

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

新型精練冶金級矽太陽電池技術 (PERL、SHJ-IBC) 研究與開發  
New upgrade metallurgical grade silicon solar cell technology research  
and development (PERL, SHJ-IBC)

計畫編號：1002001INER049

受委託機關(構)：中原大學電子工程系

計畫主持人：籃山明

聯絡電話：0929720925

E-mail address：[lanshan@cycu.edu.tw](mailto:lanshan@cycu.edu.tw)

核研所聯絡人員：蘇郁涵

報告日期：100年12月6日

## 目 錄

目 錄 .....	i
圖目錄 .....	ii
表目錄 .....	iii
中文摘要 .....	1
Abstract.....	2
壹、計畫緣起與目的 .....	3
貳、研究方法與過程 .....	5
一、標準製程 .....	5
二、基板清洗步驟 .....	6
三、PERL 的製作 .....	6
四、磷擴散摻雜 $n^+$ 形成 n-p 界面 .....	8
五、氧化鋁薄膜沉積 .....	9
六、CZ-Si 沉積氧化鋁薄膜 .....	11
七、少數載子生命期量測 .....	12
參、主要發現與結論 .....	14
參考文獻 .....	23

## 圖目錄

圖一 太陽能電池的標準製程流程圖 .....	5
圖二 PERL 型 UMG-Si 太陽能電池示意圖 .....	7
圖三 自由電子與電洞行進方向示意圖 .....	8
圖四 沉積氧化鋁薄膜所用 AP-MOCVD 反應腔之示意圖 .....	10
圖五 自組式 AP-MOCVD 反應腔體 .....	11
圖六 分別針對 450°C、475°C、500°C、525°C、550°C 條件做回火條件 .....	17
圖七 對 500°C 做 10、20、30、40 (B1、B2、B3、B4) 分鐘回火 .....	17
圖八 在 AM=1.5 下，PERL 太陽能電池之 I-V 轉換效率 .....	18
圖九 450°C 下不同流量的氧的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖 .....	19
圖十 在同樣流量的氧不同溫度下的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖 .....	20
圖十一 在 350°C 下不同流量的水的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖 .....	21
圖十二 流量 35c.c 的水，在不同沉積溫度的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖 .....	22

## 表目錄

表一	氧化鋁於各沉積技術下所得之表面複合速率及氧化層電荷密度 .....	4
表二	在 AM=1.5 下，太陽能電池之 I-V 轉換效率 .....	18
表三	450°C 下不同流量的的氧化鋁薄膜 lifetime.....	19
表四	在同樣流量的氧不同溫度下的氧化鋁薄膜 lifetime.....	20
表五	在 350°C 下不同流量的水的氧化鋁薄膜 lifetime.....	21
表六	流量 35c.c 的水，在不同沉積溫度的氧化鋁薄膜 lifetime .....	22

## 中文摘要

本實驗計劃探討氧化鋁鈍化層之作用與用於PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 型矽太陽能電池之光電轉換效率變化，我們欲以價格相對便宜之提純冶金級矽基板 (UMG-Si) 和CZ-Si，利用AP-MOCVD法於不同條件下沉積氧化鋁薄膜，並試圖找尋沉積後最佳熱處理之條件，希望得到品質較佳的氧化鋁鈍化層來鈍化基板表面，以提升少數載子生命期，進而降低表面復合速率。根據相關文獻記載，以不同的溫度來做沉積氧化鋁薄膜後的回火處理，發現對於少數載子的生命期有相當的影響性，且文獻研究中亦顯示氧化層為帶有負電荷量 (fixed negative charge)，而此負電荷量越多，可以更有效的提升於p-type基板區的少數載子生命期。

此外我們把 UMG-Si 將其製成太陽能電池元件，並觀察其光電轉換效率之提升效果。但由於廉價的 UMG-Si 中存在許多的有害金屬雜質，所以我們將先以磷擴散吸雜法來加以純化，並製作成太陽能電池其效率皆可達 10 % 以上。接著在 UMG-Si 基板背面上以常壓式有機金屬物化學氣相沈積法 (AP-MOCVD) 沉積氧化鋁薄膜，藉由 PERL (Passivated Emitter, Rear Locally diffused) 技術效提高 UMG-Si 太陽能電池轉換效率。最終其太陽能電池轉換效率可達 13.57%。

關鍵字：常壓式有機金屬氣相沉積法、PERC、氧化鋁、表面鈍化、少數載子生命週期。

## **Abstract**

In recent years, the demand of solar cells increases in the world, which causes the deficiency of silicon feedstock and therefore makes the cost of silicon raw material remain high. To stabilize both the output and the price of solar cells, the industry of solar cells has changed its production direction to thin-film solar cells. To lower the cost of solar cells, a device fabrication process based on the upgraded metallurgical silicon (UMG-Si) solar cells has been developed. In this study, low-cost UMG-Si and CZ-Si wafers have been used as the substrates to manufacture solar cells. Prior to device fabrication process, harmful impurities contained in UMG-Si substrates have been removed by phosphorus diffusion gettering. The photovoltaic conversion efficiency can achieve over 10 % for UMG-Si solar cell. Then we deposit aluminum oxide on the rear of the substrate by MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition), the photovoltaic conversion efficiency was enhanced by the PERL (Passivated Emitter, Rear Locally diffused) technology. The result that a high conversion efficiency of 13.57 % was obtained for UMG-Si solar cell can be presented in the present study.

Key words : UMG-Si 、 APCVD 、 Passivation 、 Aluminum Oxide

## 壹、計畫緣起與目的

目前，製作低成本的矽太陽能電池為首要的目標，而低成本提純冶金級矽（Upgraded Metallurgical Silicon，UMG-Si）為一常見的替代材料，常用的技術是在 UMG-Si 基板上成長一層較高品質的磊晶矽以作為太陽能電池的吸收層[1]。但由於此基板內部存在許多缺陷及有害雜質（例如：鐵、銅和鎳等雜質），而這些金屬雜質會降低太陽能電池的載子生命週期和增加載子復合速率，進而降低太陽能電池的效率。因此，首先我們採用磷擴散吸雜法（Phosphorus Diffusion Gettering，PDG）[2,3]來做外部去疵，接著考慮將 PERL（Passivated Emitter, Rear Locally diffused）技術在單晶矽太陽能電池上的應用加入 UMG-Si 太陽能電池。

其構想是利用介電層如  $\text{SiO}_2$  成長於基板背面，開窗之後鍍上金屬電極，而氧化層介於矽基板的中間，一方面可以增強背面光之收集，以增強矽基板對長波長的吸收，另一方面，經低溫回火後也可降低背表面 p 型區域的復合速率  $S$ ，進而有效的改善電池的電流收集效益。最終藉由背表面局部鈍化層的加入，使其太陽光電轉換效率可達 13.5% 以上。

為什麼會選用氧化鋁做研究，因為此材料特性主要有三，首先，氧化鋁在特定材料源（如副產物帶有氫氣）在低溫成長時，可使材料帶有一定的氫含量（ $\sim 3 \text{ at.}\%$ ），低溫回火後對於鈍化（passivation）基板表面

懸浮鍵有一定的效果，同時，此材料在與基板接面處 (Si-AlO<sub>x</sub>) 會帶有內建負電荷 ( $Q_f = 10^{10} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ )，可應用在太陽能電池的 p 型區域上對矽基板產生鈍化效果，降低少數載子於基板之表面複合速率，表一為氧化鋁於各沉積技術下應用於矽質材料表面鈍化所得之表面複合速率及固定氧化層電荷密度，目前以電漿輔助原子層沉積技術 (PA-ALD) 所製備的氧化鋁薄膜具有最佳的鈍化效果，其有效的表面複合速率為 6cm/s，帶電量為  $-1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。而氧化鋁也是一種寬能隙 ( $\sim 9 \text{ eV}$ ) 的介電材料，因此在可見光波段不易被吸收，光穿透性佳。

在此研究中，主要是在矽基板(100)上以有機金屬化學氣相沉積法 (MOCVD) 沉積氧化鋁薄膜，經回火處理後，對樣品作少數載子生命期之量測。

表一 氧化鋁於各沉積技術下所得之表面複合速率及氧化層電荷密度

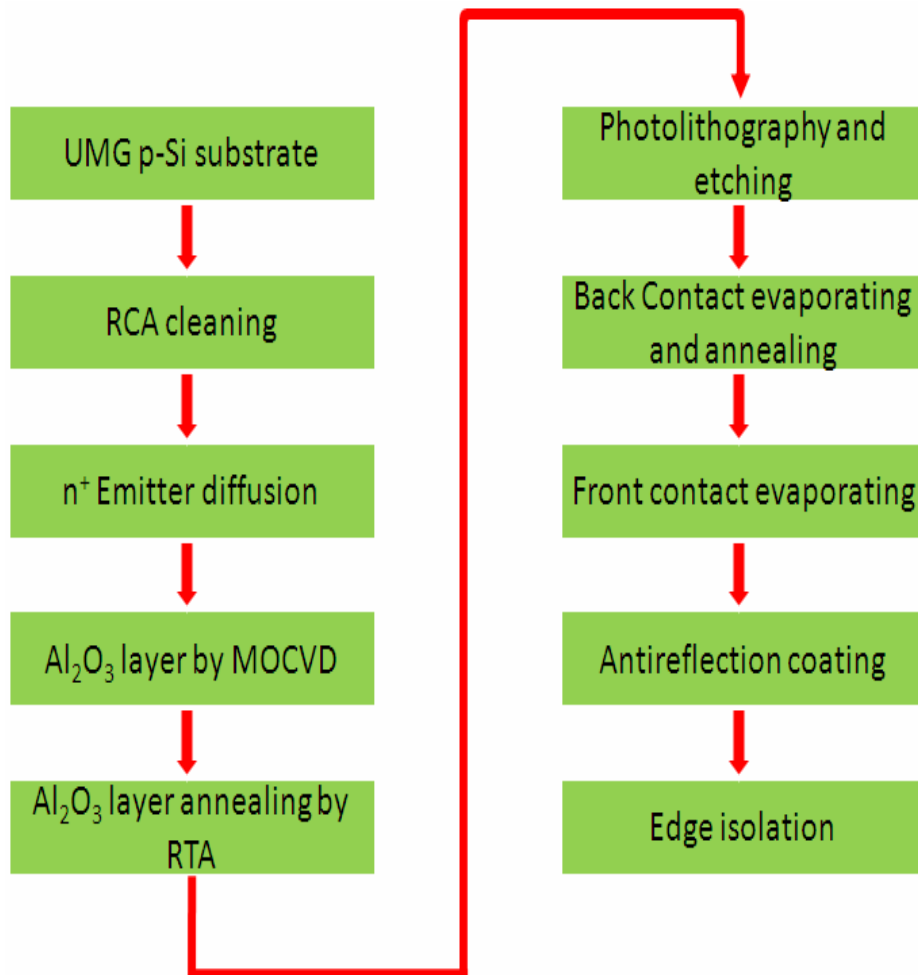
Deposition technique	Substrate	$S_{\text{eff}} \text{ cm/s}$	$Q_f \text{ cm}^{-2}$
APCVD [2]	2 $\Omega$ -cm	210	$-3 \times 10^{12}$
sol-gel [3]	Fz, 1 $\Omega$ -cm	100	$-1.6 \times 10^{12}$
PA-ALD [4]	Fz, 2 $\Omega$ -cm	6	$-1 \times 10^{13}$
PECVD (with CO <sub>2</sub> ) [5]	Cz, 10 $\Omega$ -cm	10	$-1.6 \times 10^{12}$
RF sputter AlO <sub>x</sub> [6]	Fz, 0.8 $\Omega$ -cm	55	$-3 \times 10^{12}$
PECVD [7]	Fz, 1 $\Omega$ -cm	10	$-2.1 \times 10^{12}$



## 貳、研究方法與過程

為了降低矽材料的使用成本，本計畫使用相對廉價的 UMG-Si 基板來研製太陽能電池，標準製程如圖一所示，利用外部去疵的方式來降低基板內部有害金屬雜質，同時為了在轉換效率上亦能有效的提升，在太陽能電池的背表面層部分採用由常壓式化學氣相沉積 (AP-MOCVD) 所製作氧化鋁薄膜層，最終形成所謂 PERL 精煉冶金級矽太陽能電池結構。

### 一、標準製程



圖一 太陽能電池的標準製程流程圖

## 二、基板清洗步驟

我們將基板削減為 4 厘米×4 厘米。在裝置基座之前，標準 RCA 清洗步驟如下：

步驟	說明
步驟 1	將晶片先後浸泡在三氯乙烯(TCE)和丙酮(ACE)裡，並利用超聲波清洗器各震洗三分鐘。
步驟 2	再將晶片放入去離子 (DI) 水中，浸洗 3 分鐘。
步驟 3	用氮氣槍把晶片吹乾。
步驟 4	接著在晶片放入氫氧化鉀 (20 wt.%) 加熱至 75 °C，蝕刻晶片表面 8 分鐘。
步驟 5	再將晶片放入去離子 (DI) 水中，震洗 3 分鐘。
步驟 6	之後將晶片放入氫氟酸溶液 (HF : H <sub>2</sub> O = 1:10) 約 10 秒，去除表面氧化層。
步驟 7	用氮氣槍把晶片吹乾。

## 三、PERL 的製作

PERL 製作主要分為下列五個步驟：

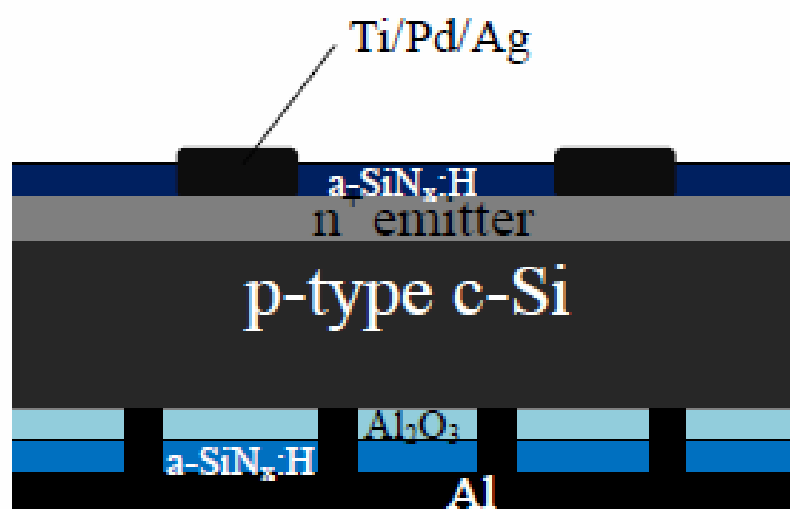
- (一) 利用磷原子擴散製作 n<sup>+</sup>-Si 射極層 (emitter layer)
- (二) 以 AP-MOCVD 法製作介電材料 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(三) 以 PECVD 法製作介電材料  $\text{SiN}_x$

(四) 微影蝕刻製作背電極接觸孔洞

(五) 正背面電極製作及正面抗反射層

完成上述的步驟後，可得一 PERL 型 UMG-Si 太陽能電池結構，其結構如下圖二所示。

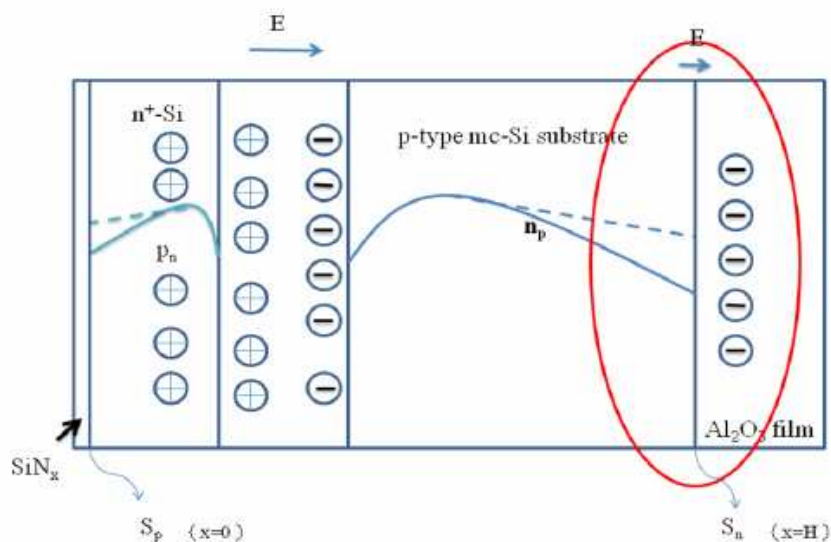


圖二 PERL 型 UMG-Si 太陽能電池示意圖

在上述 PEAL 製作中的第(二)步驟，是採用三甲基鋁(TMA)與氧氣( $\text{O}_2$ )做為沉積  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介電層的來源，承載氣體為氮氣。成長溫度：350~450  $^{\circ}\text{C}$ ，時間：10-20 分鐘。

完成 p 型區域成長介電層後，將利用電容電壓 (C-V) 量測系統 (Agilent B1500A) 確認其帶負電荷，預期帶電荷約為  $10^{10}\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ，於此範圍有最大的轉換效率 (資料來源：B. Hoex, S. B. S. Heil, E. Langereis, et.al, Applied Physics Letters 89, 042112 (2006))。而一般於太陽

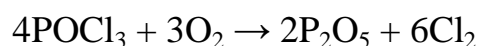
能電池的結構上，pn 接面照光後會產生少數載子電子、電洞流，由於內建電場的驅使下，會使電子往 n 型區域擴散，而電洞往 p 型區域擴散，而 p 型區域上帶負電荷的氧化鋁，可以對入射陽光所產生的少數載子電洞提供有效的吸引作用，進而提高短路電流，增加轉換效率，此乃本計畫論文之重點。在圖三中，自由電洞的行進方向在界面處就會受到氧化鋁帶電荷的牽制。圖中右側區域主要收集自由電洞，自由電子則往左側擴散。

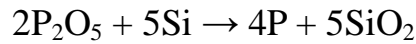


圖三 自由電子與電洞行進方向示意圖

#### 四、磷擴散摻雜 n<sup>+</sup>形成 n-p 接面

要製作一個 n-p 接面，在這裡我們選擇了傳統的三區加溫擴散爐。我們用氮氣做為載氣將 POCl<sub>3</sub> 通入腔體內，之後在通入氧氣進行反應。化學反應過程如方程式所示。





當  $\text{P}_2\text{O}_5$  滿足在高溫，它會與矽表面發生反應，形成一個含有豐富 P 的  $\text{SiO}_2$  薄膜，當溫度達到  $800^\circ\text{C}$  時，磷原子將被摻雜到矽裡面並形成  $n^+$  射極層。之後再將晶片浸泡在稀釋過的 HF 去除  $\text{SiO}_2$  薄膜。

## 五、氧化鋁薄膜沉積

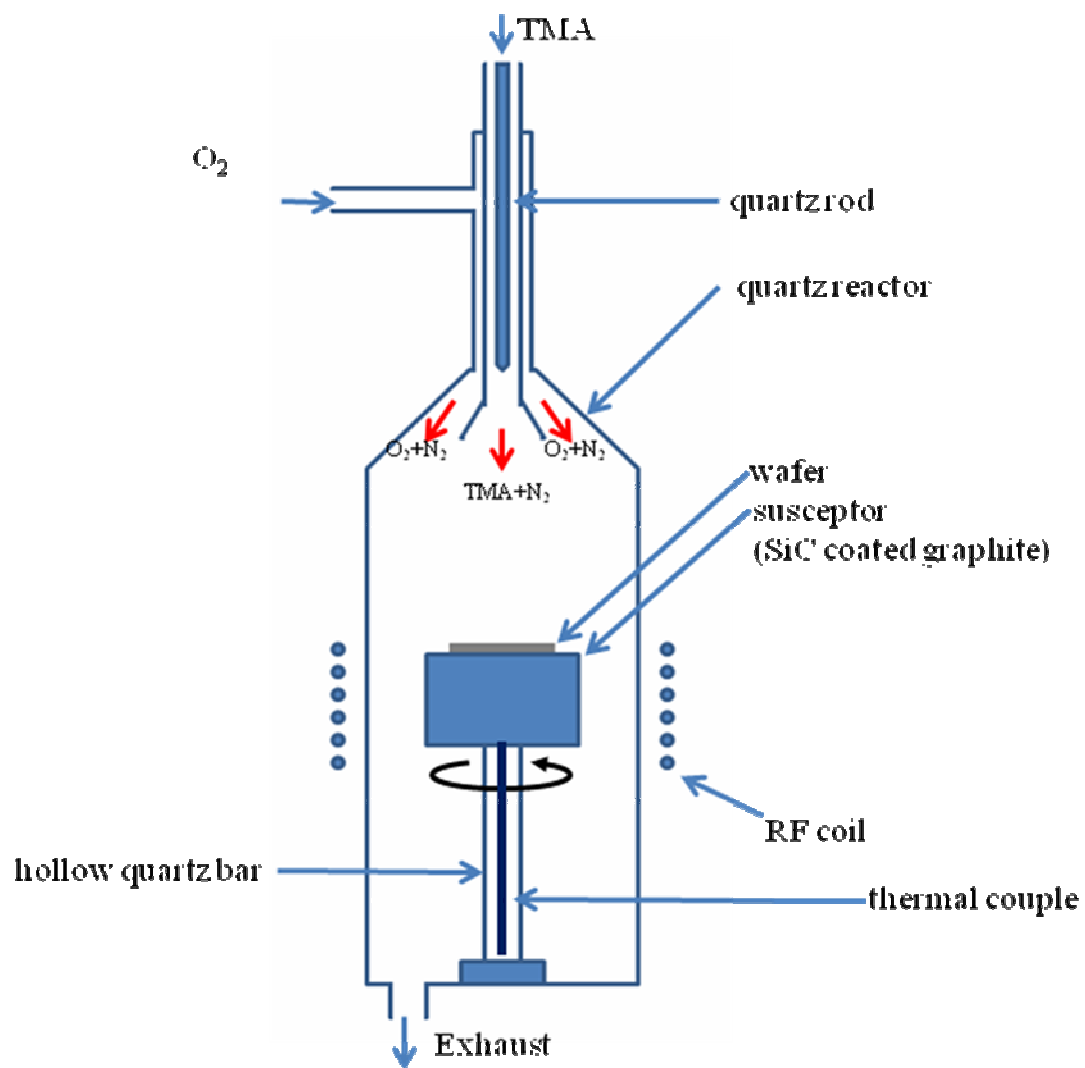
氧化鋁薄膜是以自組式的常壓金屬有機物化學氣相沉積系統製備，成長腔體為氣冷式石英製的直立反應管，基座為直徑兩吋的石墨以石英管支撐，其藉由圍繞在石英管外的射頻線圈加熱石墨感熱體，並以馬達旋轉，石墨感熱體溫度的控制是藉由位於基座下方的 PID 控制器與熱電偶，系統外有一個自動風扇用於幫助反應腔體的冷卻。腔體內有一圓錐形噴嘴同時噴嘴內有一石英棒用以控制氣流圖案 (flow pattern)。為了避免不必要的反應發生，三甲基鋁 (TMA) 與氧氣 ( $\text{O}_2$ ) 會在石墨基座上方混合，三甲基鋁由鐘狀噴嘴內導入而氧氣則是由石英管壁與噴嘴之間導入。質量流量控制器用以控制器體流量，排氣系統則位於腔體底部，圖四為沉積氧化鋁薄膜之 AP-MOCVD 反應腔體之示意圖。

鋁原子的來源為三甲基鋁 (TMA)，氧原子的來源為氧氣 ( $\text{O}_2$ )，乘載氣體為氮氣 ( $\text{N}_2$ )，完整的沉積步驟如(A)(B)所示：

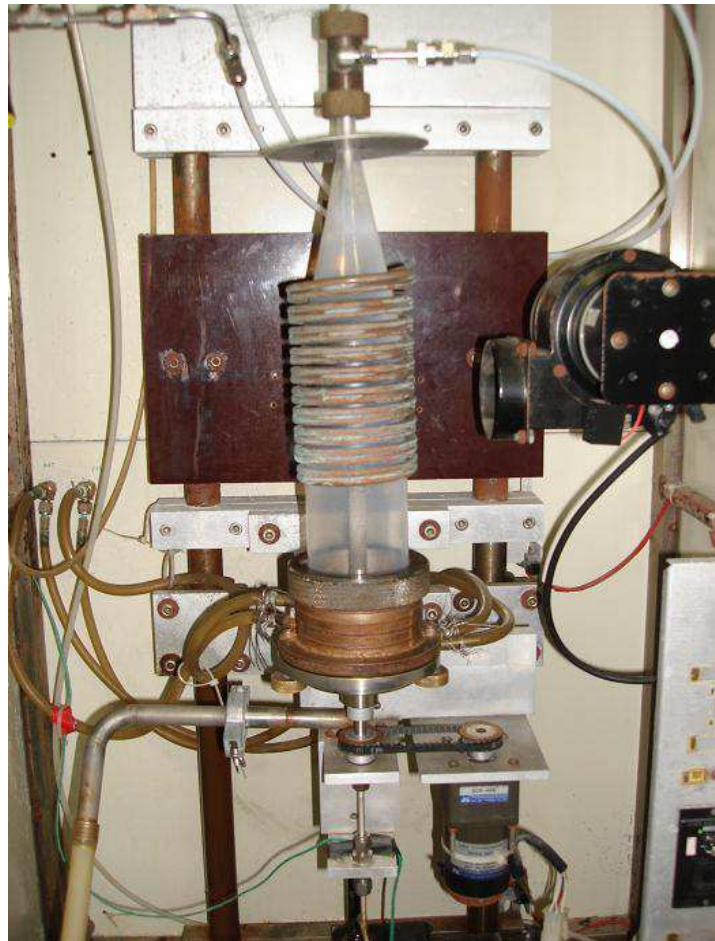
(A) 成長前腔體熱處理，於  $\text{HCl}+\text{H}_2$  混合氣體中以  $1050^\circ\text{C}$  烘烤 15 分鐘，

目的在於去除腔體內和石墨中殘餘雜質。

(B) 沉積氧化鋁介電層，成長溫度：450~550°C，時間：7~20 分鐘。



圖四 沉積氧化鋁薄膜所用 AP-MOCVD 反應腔之示意圖



圖五 自組式 AP-MOCVD 反應腔體

## 六、CZ-Si 沉積氧化鋁薄膜

採用 CZ-Si 的 p-type 基板，晶格方向為(100)，電阻率為  $15\Omega\text{-cm}$ ，厚度為  $675\mu\text{m}$ 。經由 RCA 標準清洗步驟後，在基板上的正背兩面採用常壓式有機金屬化學沉積法沉積氧化鋁薄膜，在成長前，腔體於  $\text{HCl} + \text{H}_2$  混合氣體中以  $1160^\circ\text{C}$  烘烤數分鐘做熱處理，目的在於去除腔體內和石墨基座中殘餘雜質，接著沉積氧化鋁鈍化層，分別使用不同的流量的乾氣 ( $\text{O}_2$ ) 或水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 以及三甲基鋁 (TMA) 作為氧原子與鋁原子的來源，並使用氮氣做為乘載氣體。在不同的沉積溫度進行氧化鋁薄膜沉

積，在將沉積完氧化鋁薄膜的 CZ-Si 基板在 RTA 用 400°C 的 forming gas 回火 (H<sub>2</sub> 10%、N<sub>2</sub> 90%，FGA)，藉由微波反射光導衰減 ( $\mu$ -PCD) 量測少數載子的生命週期並計算其表面複合速率 (SRVs)。並探討其不同條件下沉積氧化鋁鈍化層的鈍化效果 (passivation)。

### 七、少數載子生命期量測

採用微波光導衰減法量測少數載子生命期，微波光導衰減法量測少數載子生命期主要包括半導體雷射 (0.98 $\mu$ m) 激發產生電子-電洞對和微波探測信號衰減兩個過程。半導體雷射的激發產生電子-電洞對，導致樣品電導率增加，當移除外界光激發時，電導率隨時間呈指數衰減，這一趨勢間接反映少數載流子的衰減趨勢，從而通過微波探測電導率隨時間變化的趨勢就可以得到少數載子的生命期。 $\mu$ -PCD 量測得到的是有效的少數載子生命期，它會受到兩個因素影響：塊體生命期 (bulk lifetime) 和表面生命期 (surface lifetime)。測得之少數載子生命期可用 (2-1) 式表示：

$$\frac{1}{\tau_{meas}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{surf}} \dots\dots\dots(2-1)$$

式中：



$$\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 D_{n,p}}$$

$$\tau_{surf} = \frac{d}{2S}$$

$\tau_{diff}$  為少數載子從樣品的 bulk 擴散到表面所需的時間； $\tau_{surf}$  為由樣品表面複合產生之表面生命期； $\tau_{meas}$  為樣品量測之少數載子生命期； $d$  為樣品厚度； $D_n$ 、 $D_p$  分別為電子、電洞之擴散係數； $S$  為表面複合速率。

當  $\tau_{bulk}$  為無限大、 $\tau_{diff}$  為零時，可得最大有效表面複合速率  $S_{MAX}$ ：

$$S_{MAX} = \frac{d}{2\tau_{meas}} \dots \dots \dots (2-2)$$

針對樣品沉積氧化鋁薄膜前後及回火前後作量測，觀察氧化鋁薄膜對矽基板少數載子生命期之提升效果，並利用量測結果計算有效表面複合速率 ( $S_{eff}$ )。

### 參、主要發現與結論

實驗結果我們嘗試用UMG-Si基板在450°C的環境下用氧氣沉積完氧化鋁薄膜後，藉由不同的回火條件，分別少量測其載子生命週期（lifetime），以求其最佳的表面鈍化效果。其結果分別由下圖六及圖七所示，在量測其少數載子生命週期後，可得氧化鋁薄膜最佳的回火條件為500°C、30分鐘。

接著我們先用基本製程用磷擴散作n-p介面，再蒸鍍上正反電極做為太陽能電池元件當作基準片，其I-V量測太陽能轉換效率為10.44%；再利用前述的實驗方法將氧化鋁薄膜沉積於p型基板背面，其轉換效率最高為13.57%，分別記錄於下表二、圖八。我們可以明顯的發現其轉換效率比未做PERL技術多了接近3%的。由此結果我們可以證實了氧化鋁薄膜沉積在p型基板背後確實有鈍化效果，並增加了少數載子的壽命，降低表面複合速率，所以太陽能轉換效率才有顯著提升。

由上述結果可知利用PERL技術太陽能轉換效率可以有顯著的提升。我們再繼續氧化鋁薄膜作探討，我們利用常壓式有機金屬物化學氣相沈積法沉積氧化鋁薄膜，我們試著改變不同的沉積時間來探討不同的氧化鋁薄膜沉積厚度對於效率是否改變。

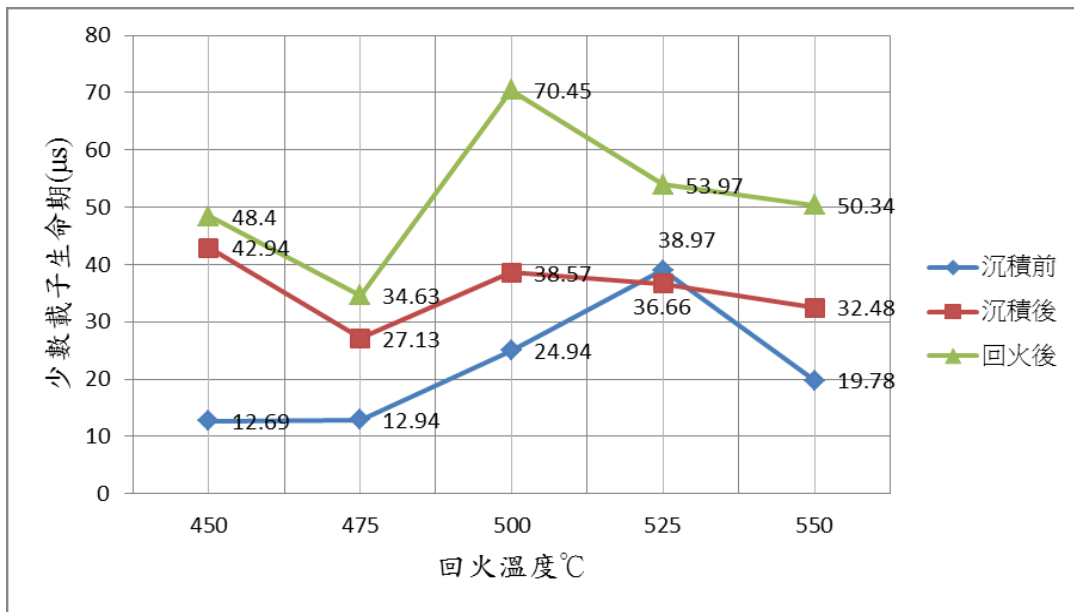
另外我們還有用CZ-Si的基板去實驗成長氧化鋁，結果首先觀察其在固定三甲基鋁的流量 $10 \mu\text{m}/\text{mole}$ ，然後沉積溫度450°C通入不同流量的氧分別為45、77、101、114、129.5、152 c.c/min去沉積氧化鋁薄膜，

沉積完再用forming gas回火10分鐘，可得到在77 c.c/min的時候有最好的鈍化效果，其結果如表三、圖九所示，接著試著改變沉積的溫度在430、450、475、500、525、550°C結果發現氧化鋁薄在低溫430°C沉積回火後有最高的少數載子生命和最好的鈍化效果，其結果如表四、圖十所示，而且隨著沉積溫度的升高，可以明顯的看出其少數生命載子週期會明顯的下降，鈍化效果變差。

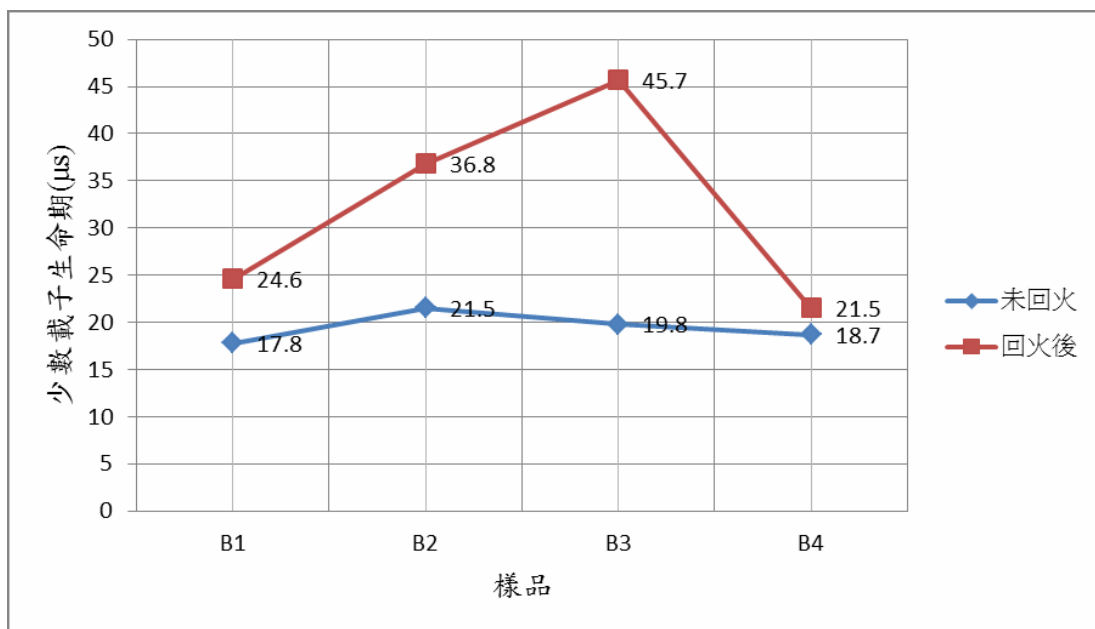
再來我們試著用水，做為氧化鋁薄膜氧的來源來進行沉積，我們還是一樣先固定三甲基鋁流量為19 $\mu\text{m}/\text{mole}$ ，然後在350°C的沉積溫度，通入不同流量的水25、30、32.5、35、40 c.c/min沉積氧化鋁薄膜，最後在經過10min的400°C forming gas沉積後回火，其結果我們可以發現在水的流量35c.c/min的時候有非常好的鈍化效果，我們已經得到在水的流量35c.c/min有最高的少數載子生命週期，其結果如表五、圖十一所示，為求其最佳的表面鈍化效果，所以接著我們固定水的流量為35 c.c/min和三甲基鋁流量為19  $\mu\text{m}/\text{mole}$ ，在不同的沉積溫度330、350、370、380、390、400、450、475°C沉積氧化鋁薄膜，然後一樣用400°C forming gas回火10min。其結果分別由下表六、圖十二所示，可以看到在350°C沉積後回火時有最優異的表面鈍化效果，回火前後載子生命週期提升了1729.934 $\mu\text{s}$ ，然後可以看到隨著沉積溫度的升高到350°C後，沉積後回火的載子生命週期會有很明顯地下降尤其到了450°C回火之後的少數生命週期的值會呈現負成長，代表越高溫沉積後回火的氧化鋁薄膜，它的

鈍化效果是越不好的。

濺鍍沉積法 (Sputtering Deposition) 與原子層沉積法 (Atomic Layer Deposition, ALD) 是現今沉積氧化鋁薄膜較常見的方式，但因為此二種方法分別有生產量小且昂貴，所以我們利用常壓式有機金屬物化學氣相沉積法 (AP-MOCVD) 沉積氧化鋁可以有效降低生產成本，在本研究裡氧化鋁薄膜成長最佳條件為在沉積溫度 $350^{\circ}\text{C}$ ，用水做為氧的來源在流量 $35\text{ c.c/min}$ ，然後用 $400^{\circ}\text{C}$  forming gas回火 $10\text{min}$ 的時候可以得到非常高的少數載子生命週期 $1915.271\mu\text{s}$ 和非常低的表面速率 $17.622\text{ cm/s}$ ，這個值已經超越一般Sputter接近PECVD的值，證明AP-MOCVD也是可以提供很好的表面鈍化效果，並可以增加少數載子生命週期由原先的 $185.337\mu\text{s}$ 增加到 $1915.271\mu\text{s}$ 。



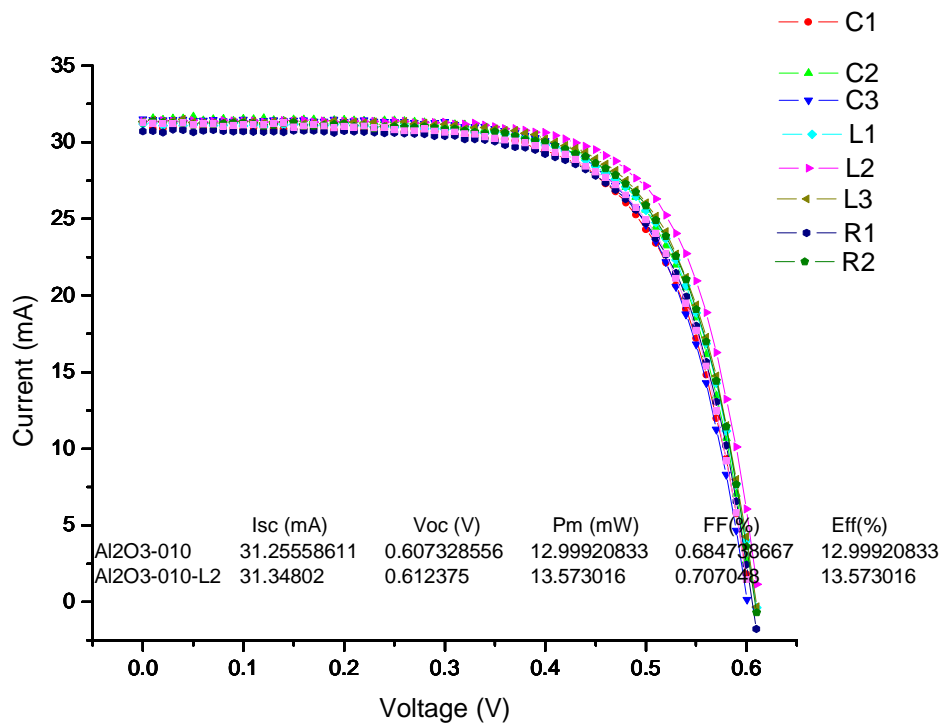
圖六 分別針對 450°C、475°C、500°C、525°C、550°C 條件做回火條件



圖七 對 500°C 做 10、20、30、40 (B1、B2、B3、B4) 分鐘回火

表二 在 AM=1.5 下，太陽能電池之 I - V 轉換效率

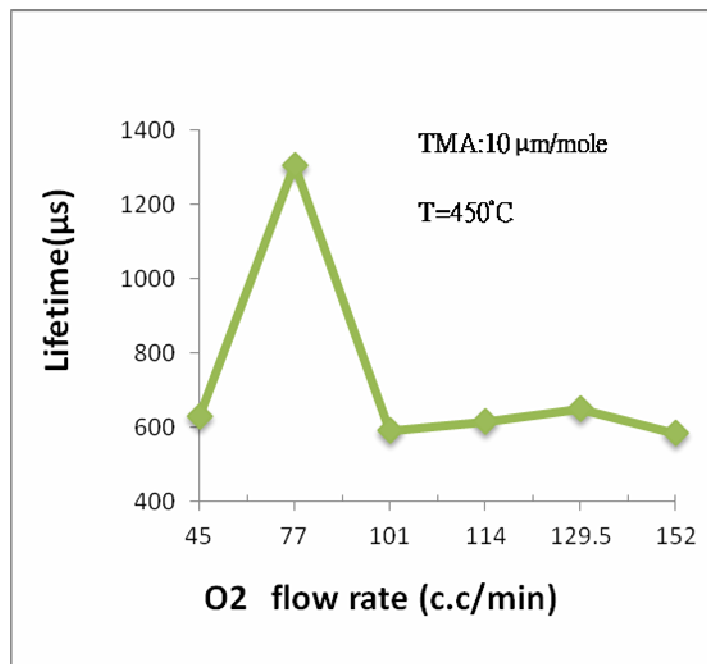
	Voc (V)	Isc(mA)	Pm(mW)	FF(%)	Eff(%)
未做 PERL	0.559377	29.14992	10.4419	0.64038	10.4419
PERL on UMG-Si	31.34802	0.612375	13.57302	0.707048	13.57302



圖八 在 AM=1.5 下，PERL 太陽能電池之 I-V 轉換效率

表三 450°C下不同流量的的氧化鋁薄膜 lifetime

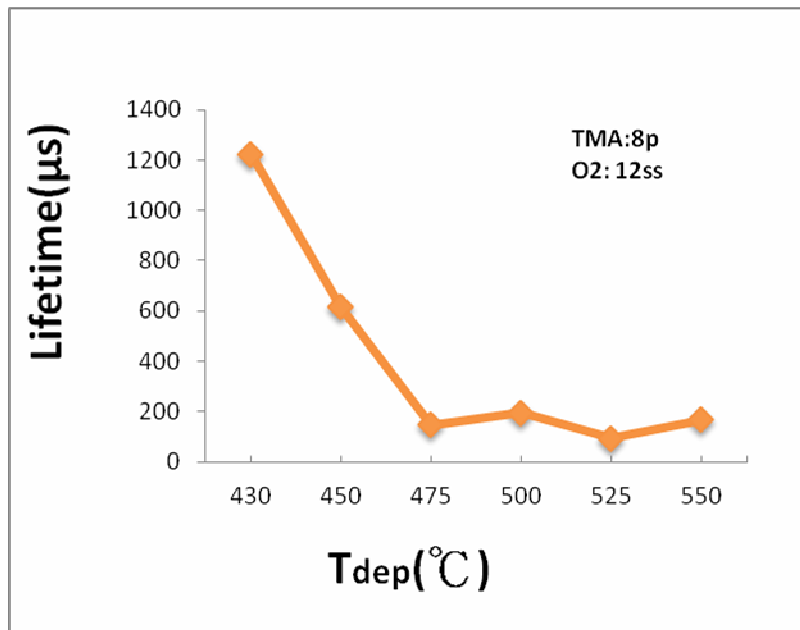
Sample	TMA ( $\mu\text{m}/\text{mole}$ )	Tdep ( $^{\circ}\text{C}$ )	O2 flow rate (c.c/min)	Original ( $\mu\text{s}$ )	After annealing ( $\mu\text{s}$ )	Original Seff,max (cm/s)	After annealing Seff,max (cm/s)
NO.282	10	450	45	513.08	629.25	65.779	53.635
NO.278	10	450	77	976.4	1308.34	34.566	25.796
NO.280	10	450	101	522.06	592.42	64.648	56.97
NO.277	10	450	114	543.08	616.4	62.146	54.753
NO.275	10	450	129.5	557.98	648.91	60.486	52.01
NO.276	10	450	152	456.46	584.12	73.939	57.597
Annealing Condition : 400°C 10mins forming gas (H2 10%、N2 90%)							



圖九 450°C下不同流量的的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖

表四 在同樣流量的氧不同溫度下的氧化鋁薄膜 lifetime

Sample	TMA ( $\mu\text{m}/\text{mole}$ )	Tdep ( $^{\circ}\text{C}$ )	O2 flow rate (c.c/min)	Original ( $\mu\text{s}$ )	After annealing ( $\mu\text{s}$ )	Original Seff,max (cm/s)	After annealing Seff,max (cm/s)
NO.285	10	430	114	863.12	1222.97	39.103	27.597
NO.277	10	450	114	543.08	616.04	62.14	54.753
NO.283	10	475	114	158.67	146.56	212.706	230.281
NO.284	10	500	114	155.08	194.87	217.742	173.192
NO.286	10	525	114	83.27	92.31	405.308	365.665
NO.287	10	550	114	149.71	167.02	225.451	202.072
Annealing Condition : 400 $^{\circ}\text{C}$ 10mins forming gas (H2 10% · N2 90%)							

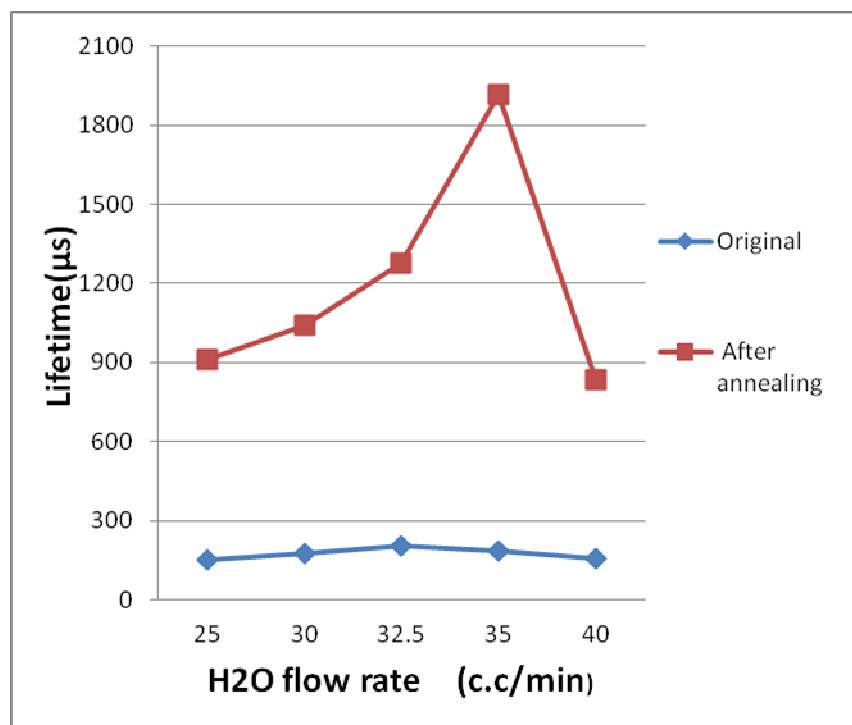


圖十 在同樣流量的氧不同溫度下的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖



表五 在 350°C 下不同流量的水的氧化鋁薄膜 lifetime

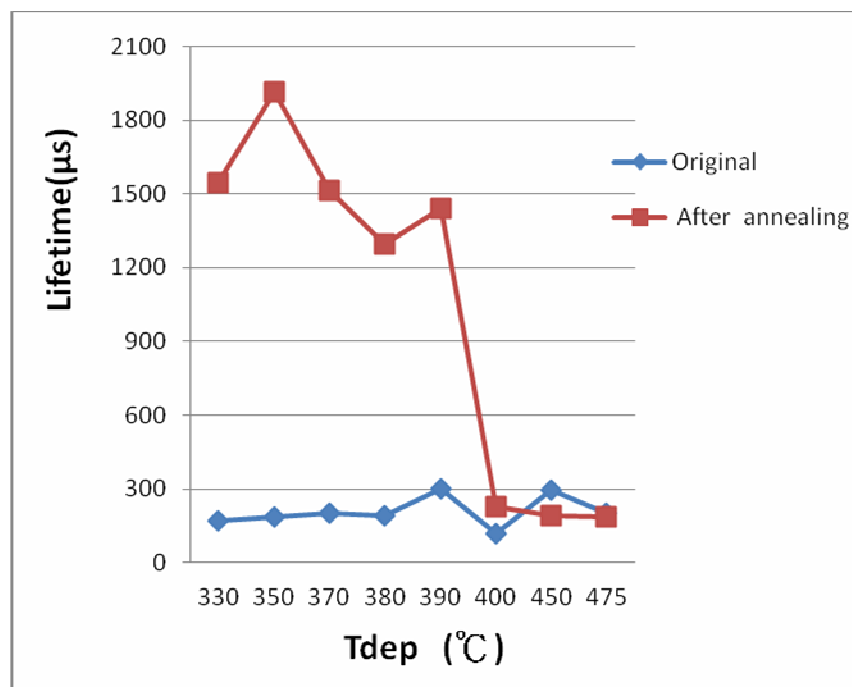
Sample	TMA ( $\mu\text{m}/\text{mole}$ )	Tdep ( $^{\circ}\text{C}$ )	H <sub>2</sub> O flow rate (c.c/min)	Original ( $\mu\text{s}$ )	After annealing ( $\mu\text{s}$ )	Original S <sub>max,eff</sub> (cm/s)	After annealing S <sub>max,eff</sub> (cm/s)	difference
NO.355	19	350	25	150.455	912.34	224.32	36.993	761.88
NO.356	19	350	30	176.28	1039.138	191.457	32.479	863.03
NO.252	19	350	32.5	203.054	1278.304	166.212	26.402	1075.25
NO.263	19	350	35	185.337	1915.271	182.101	17.622	1729.934
NO.354	19	350	40	154.69	835.089	218.179	40.415	680.4
Annealing Condition : 400°C 10mins forming gas (H <sub>2</sub> 10% · N <sub>2</sub> 90%)								



圖十一 在 350°C 下不同流量的水的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖

表六 流量 35c.c 的水，在不同沉積溫度的氧化鋁薄膜 lifetime

Sample	TMA ( $\mu\text{m}/\text{mole}$ )	Tdep ( $^{\circ}\text{C}$ )	H <sub>2</sub> O flow rate (c.c/min)	Original ( $\mu\text{s}$ )	After annealing ( $\mu\text{s}$ )	Original S <sub>max,eff</sub> (cm/s)	After annealing S <sub>max,eff</sub> (cm/s)	difference
NO.362	19	330	35	170.959	1542.72	197.416	21.877	1371.761
NO.363	19	350	35	185.337	1915.271	182.101	17.622	1729.934
NO.357	19	370	35	203.68	1515.306	165.701	22.273	1311.626
NO.359	19	380	35	192.649	1296.133	175.189	26.039	1103.484
NO.358	19	390	35	300.365	1439.013	112.363	23.454	1138.648
NO.365	19	400	35	121.121	228.63	278.647	147.618	107.509
NO.367	19	450	35	295.912	192.79	114.054	175.061	-67.122
NO.368	19	475	35	201.252	187.579	167.7	179.924	-13.673
Annealing Condition : 400 $^{\circ}\text{C}$ 10mins forming gas (H <sub>2</sub> 10% · N <sub>2</sub> 90%)								



圖十二 流量 35c.c 的水，在不同沉積溫度的氧化鋁薄膜 lifetime 示意圖

## 參考文獻

- [1] G. Beaucarne, F. Duerinckx, I. Kuzma, K. Van Nieuwenhuysen, H.J. Kim, J. Poortmans, *Thin Solid Films* 511-512 (2006) 533-542.
- [2] E. Schmich, S. Lindekugel, S. Reber, “Improvement of Epitaxial Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells at Fraunhofer ISE“, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 15.05.2008, Germany.
- [3] A. Bentzen,, B.G. Svensson, E.S. Marstein, A. Holt, “The influence of structural defects on phosphorus diffusion in multicrystalline silicon”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90 (2006) 3193–3198
- [4] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang, and A. W. Blakers, “Silicon concentrator solar cell development,” Sandia National Lab., Rep.SAND 89-7043, May 1990, p. 53.
- [5] B. Hoex, S. B. S. Heil, et al., *Applied Physics Letters* 89,042112 (2006)
- [6] J. Schmidt, A. Merkle, et al.,” Progress in the surface passivation of silicon solar cells”, 23th EU-PVSEC, Valencia, Spain(2008)
- [7] Jan Schmidt, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, Sept.(2008)
- [8] G. Dingemans, M. C. M. van de Sanden, and W. M. M.Kessels, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 13(3) H76-H79(2010)