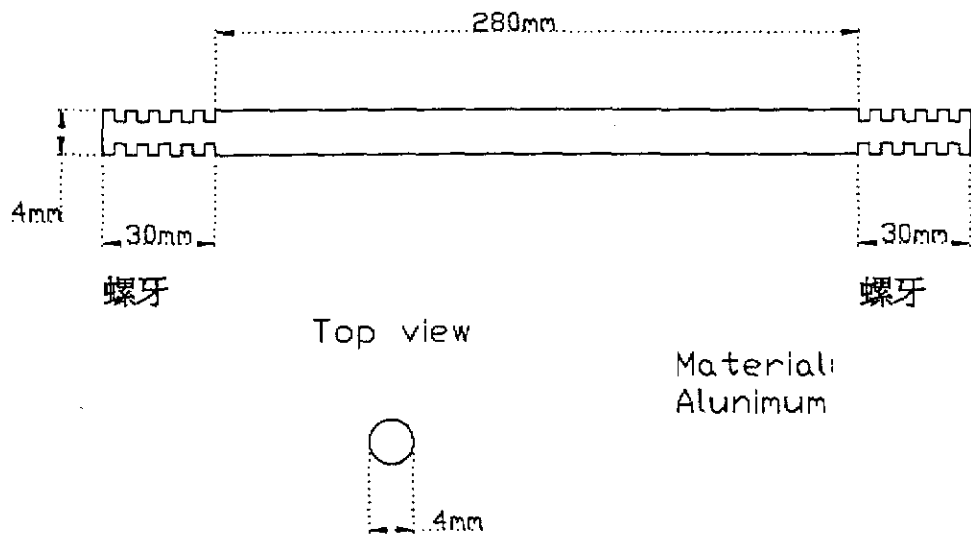


圖 4-17 集光模組支撐架圖

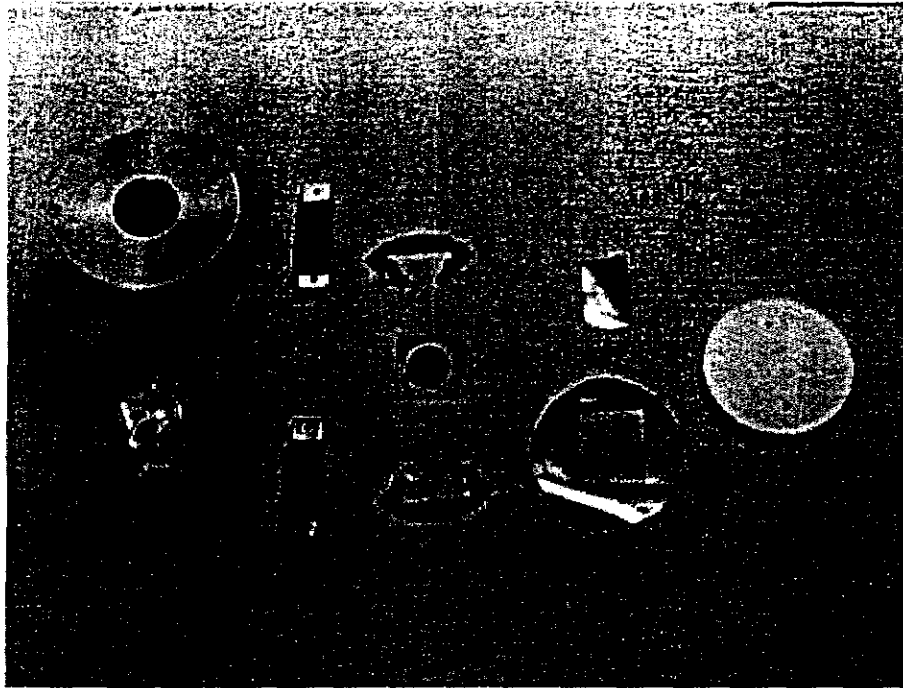


圖 4-18 集光式太陽電池模組盒之零件分解圖，包括
鋁製盒蓋、Secondary lens、銅製導電板、砷化
鎵太陽電池、上下電極接觸銅片、BN 絕緣散
熱板

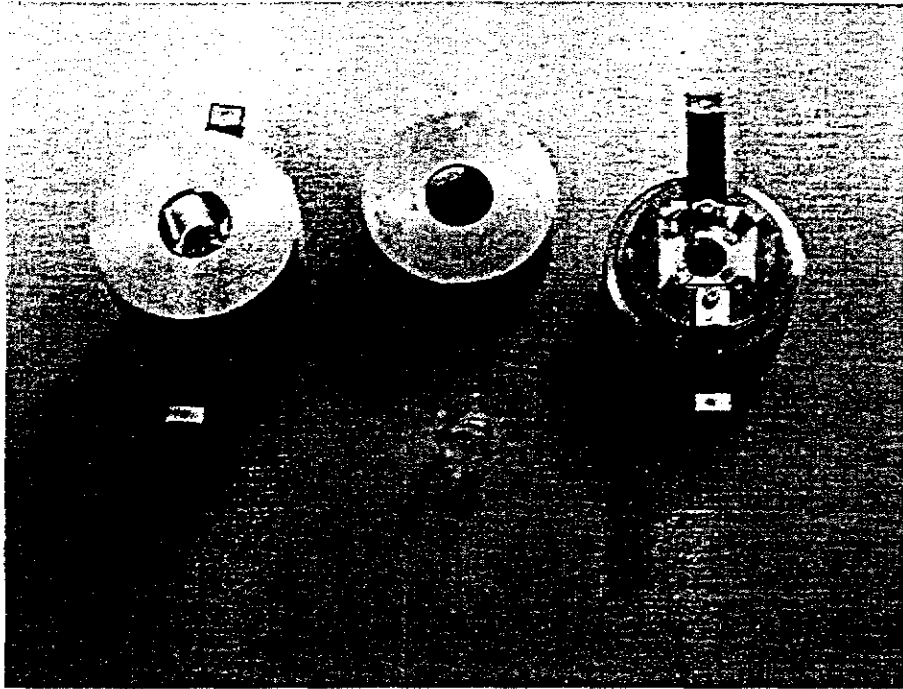


圖 4-19 集光式太陽電池模組盒，組合後之照片

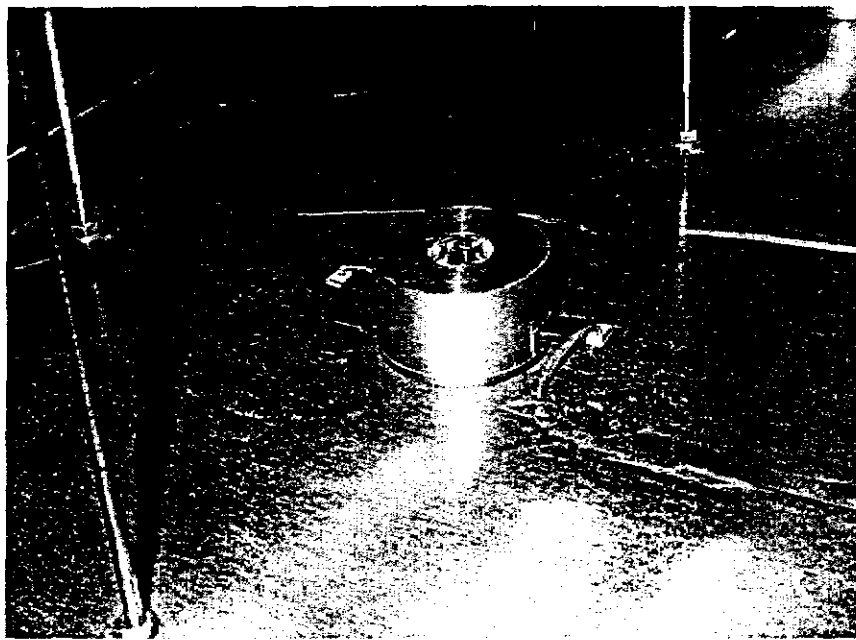
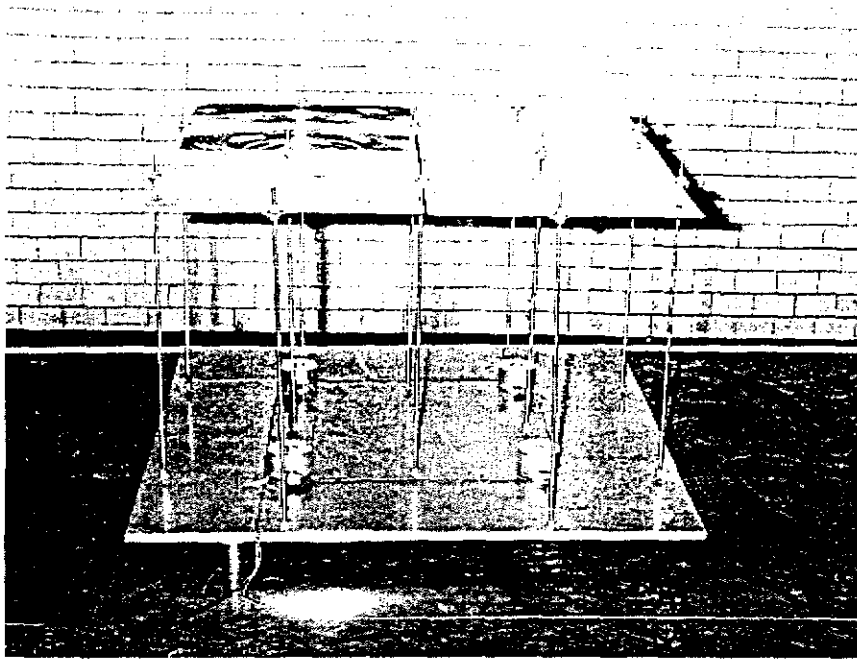


圖 4-20 集光式太陽電池模組照片：(上) 模組整體
照片 (下) 電池模組盒照片