

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

可撓式光電薄膜感測器元件之製程整合特性研究

**Investigation on the process integration of flexible photoelectric
thin film sensor**

計畫編號：1042001INER006

受委託機關(構)：國立中山大學

計畫主持人：張鼎張 教授

聯絡電話：07-5252000#3708

E-mail address：tcchang3708@gmail.com

核研所聯絡人員：王敏全 博士

報告日期：民國 103 年 12 月 15 日

目 錄

| | |
|----------------------------|----|
| 目 錄..... | I |
| 中文摘要..... | 1 |
| 英文摘要..... | 2 |
| 壹、計畫緣起與目的..... | 3 |
| 貳、研究方法與過程..... | 5 |
| 一、可撓曲薄膜型感測器之基本光電特性研究：..... | 5 |
| 二、環境溫度下之元件特性變化研究：..... | 5 |
| 三、撓曲下之元件特性變化研究：..... | 5 |
| 四、可撓曲雙色光感測器結構之光電特性研究：..... | 5 |
| 參、主要發現與結論..... | 6 |
| 一、光感測器之基本光電特性..... | 6 |
| 二、吸收層厚度對特性影響..... | 11 |
| 三、光感測器在撓曲下之特性變化..... | 13 |
| 四、雙色光感測器結構之光電特性..... | 16 |
| 肆、參考文獻..... | 8 |

中文摘要

近年來，隨著手機、穿戴式裝置等 3C 產品日益普及，人們對於隨身電子裝置的要求也逐漸增加，期許穿戴式裝置除了擁有『顯示』功能之外，還能擁有更多的功能，如：光感測器、溫度感測器、氣體感測器等，其中又以光感測器最為重要。但現今受限於感測器的特性會隨著彎曲曲率變化而有所改變，以及可靠度不佳的影響，導致迄今仍無法整合於電子裝置之中，因此本計畫將針對可撓曲感測薄膜於不同撓曲狀態之暗特性與光特性比較，我們利用不同的電性量測分析方式，如電壓脈衝(pluse IV)、電容電壓分析與活化能等方式，配合在不同曲率半徑下之測試，來分析感測器之中各層薄膜的缺陷狀態，並探討元件之溫度效應，以提升元件性能、增加元件壽命、並釐清相關物理機制為主要目標。藉由物理機制與缺陷分布的釐清，將可調變製程參數來最佳化薄膜品質與缺陷狀態，得到最佳的非晶矽 PIN 感測器效能。

關鍵詞：光偵測器、非晶矽、撓曲

英文摘要

In recent year, people have more require for portable electronic devices with the popularity increasing of mobile phone and portable electronic products. In additional to the “display” function, the wearable electronics have the other function, such as optical sensor, temperature sensor, and gas detector. The optical sensor is the most important one, but it is limited by the characteristic variations in the curvature radius and the instability. Therefore, the optical sensor is unable to integrate in the electronic devices. The characteristic analysis and efficiency influenced by the thin film trap state applied on a-Si PIN sensors will be discussed in this project. We can obtain the higher efficiency by optimum the trap state distribution in a-Si PIN sensors. We use different analysis method such as pulse IV 、 voltage-capacitance and activation energy to analyze the trap state in every layer of sensors. And we also change the process parameter to optimum the quality of thin film and trap state.

Key Word : Light detector 、 Amorphous silicon 、 Bending

壹、計畫緣起與目的

近年來，隨著各家大廠包括蘋果(Apple)、三星電子(Samsung Electronics)、Nike 紛紛發表智慧型電子裝置，因此掀起其餘各家大廠也跟進提出各類型穿戴式電子裝置，包括：手環、手錶、內衣、襪子、眼鏡等，但穿戴式電子裝置除了要具有顯示的功能之外，同時必須整合各種效能之感測器，包括：光感測器、溫度感測器、氣體感測器等，其中又以光感測器最受人們所重視，而現今面臨可撓式感測器對於環境因素以及彎曲變化所造成變化的原因仍不甚瞭解，因此難以整合於電子裝置之中。

薄膜型 PIN 光電感測器具有低成本、容易製程等優點，優點為較能吸收漫射光源、適合大面積生產、可做成可撓式、與建材整合之 BIPV 模組、或應用於消費性電子產品；且未來若有廠商能夠提供標準化的鍍膜設備、及自動化生產線，將會使薄膜感測器產品之製造成本大幅降低。除此之外，非晶矽薄膜光感測器的效率可能夠藉由最佳化各種參數來提升效率。根據 Parsathi 的模擬研究指出[1]，非晶矽薄膜在元件內部的載子損失大部分來自於本質層的載子復合損耗(約 7%)與電洞摻雜層(P-layer)附近的損耗(約 1.06%)。如果元件的電洞摻雜層與本質層間有介面缺陷(Interface trap)的產生，元件各處的效率損失將會大幅提升，其中電洞摻雜層(P-layer)附近的損耗將從 1.06% 提升至 8.08%。上述的載子損失除了影響元件的短路電流(J_{sc} , Short circuit current)，本質層的缺陷數過多或是電洞摻雜層與本質層的介面缺陷會影響元件的開路電壓(V_{oc} , open circuit voltage)與填充因子(F.F, Fill Factor)，因此降低元件的整體效率。除了改善薄膜缺陷與製程條件外，引入透光層(Window layer)也能提升元件的效率。傳統的透光層有高能隙的 SiC 或是低吸收的 uc-Si 的選

擇，但是高能隙的材料因為不容易摻雜形成導體造成元件的填充因子減少，Matsumoto 提出矽摻雜氧(Si:O)[2]的合金材料在相同能隙的條件下，矽摻雜氧薄膜擁有高導電度並且能改善元件效率，相關研究也指出矽摻雜氧的優點[3-9]。

在目前當紅 TFT-LCD 顯示器中，矽亦扮演著極重要的角色。且由於可撓曲式面板將是未來趨勢，相較於目前使用玻璃基板製作的顯示器，可撓曲式顯示器擁有輕、薄、耐衝擊及可曲撓的特性，因此薄膜電晶體在彎曲後的特性是相當的重要的。本研究團隊在可撓曲(flexible)元件的研究上具有許多成功且成熟的量測分析技術。我們利用在不鏽鋼基板(Metal foil)上所製作之非晶矽薄膜電晶體元件來探討元件處於彎曲狀態下的特性以及不同溫度下之信賴度，並釐清其相關物理機制。而在感測器方面，我們目前已經有一些相關的初步研究成果，如利用 Drive-level Capacitance Profiling (DLCP)的電壓電容(C-V)分析方式[10-15]來檢測非晶矽薄膜感測器的狀況。藉由改變量測時的交流電壓以求得元件缺陷的分佈狀態。除了上述方法外，尚可利用電壓脈衝(Pluse IV)方法或是活化能在不同溫度範圍的變化下研究元件特性。

以核研所開發之可撓式光電薄膜感測元件，結合國內具有完善量測設備的中山大學張鼎張實驗室，深入研究光感測器之製程整合。

貳、研究方法與過程

本計劃將分成多部分進行研究，並且比較不同曲率半徑下的薄膜特性與缺陷分佈對元件性能的影響變化，並釐清其相關物理機制。

一、可撓曲薄膜光感測器之基本光電特性研究:

- (i). 利用 IV、CV 快速電性量測分析系統，研究薄膜的載子傳輸行為。並利用不同波長的單色光，搭配電性量測，分析元件的暗電導、光電導、活化能、缺陷(defect)密度及位置等特性。
- (ii). 利用不同的驅動方式(變化驅動時間、波形、pulse train、以電壓或電流方式驅動)，研究元件的行為及其物理機制。

二、可撓曲薄膜光感測器在環境溫度下之元件特性變化研究:

- (i). 於不同環境溫度下，利用 IV、CV 快速電性量測分析系統，研究薄膜的載子傳輸行為。並利用不同波長的單色光，搭配電性量測，分析元件的暗電導、光電導、活化能、缺陷(defect) 密度及位置等特性。

三、可撓曲薄膜光感測器在不同曲率半徑下之元件特性變化研究:

- (i). 將元件分別黏至曲率半徑為 10、20、30、40、50 mm 之張應力模具上，並重複第一主題的量測方法，比較不同曲率半徑下之元件特性差異。
- (ii). 改為將元件分別黏至曲率半徑為 10、20、30、40、50 mm 之壓應力模具上，重複以上的量測。

四、可撓曲雙色光感測器結構之光電特性研究:

- (i). 改變不同元件結構設計，進行元件特性優化，比較其特性的差異，以找出薄膜內部與元件之最佳製程參數。

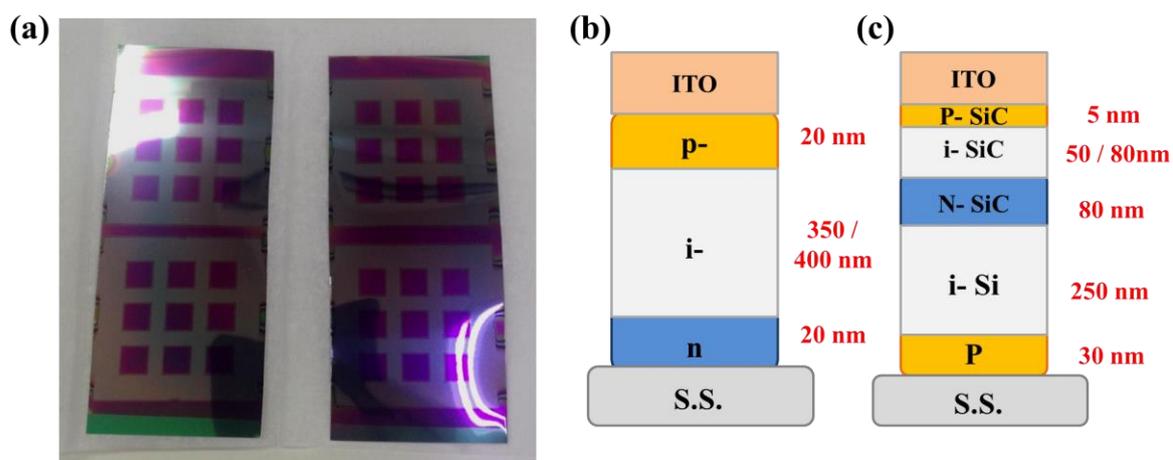
參、主要發現與結論

由核能研究所製備之可撓曲光電薄膜感測器元件，其實際樣品照與結構示意如圖一所示。樣品共有兩種結構設計。第一種為 PIN 結構之光感測器。其製作流程為，以薄不鏽鋼板作為基板，以電漿輔助化學氣相沉積法(PECVD)依序沉積 p-type 參雜之非晶矽薄膜，然後是未參雜之非晶矽，最後沉積 n-type 參雜之非晶矽薄膜。最後以物理氣象沉積方法製作透明導電膜(ITO)作為接觸電極即完成元件，結構之示意圖如圖一(b)所示。第二種感測元件為 PINIP 結構之雙色光感測器。以原本之非晶矽 PIN 感測器為基礎，再增加以碳化矽(SiC)製作之第二個界面，並反向串接而成。其結構示意表示在圖一(C)中。

一、光感測器之基本光電特性

與核能所合作開發之光感測器之操作方式，皆以鋼板做為接地，ITO 電極施加偏壓來操作。搭配不同波長之 LED 作為環境光源，其量測示意與結果如圖二、圖三所示。測試皆選取多個元件進行重複實驗，在暗態環境下，其順向偏壓下之導通電壓約為 0.7V。逆向偏壓 0.5V 下之漏電流小於 $2\mu\text{A}$ ，顯示此元件之特性良好。不同區域下之元件特性有些許差異，乃因鍍膜之均勻性所造成。光環境皆控制為照度 600 lux，波長為紅光 633 nm、綠光 535nm、藍光 475nm 以及混合之白光等四種。而比較元件再不同波長光下之光電流響應，以未加偏壓之 0V 即短路電流來作為比較，如圖四所示。未照光之暗電流極為微弱，而在紅光環境下，光電流約有 50 微安培。綠光和藍光環境下，光電流可有近 100 微安培。若使用波長 425nm 之 UV 燈做為光源，光電流可達 130 微安培。此輸出之光電流與光源波長有一相依之現象，隨著光源波長愈短，輸出之光電流愈

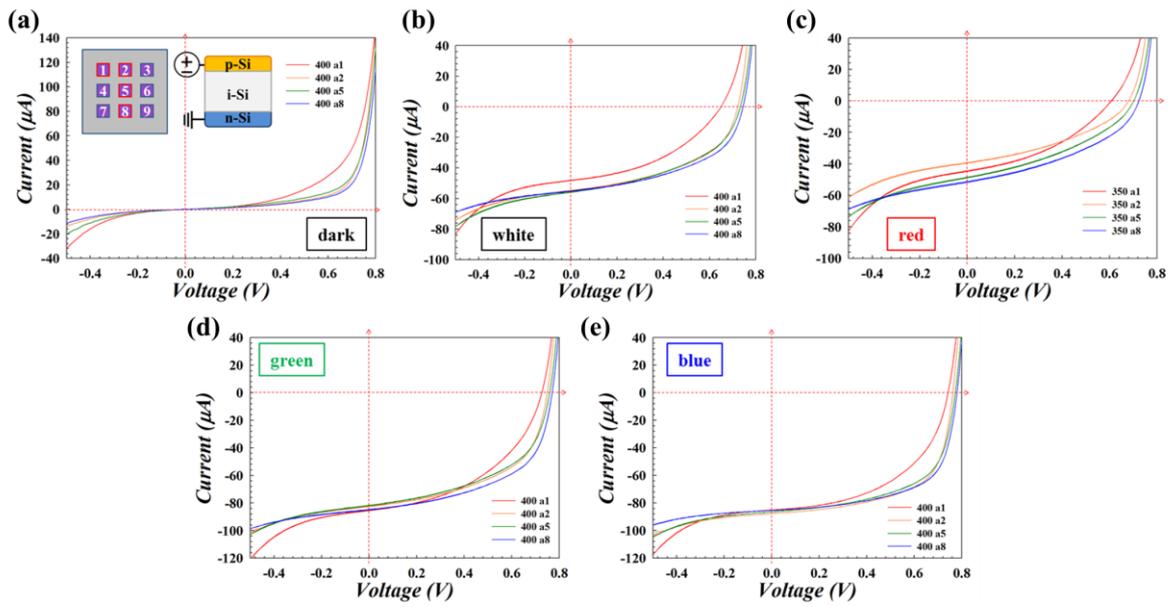
大。此現象與使用之吸光材料本質有關。由比爾朗伯定律(Beer-Lambert law)可知，物質吸光度之公式如下： $A = k \cdot l \cdot c$ ，其中A為吸光度、k為材料之吸收係數、l為吸收介質之厚度、c為吸收介質之濃度。因非晶矽薄膜為固態，且為同一元件。因此其濃度為一定值，厚度也為一固定值。有變動可能性的僅為吸收係數一項，常用之吸光材料其波長對吸收係數之關係如圖五所示，非晶矽為圖中綠線所標示。可發現非晶矽在可見光波段(400~700 nm)中皆有不錯之吸收係數，若波長超過 700nm，吸收係數則快速下降。而在可見光波段中，愈短波長處之吸收係數愈高。因此造成短波長時之吸光度較高，而使光電流提升。因而有隨環境光波長愈短，而光電流愈大之相依現象。



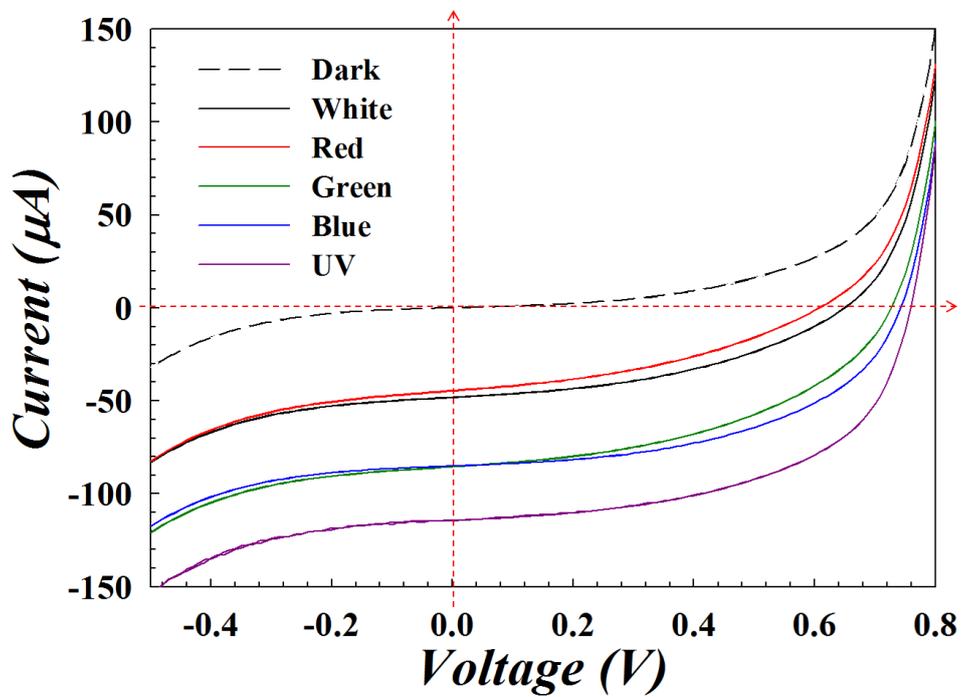
圖一 (a)可撓式光電薄膜感測器元件與(b)結構示意
以及(c)雙色薄膜感測器結構



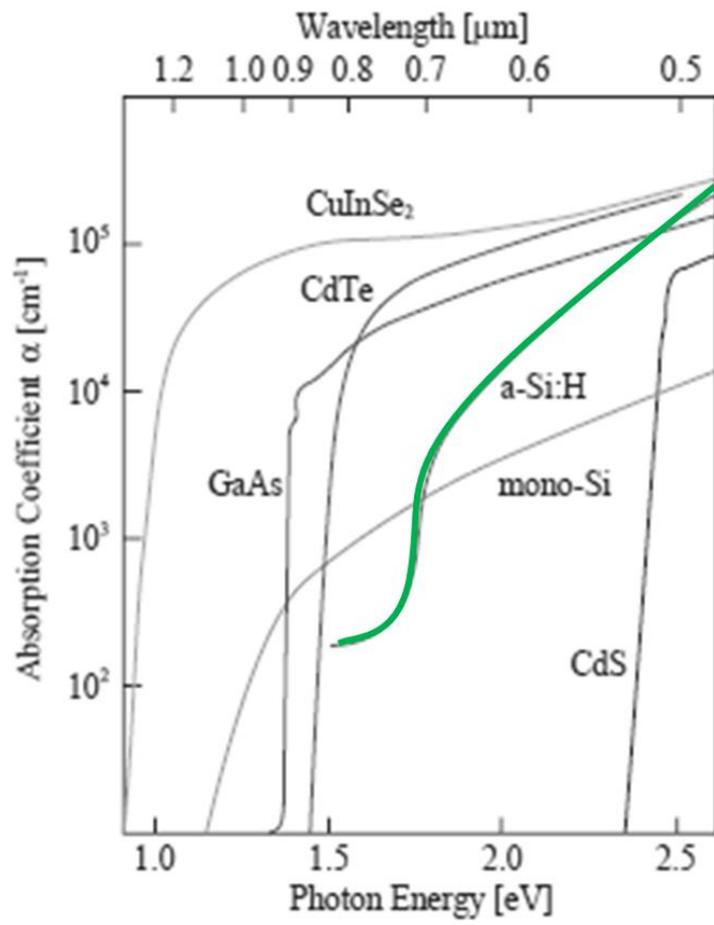
圖二 電性量測平台與單波長 LED 陣列之光源，包含紅、綠、藍色光



圖三 不同光環境下之電流電壓特性，包含(a)在暗態環境下、(b)白光環境下、(c)紅光環境下、(d)綠光環境下及(e)藍光環境下



圖四 不同波長之光電流特性比較

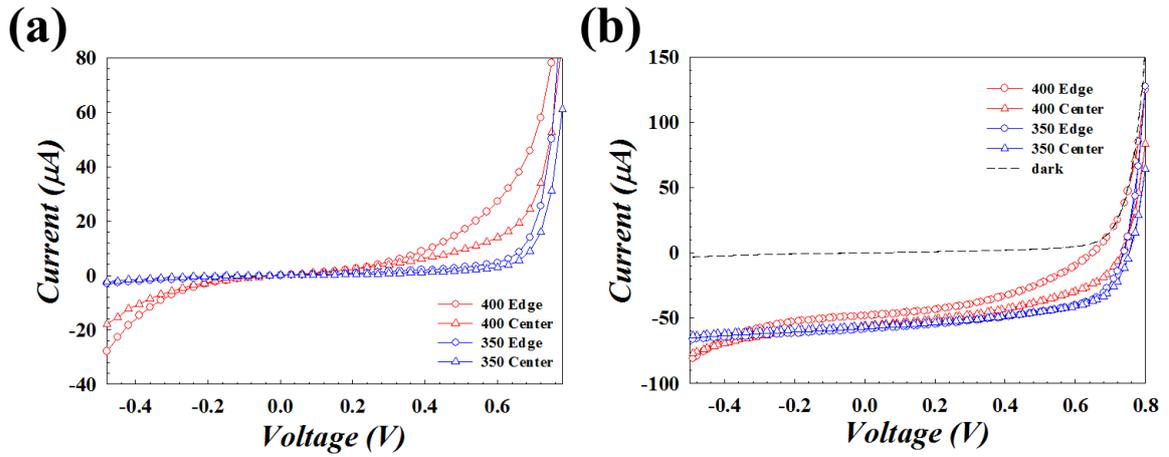


圖五 常用吸光材料之波長對吸收係數關係圖

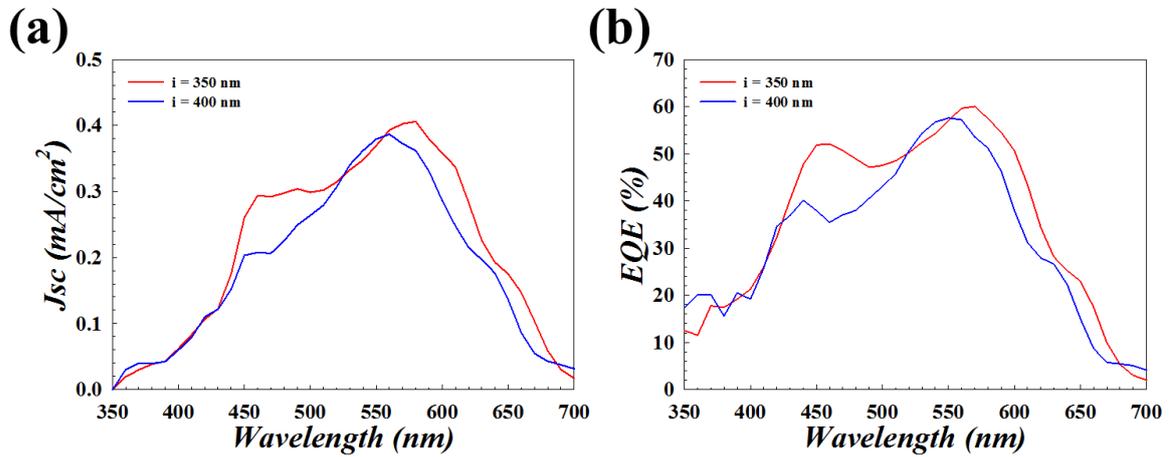
二、吸收層厚度對特性影響

此部分將改變光吸收層之非晶矽薄膜厚度，來優化元件特性。使用與前一節所述之製程，製作兩批元件。一批為較厚之吸收層，非晶矽薄膜為 400nm 厚。另一批為較薄之吸收層，非晶矽薄膜為 350nm 厚。其元件特性在暗態下與白光環境下如圖六(a)(b)所示。由實驗結果可見，因鍍膜均勻性的問題，較接近邊緣的元件特性與中央之特性有所差異。而降低吸收層厚度後因均勻性造成之差異有明顯下降。此外，逆向偏壓下之漏電現象亦有改善。針對不同光源波長，觀察其短路電流與外部量子效率與吸光層厚度之關係來作為比較，如圖七(a)(b)所示。整體而言，可發現改變吸收層厚度對其元件特性影響不顯著。僅在藍光波段(475nm)附近，較薄吸收層之短路電流有較佳，其餘並無明顯差異。

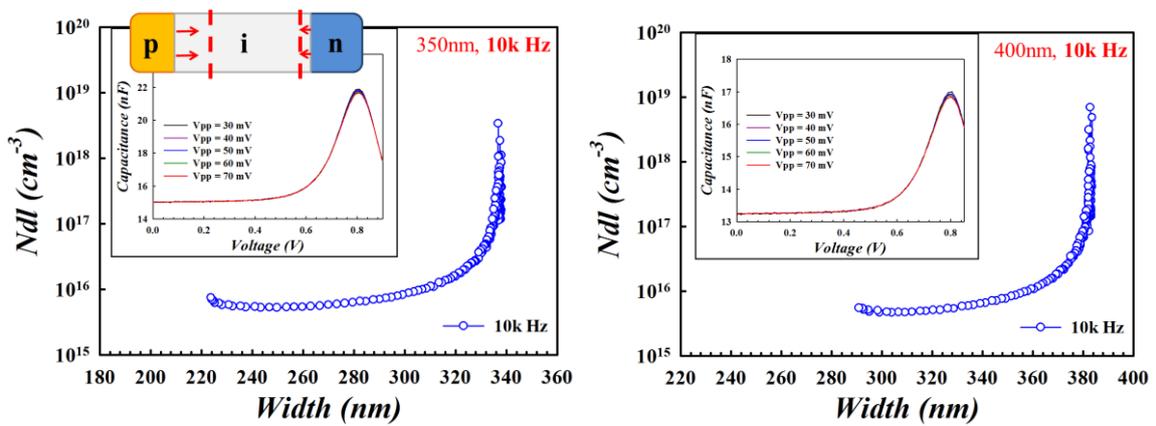
利用改變交流振幅搭配直流偏壓進行電壓電容(CV)量測。可萃取出 PN junction 內之缺陷濃度與缺陷位置之關係。由電容值與空乏區之公式轉換，可萃取出空乏區內之缺陷的物理位置 $W = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{C_0}$ 和缺陷密度 $N_{dl} = -\frac{C_0^3}{2q\epsilon_0 \epsilon_s A^2 C_1}$ [16-17]，進而求得其分佈關係。計算結果如圖八(a)(b)所示。缺陷密度從介面處較高的 10^{18} 降低之 10^{16} ，呈現一連續平緩的分佈。而改變吸光層厚度對缺陷密度並無明顯影響，空乏區內之缺陷密度一樣分布在 10^{16} 上下。因此，吸光層厚度對元件特性影響不顯著，降低厚度可些微增加均勻性以及提升藍光波段的效率。



圖六 不同吸收層厚度之電性比較在(a)暗態環境下以及(b)白光環境下



圖七 不同吸收層厚度之短路電流與外部量子效率比較

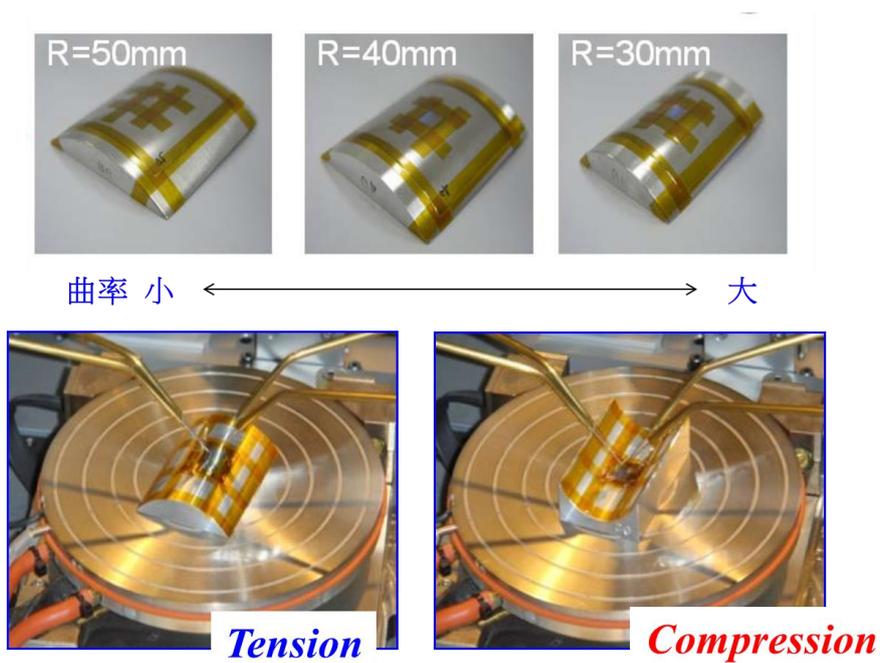


圖八 不同吸收層厚度之缺陷萃取(a)較薄吸收層(b)較厚吸收層

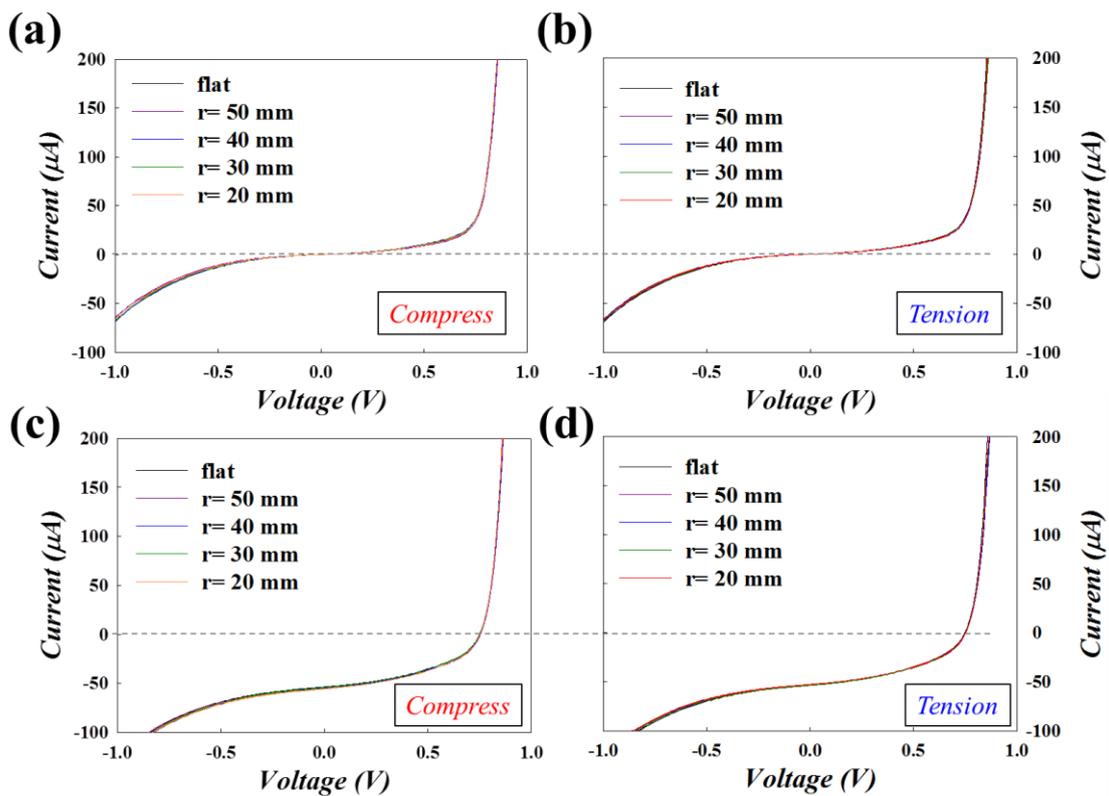
三、光感測器在撓曲下之特性變化

利用不同曲率之撓曲模具對元件進行彎曲，來探討光感測器在施加應力下之是否影響其感測能力。將元件黏貼固定在不銹鋼製之凸型以及凹型撓曲模具後，即可對元件施加應力，如圖九所示。若使用凸型載具，可對元件施加張應力。若使用凹型載具，則可施加壓應力。改變不同之曲率半徑，即可改變應力之大小。在暗態及白光之 LED 的亮態下以不同曲率之載具對同一元件重複進行電壓電流量測，實驗結果如圖十所示。在暗態下，元件之短路電流極微小。僅逆向偏壓之漏電流較大，-0.5V 讀取之漏電流約為 20 微安培。而在施加壓應力後，元件之電流特性無任何變化。持續減小載具之曲率半徑，即增加壓應力之強度，元件特性仍無受到影響，未撓曲與不同壓強度下之特性曲線完全重合，如圖十(a)所示。而改變為使用凸型載具來施加張應力並重複實驗，發現在不同張應力下之特性曲線仍是完全疊合，如圖十(b)所示。而在 600 lux 的白光環境下再次重複上述之兩種應力影響之實驗，結果如圖十(c)(d)所示。可發現未撓曲之元件，短路電流約為 50 微安。而在施加應力的狀態下，不論為張應力或壓應力，對元件的光電流均無產生影響。顯示此元件對應力之敏感度極不明顯，在撓曲裝態下，完全不影響其光偵測之靈敏度。

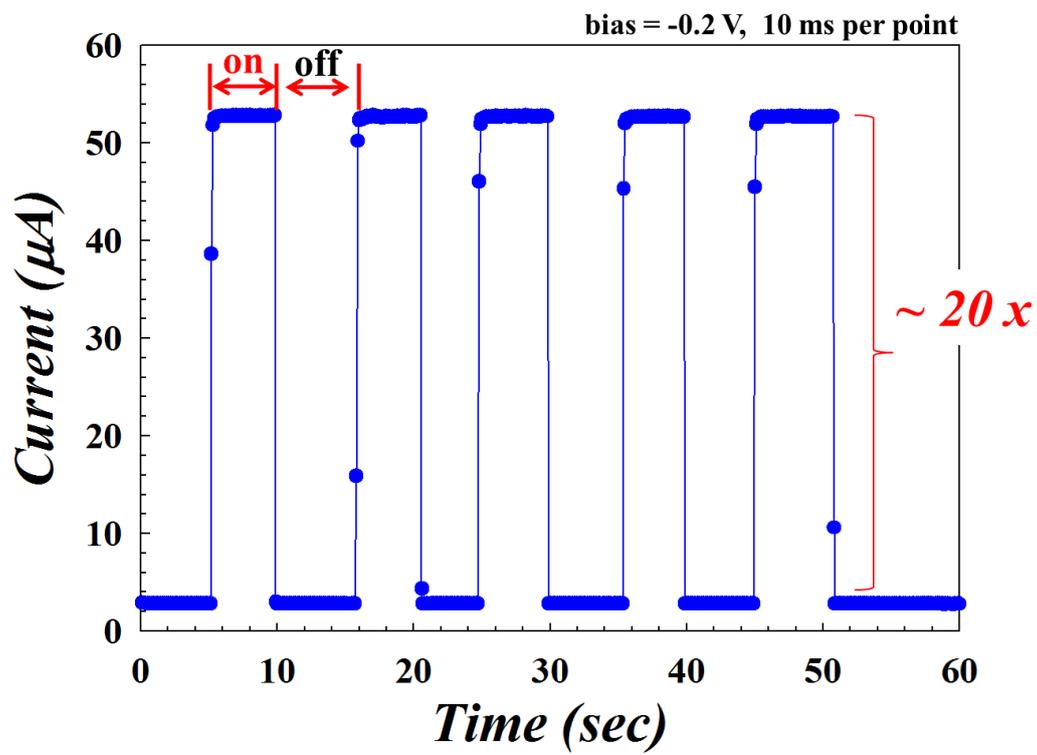
欲模擬元件實際操作情況，以-0.2V 之偏壓持續施加在元件上，以每 10 msec 讀取一次電流輸出，搭配白光 LED 陣列以 5 秒週期開關照射元件。其偵測情形如圖十一所示。未照光時，偵測之電流值穩定在 $2\mu\text{A}$ 。當光源開啟後，偵測之電流值可在 30 msec 內到達穩定，此時電流值約為 $55\mu\text{A}$ ，與暗電流可達 20 倍差距。可作為一良好之光感測。



圖九 彎曲量測載具實照，包含不同曲率之張、壓應力載具



圖十 各種撓曲條件下之特性，暗態下之不同(a)壓應力及(b)張應力與光照下之不同(c)壓應力及(d)張應力



圖十一 可撓式光電感測器之連續亮暗測試

四、雙色光感測器結構之光電特性

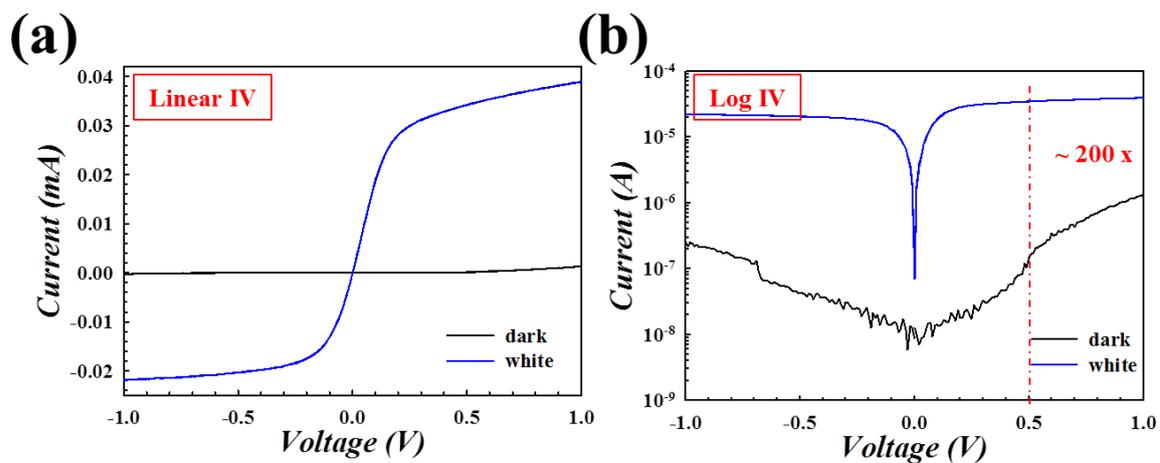
雙色光感測器為 PINIP 結構之元件。以前述之非晶矽 PIN 感測器為基礎，再增加以碳化矽(SiC)製作之第二個接面，並反向串接而成。其結構示意表示在圖一(C)中，元件操作方式一樣以鋼板端作為接地，ITO 電極端施加偏壓來進行直流電壓電流測試，並以白光 LED 作為環境光源，其量測結果如圖十二(a)所示。未照光下，不論施加正負偏壓，其電流最大都未超過 $5 \mu\text{A}$ ，無導通之現象。而白光環境下，施加正偏壓時有正電流，若施加負偏壓時，則有負電流響應，呈現一類似 S 型之曲線。將響應之電流取絕對值，並以對數軸來表現，如圖十二(b)所示。若以 +0.5V 或 -0.5V 電壓來讀取，亮態與暗態之電流差異可達 200 倍以上，可比單一 PIN 結構之光偵測器提升 10 倍以上。若是以短路電流來比較，PINIP 結構之電流差值可達 10000 倍，即 4 個 order 的差異。

改變光源，使用不同波長之 LED 光源，比較元件再不同波長光下之光電流響應，量測結果如圖十三所示。不同波長光環境下，特性曲線都仍呈現類似 S 型。在紅光環境下，負偏壓下之負電流在 -1V 電壓下約為 20 微安，而 +1V 下讀取之正電流則可達 90 微安，呈現正大於負的現象。而在藍光環境下時，-1V 下之讀取電流可達 70 微安，而 +1V 下之讀取電流僅約 10 微安，呈現與紅光相反，負大於正之現象。

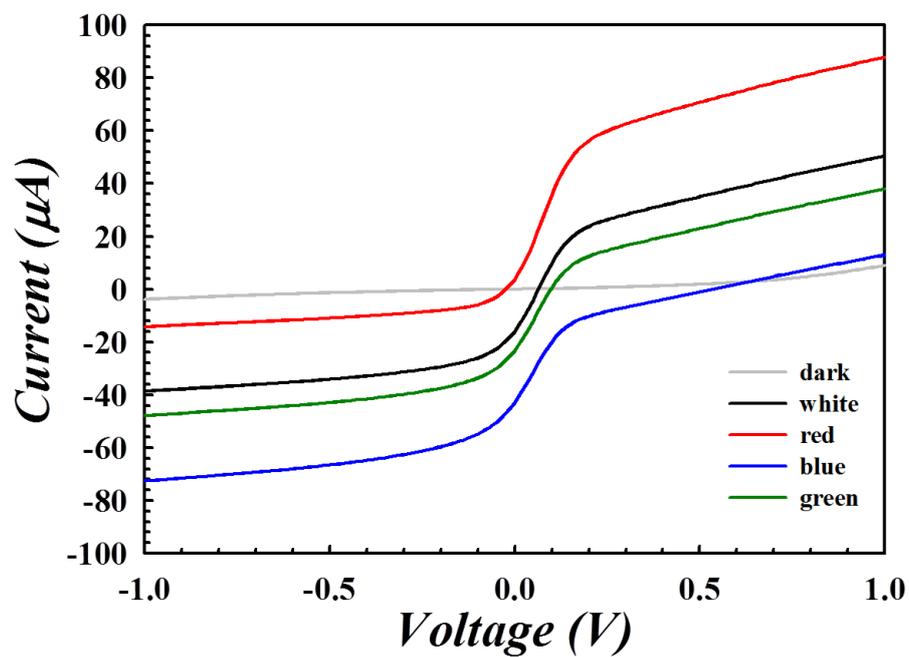
使用不同波長之光源，量測其外部量子效率對波長之關係受偏壓之影響，其結果如圖十四所示。在無施加偏壓時，元件對較短波長之藍光波段有較佳的量子效率。而施加負偏壓下，可在增強其對藍光感測的敏感度。而若是施加正偏壓，元件之量子效率對波長之響應產生大幅改變，變為對紅光波段有較佳之響應。

模擬雙色 PINIP 光偵測器元件之實際操作情況，以不施加偏壓、+0.5V 與-0.5V 偏壓三種情況，以每 10 msec 讀取一次電流輸出，搭配並搭配白光、紅光及藍光 LED 陣列以 5 秒週期開關照射元件來重複實驗。其偵測情形如圖十五所示。未照光時，偵測之電流值低於一奈安培以下，可較 PIN 元件下降 10^3 倍。當白光光源開啟後，偵測之電流值可在 20 msec 內到達穩定，此時電流值可達約 $10\ \mu\text{A}$ ，與暗電流可達 10^4 倍差距。若以+0.5V 或-0.5V 讀取，電流差值可達 200 倍。若在紅光環境下，未施加偏壓之結果與白光下相近。但在施加正偏壓時，亮暗造成之電流差值約為 30 倍。而施加負偏壓下之差值縮小為僅有 10 倍，呈現正電壓讀取值大過負電壓讀取的結果。在藍光環境下，未施加偏壓之結果亦是與白光下相似，而在施加偏壓下後之趨勢則與在紅光下相反。施加正偏壓下之讀取差值僅有 2 倍，而在負偏壓下之讀取電流差值可達 50 倍，呈現一負電壓讀取值大過正電壓之讀取的結果。利用此偏壓操作之讀取結果與光環境之關係，可達成一雙色辨識之光感測器。

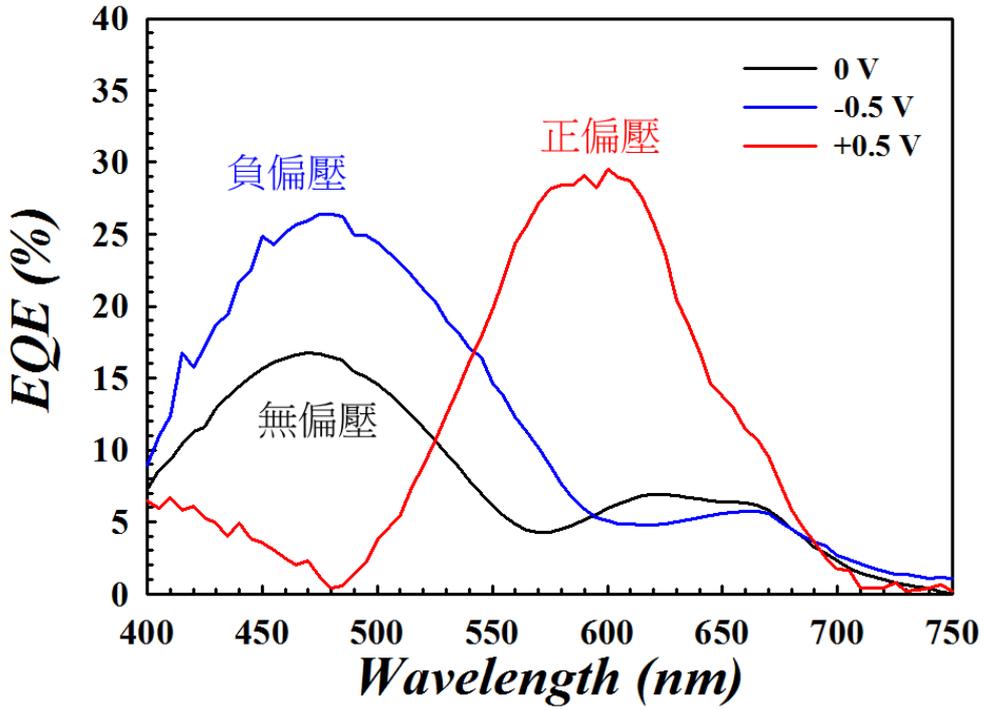
此現象與所使用之吸收層材料有高度相關，因非晶矽與碳化矽材料，其對不同波長之吸收係數具有差異，如圖十四所示。碳化矽僅對短波長之藍光有較高之吸收，超過 500nm 後幾乎無法吸收。而非晶矽在紅光與藍光波段均都有不錯的吸收係數。因而達成可對紅、藍波長具有選擇性之光感測器。



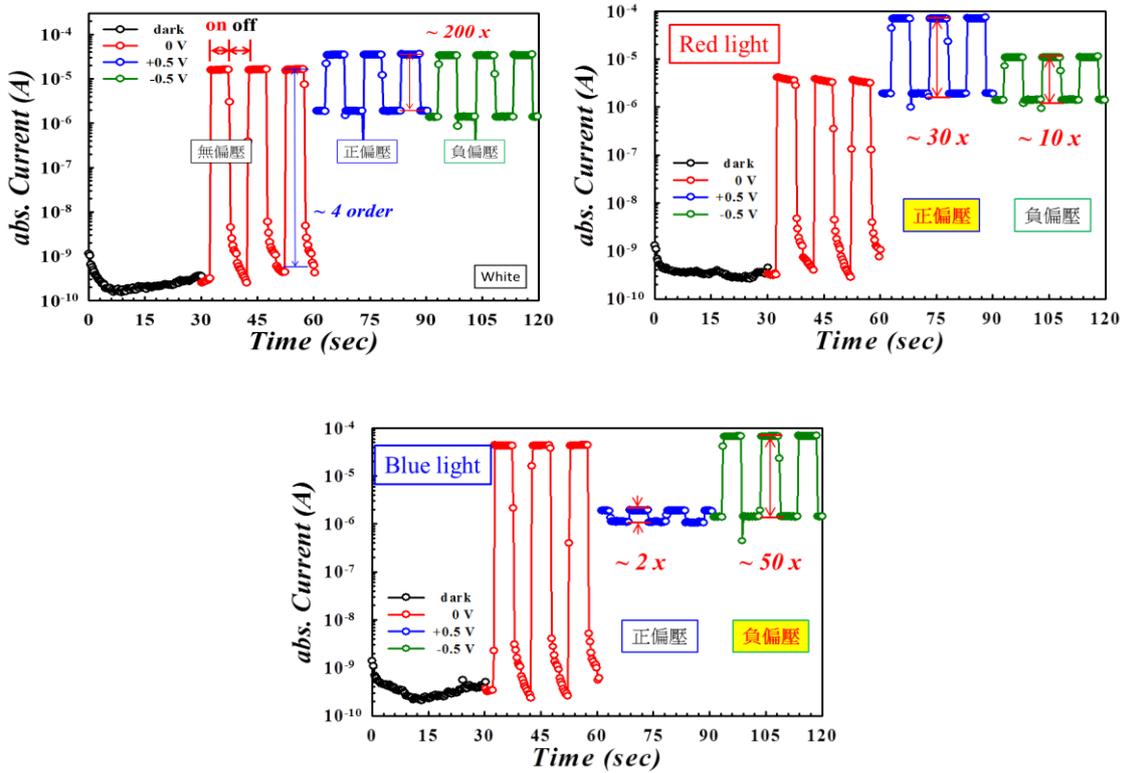
圖十二 可撓式雙色光感測器之電壓電流曲線(a)在線性軸下與(b)在對數軸下



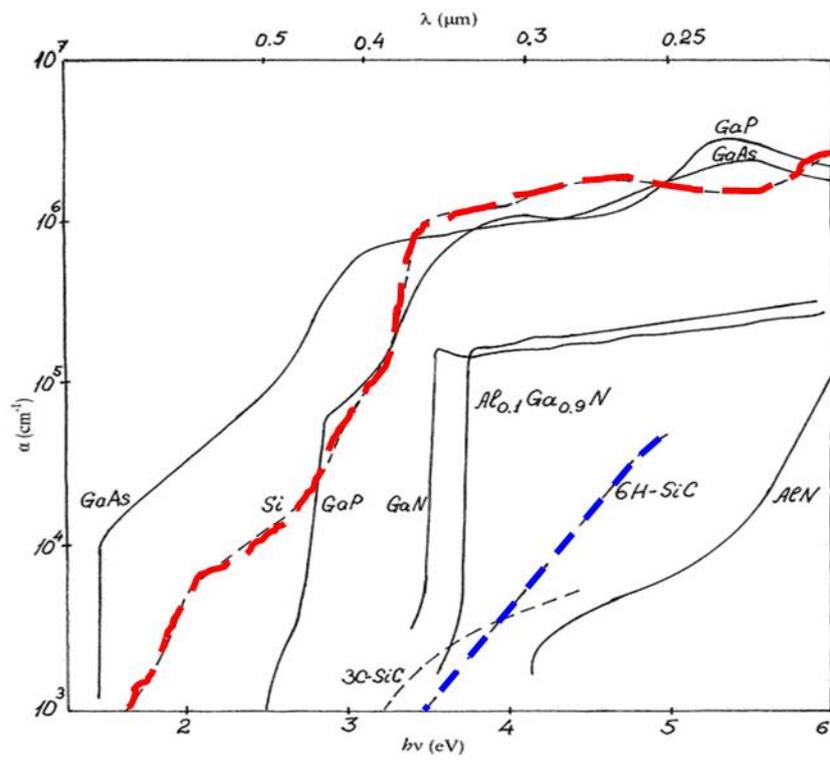
圖十三 不同光源下之雙色光感測器輸出電流曲線



圖十四 雙色光感測器之波長對量子效率關係圖



圖十五 雙色光感測器在(a)白光環境下和(b)紅光環境下與(c)藍光環境下之亮暗測試



圖十四 非晶矽與碳化矽之波長對吸收係數關係比較圖

肆、参考文献

- [1.] Par Parsathi Chatterjee, J. Appl. Phys. 76 (2), (1994), P1301-1313
- [2.] Y. Matsumoto, F. MeleH ndez, R. Asomoza, Solar Energy Materials & Solar Cells, 66 (2001) 163-170
- [3.] Arindam Sarker, Chandan Banerjee and A K Barua, J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 1205–1209
- [4.] Tapati Jana, Swati RayU, Thin Solid Films 376 (2000) p241~248
- [5.] A.O. Kodolbas, Solar Energy Materials & Solar Cells 89 (2005) 49–59
- [6.] A. Janotta, R. Janssen, Journal of Non-Crystalline Solids 299–302 (2002) 579–584
- [7.] Arindam SARKER and Asok K. BARUA, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 (2002) pp. 765–769
- [8.] Y. Matsumoto, Solar Energy Materials & Solar Cells 66 (2001) p163-170
- [9.] Debajyoti Das, Solar Energy Materials & Solar Cells 60 (2000) p167-179
- [10.] J.David Cohen, Shouvik Datta, Thin solid film 516 (2008) p663-p669
- [11.] J.David Cohen, Solar Cells, 24 (1988) ,p287-297
- [12.] Yoram Lubianiker , J. David Cohen, Journal of Non-Crystalline Solids 266~269 (2000) p253~257
- [13.] Michal Cwil, Thin Solid Films 515 (2007) 6229–6232
- [14.] I. L. Repins, B. J. Stanbery, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, Appl. 2006; 14:25–43
- [15.] K.M.Mahavadi, K.Zellama, Physical Review B, Vol.35, No 14, 15 MAY, p7776
- [16.] J.David Cohen, Solar Cells, 24, p287-297 (1988)

- [17.] J.David Cohen, Shouvik Datta, Thin solid film, 516, p663-p669
(2008)