

ZnO/c-Si 異質接面太陽能電池之特性分析

黃嘉宏¹ 劉奕辰²

摘要

在本研究中，我們以模擬軟體 SILVACO 對 n 型氧化鋅(ZnO)/p 型結晶矽(c-Si)異質接面(heterojunction)太陽能電池特性進行模擬與分析。

在此結構中，我們分別探討氧化鋅摻雜濃度，在 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的濃度下，我們改變氧化鋅的厚度，從 $1 \mu\text{m}$ 提升至 $10 \mu\text{m}$ 。最後由模擬分析得知，在摻雜濃度 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 與氧化鋅厚度在 $10 \mu\text{m}$ 的時候效率最佳，因為提升摻雜濃度，會導致空乏區內建電場增加，因而提升厚度，增加太陽能電池的光吸收區域，使得產生更多的電子電洞對。在 AM1.5 太陽光模擬光源照射(100 mW/cm^2)下，最佳的模擬結果：開路電壓(open-circuit voltage)為 0.5388 V 、短路電流密度(short-circuit current density)為 55.37 mA/cm^2 、填充因子(fill factor)為 0.788 、及轉換效率(conversion efficiency)為 23.5% 等特性。

關鍵詞：氧化鋅、結晶矽、異質接面太陽能電池

投稿日期：2013/03/22 接受日期：2012/06/30

¹ 國立高雄師範大學電子工程系助理教授

² 國立高雄師範大學電子工程系研究生

Analysis of ZnO/c-Si Heterojunction Solar Cells

Chia-hong Huang^{*} Yi-chen Liu^{**}

Abstract

In this study, the performance of n-ZnO/p-Si heterojunction solar cells is simulated by SILVACO. The effect of the doping concentration and thickness of zinc oxide (ZnO) on the characteristics of n-ZnO/p-Si heterojunction solar cells is investigated. From the simulation results, the conversion efficiency increases with the increase in the doping concentration. It is because the high doping concentration leads to the high built-in electric field in the depletion region, so that the higher built-in electric field sweeps out more electrons and holes. Furthermore, the conversion efficiency is also raised with the increase in the thickness of ZnO. While increasing the thickness, a light absorption region of the solar cell will expand, generating more electron-hole pairs under illumination. It is observed that the open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.5388 V, the short-circuit current density (J_{sc}) of 55.37 mA/cm², the fill factor (FF) of 0.788 and the conversion efficiency (η) of 23.5% were obtained by using AM1.5 illumination (100 mW/cm²).

Keywords : Zinc oxide, crystalline silicon, heterojunction solar cells

^{*} Assistant Professor, Department of Electronic Engineering , National Kaohsiung Normal University.

^{**} Graduate Student, Department of Electronic Engineering , National Kaohsiung Normal University.

壹、前言

在科技的快速發展下，人們所需要的能源越來越多，而資源耗損所帶來的環境污染已成為重要課題，在化石能源的供應日漸耗竭的情況下，替代能源的開發和技術是必要的。太陽能是我們每天都會接觸到的能源，而且取之不盡、用之不竭。太陽能電池就是利用光伏效應，將通過半導體材料的太陽光轉變為電能，不僅轉換過程十分符合環保，且不需任何燃料成本。

氧化鋅(ZnO)，是一種具有寬能隙、高透明性、與低電阻率的 II-VI 族半導體(Semiconductor)材料，其能隙約為 3.3eV 與激子束縛能為 60meV。通常情況下，未摻雜的 ZnO 由於鋅缺陷(Zinc vacancy)和氧空位缺陷(Oxygen defect)等，而呈現 n 型的導電性。ZnO 對藍紫色的激光具有高靈敏度，因此在短波長光伏元件上有很大的應用[1-2]，而這些優勢使得 ZnO 在光電元件上有高效率的表現，近年來受到許多矚目。由於氧化鋅具有壓電、電光、聲光效應等特性，因此被廣泛應用在太陽能電池[3-4]、發光二極體[5]、紫外光探測器[6]、奈米材料[7]等研究上。

本研究就是針對氧化鋅與結晶矽(ZnO/c-Si)之異質界面太陽能電池特性進行分析與探討。近年來，ZnO/Si 異質界面太陽能電池已受到許多關注和研究[8-12]，因為它能產生強的光伏效應，且有雙波段結構，紫外光區域的光子可被 ZnO 吸收，而可見光範圍內的光子可被 p-Si 吸收，利用這種堆疊方式可以提高入射光的收集效率，因此它有望成為新的光伏材料。在 AM1.5 太陽光模擬光源照(100 mW/cm²)下，改變氧化鋅的摻雜濃度與厚度，進而分析其光電轉換特性。

貳、實驗部分

本研究以模擬軟體 SILVACO 對 n 型氧化鋅(ZnO)/p 型結晶矽(c-Si)異質界面(heterojunction)太陽能電池特性進行模擬與分析。

n-ZnO/p-cSi 異質界面太陽能電池結構示意圖請見於圖 1，ZnO 的厚度從 1 μ m 增加到 10 μ m，而濃度從 1.6 $\times 10^{14}$ cm⁻³ 增加到 1 $\times 10^{19}$ cm⁻³，而 c-Si 厚度為 200 μ m，濃度固定在 1 $\times 10^{15}$ cm⁻³，上下電極由鋁(Al)金屬做金屬接觸，由寬能隙至窄能隙這樣的結構設計，可以增加光吸收的光譜範圍，與同質界面的太陽能電池相比起來，此結構相對能提高轉換效率。

n-ZnO/p-Si 太陽能電池結構所用到的材料參數模擬請見於表 1，其元件所用的 models 包含蕭特基-里德-霍爾復合(Shockley-Read-Hall recombination，簡稱 SRH)、帶至帶復合(Band-to-band recombination)、表面復合(Surface recombination)、歐傑復合(Auger recombination)、濃度相依(Concentration Dependent)、費米-狄拉克(Fermi-Dirac)、波茲曼(Boltzmann)、能隙變窄效應(Bandgap Narrowing Effect)。

在外加電場影響之下，載子傳輸會產生電流，稱為漂移電流(drift current)。

根據電流密度公式： $J_n = qn\mu_n E$

J_n 為電子電流密度， q 為電子電荷， n 為載子濃度， μ_n 為電子移動率(electron mobility)， E 為電場。

我們會發現在固定電場的情況下，電子電流密度 J_n 正比於載子濃度 n 和電子遷移率 μ_n 。本研究中所用的各種濃度和其所對應的電子遷移率請見於表 2。

隨著濃度的變化，遷移率也會跟著改變，因此找出該濃度下所相對應之遷移率是必要的，以提高實驗之準確性。

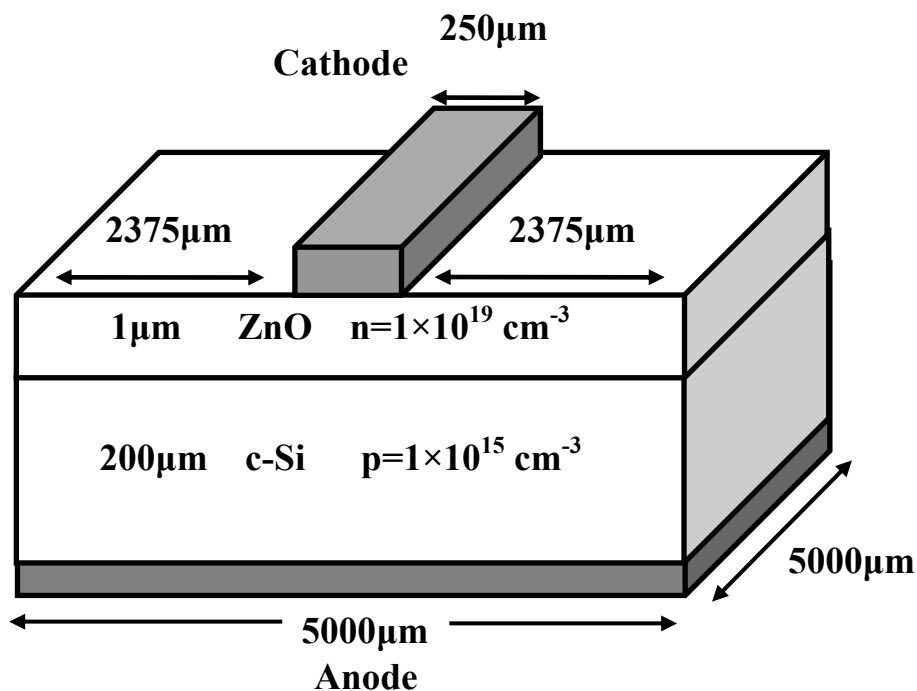


圖 1 ZnO/c-Si 異質界面太陽能電池示意圖

表 1 模擬實驗所用之材料參數[8]

Parameter	n-ZnO	p-cSi
Eg (eV)	3.37	1.08
Doping (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{15}
χ (eV)	4.5	4.17
τ (sec)	1×10^{-9}	1×10^{-3}
Electron mobility (cm^2/Vs)	60	1000
Hole mobility (cm^2/Vs)	10	500
Nc DOS (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.8×10^{19}
Nv DOS (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.04×10^{19}

表 2 ZnO 在不同摻雜濃度下所對應之電子遷移率

Layer	Material	Doping	Electron mobility
Emitter layer	ZnO	$n = 1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	185 [14]
		$n = 1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	200[15]
		$n = 6.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	205[16]
		$n = 1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	150[17]
		$n = 1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	110[17]
		$n = 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	60[13]

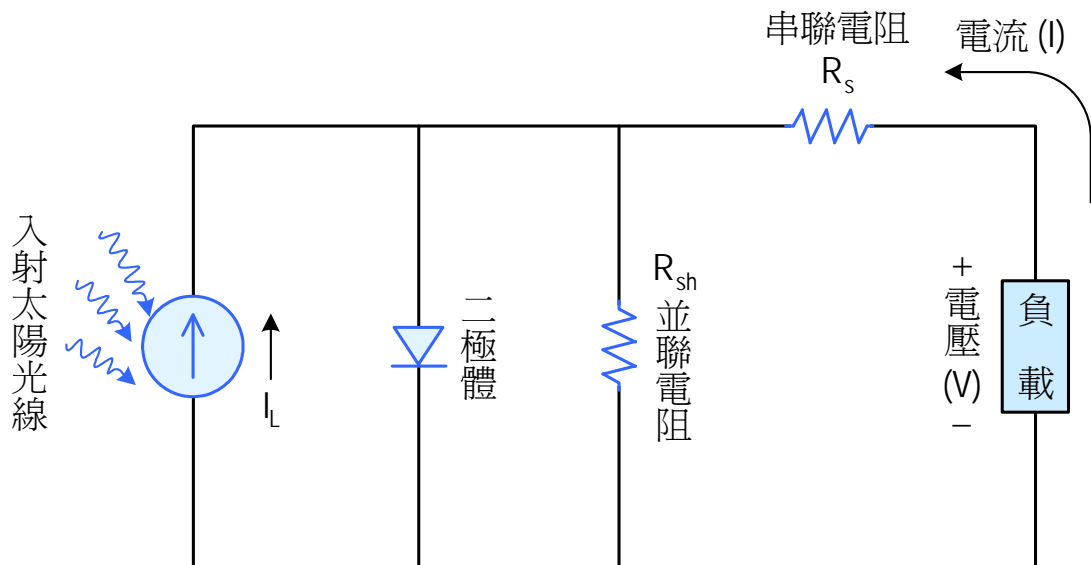


圖 2 太陽能電池的等效電路示意圖

圖 2 為太陽能電池等效電路圖，串聯電阻(R_s)的存在會讓短路電流變小，然而並聯電阻(R_{sh})如果不够大則會降低開路電壓，這兩個因素是使太陽能電池轉換效率下降的原因，因此在太陽能電池上，串聯電阻越小越好，並聯電阻越大越好。

參、結果與討論

1. 當 ZnO 摻雜濃度為 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

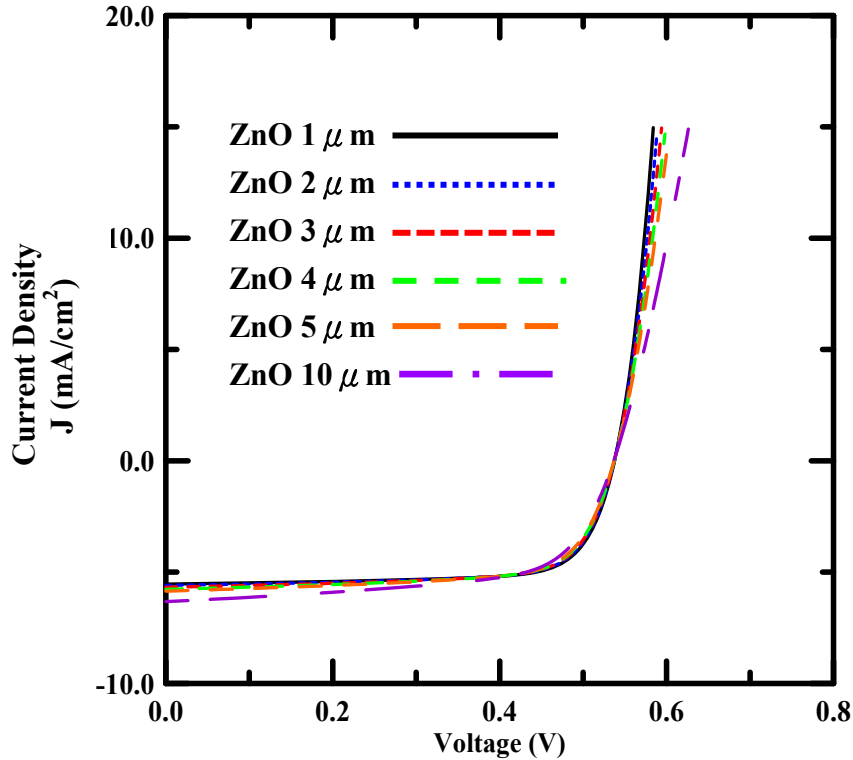


圖 3 ZnO 摻雜濃度為 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 3 電流密度-電壓曲線圖可發現隨著 ZnO 厚度的增加，短路電流變大，主要原因為 ZnO 在低濃度時，空乏區較厚，隨著厚度的增加可以讓吸光區域變大，產生更多電子電洞對。

從圖 4 可以發現 ZnO 厚度越厚，轉換效率卻變小，其主要原因為填充因子的降低。而填充因子又與串聯電阻和並聯電阻有莫大的關係。由圖 5 可知道並聯電阻隨著 ZnO 厚度的增加而降低，因此影響了填充因子和開路電壓，其原因為 ZnO 厚度 $10 \mu\text{m}$ 大於其空乏區寬度，因此多增加的厚度沒有吸光作用，只是增加其電子電洞復合率，故並聯電阻下降。所以即使 ZnO 厚度增加，提高光吸收的區域，使得因光伏效應產生的電子電洞對數量變多而增加短路電流，但還是比不上並聯電阻變小所帶來的影響，因此轉換效率由 $1 \mu\text{m}$ 的 2.23% 下降至 $10 \mu\text{m}$ 的 2.16%。

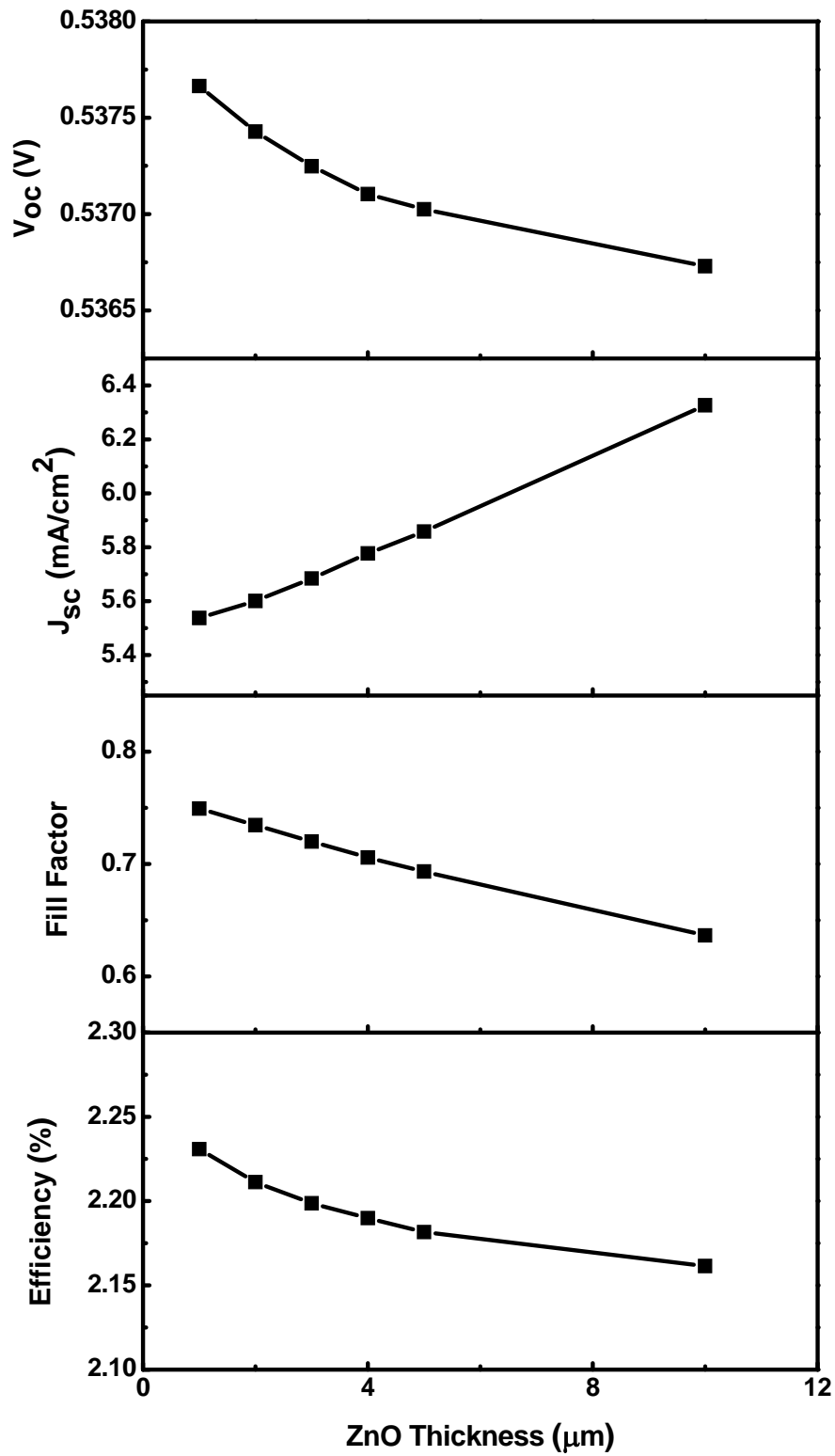


圖 4 ZnO 摻雜濃度為 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

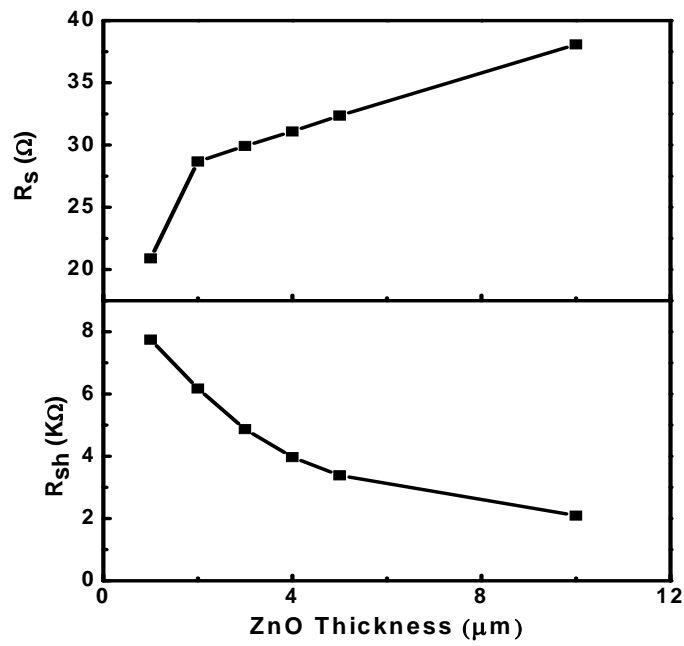


圖 5 ZnO 摻雜濃度為 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

2. 當 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

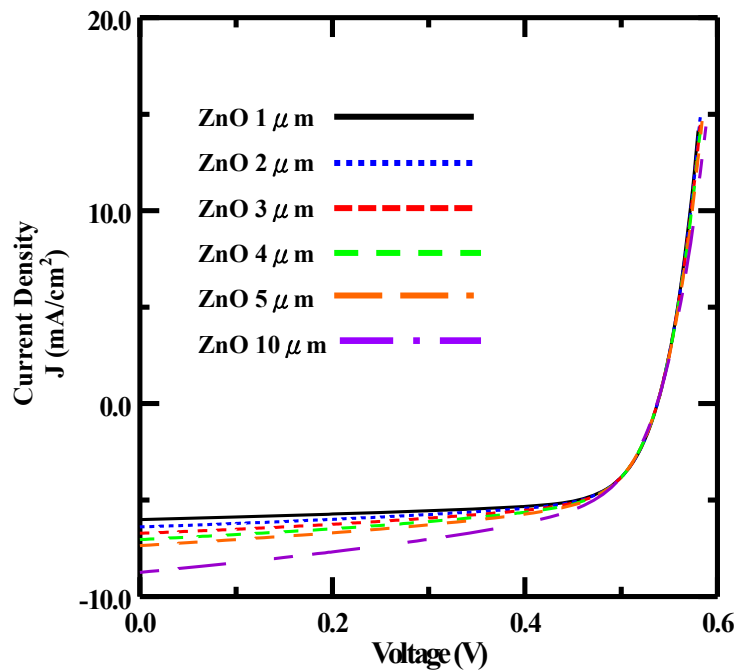


圖 6 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 6 電流密度-電壓曲線圖可發現，在提高摻雜濃度的情況下隨著 ZnO 厚度的增加，與摻雜濃度為 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 相比(見圖 3)，短路電流有著更明顯的提升，原因為 ZnO 濃度提升可以增加其導電性和透光性，讓 Si 的光吸收增加，故而提升短路電流。由圖 7 可知隨著 ZnO 厚度的增加，轉換效率提升，主要原因是因為提高摻雜濃度，載子濃度增加，因而提高短路電流(由電流密度公式可知)，雖然並聯電阻下降(由圖 8 可知)，因而造成填充因子和開路電壓的降低，但短路電流的增幅大於並聯電阻下降的影響，因此轉換效率呈現增加的狀態，由 $1 \mu\text{m}$ 的 2.27% 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 2.5%。

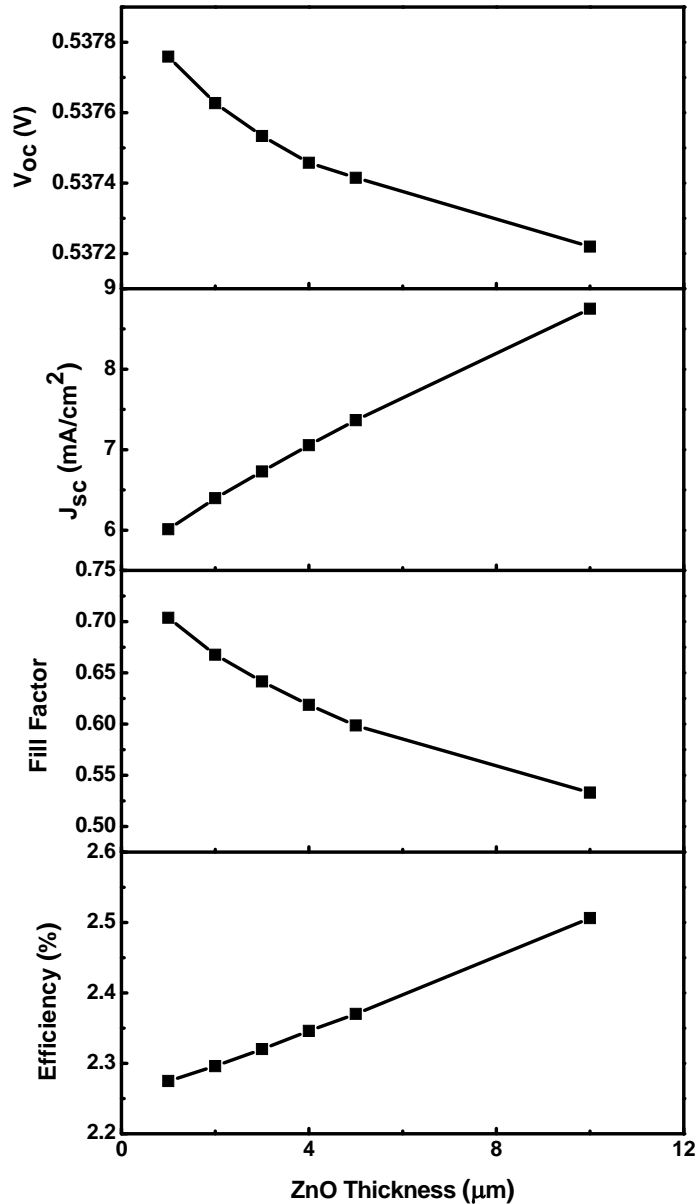


圖 7 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

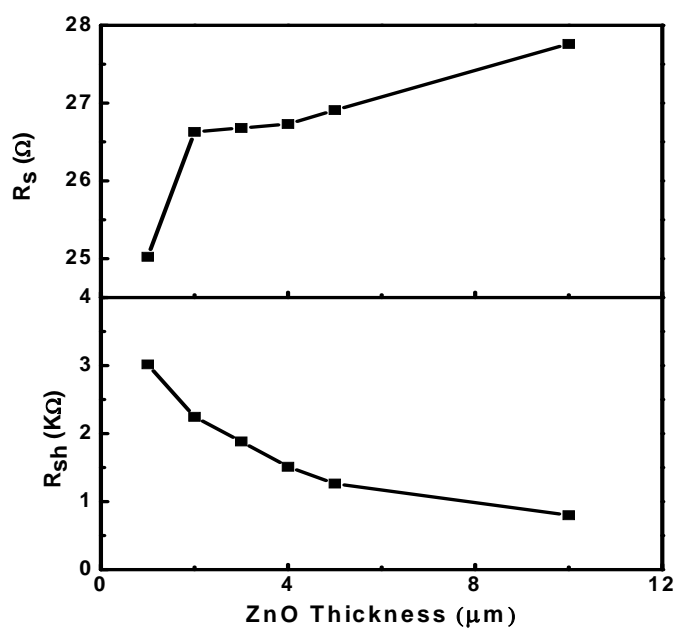


圖 8 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

3. 當 ZnO 摻雜濃度為 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

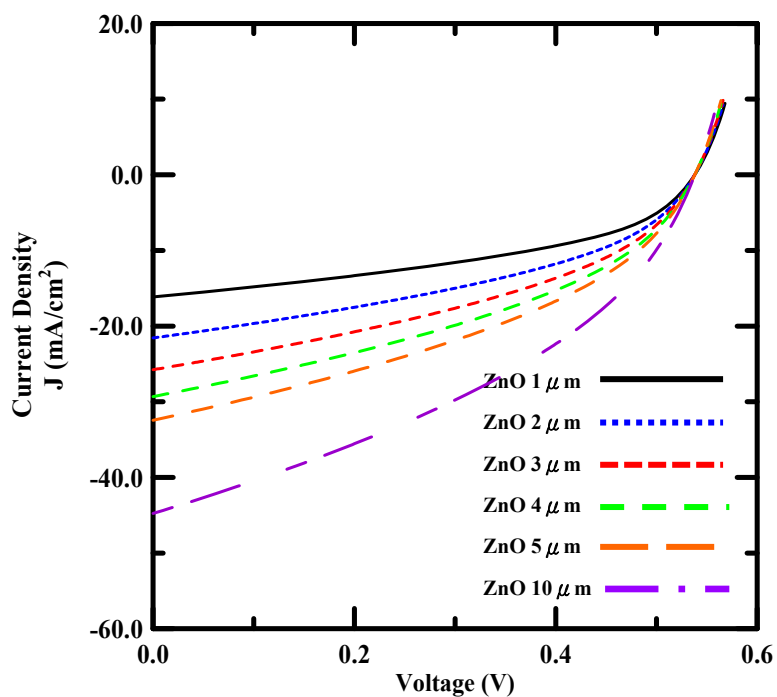


圖 9 ZnO 摻雜濃度為 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 9 電流密度-電壓曲線圖可發現，在提高摻雜濃度的情況下隨著 ZnO 厚度的增加，與摻雜濃度 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 相比(見圖 6)，短路電流的提升更加明顯，短路電流密度從 $1 \mu\text{m}$ 的 16.15 mA/cm^2 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 44.7 mA/cm^2 。

由圖 10 可知隨著 ZnO 厚度的增加，轉換效率提升，主要原因是因為提升 ZnO 的厚度，增加光吸收的體積，產生的電子電洞對數量變多，因而提高短路電流(由電流密度公式可知)。雖然並聯電阻一直維持在很小的狀態(由圖 11 可知)，因而造成填充因子和開路電壓的降低，但最後開路電壓因為厚度的增加而呈現增加的狀況，原因為 ZnO 濃度提升可以增加其導電性和透光性，讓 Si 的光吸收增加，故而提升開路電壓和短路電流，其提升的效果大於並聯電阻帶來的影響。最後短路電流和開路電壓的提升大於並聯電阻的影響，因此轉換效率呈現增加的狀態，由 $1 \mu\text{m}$ 的 3.76% 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 9.22% 。

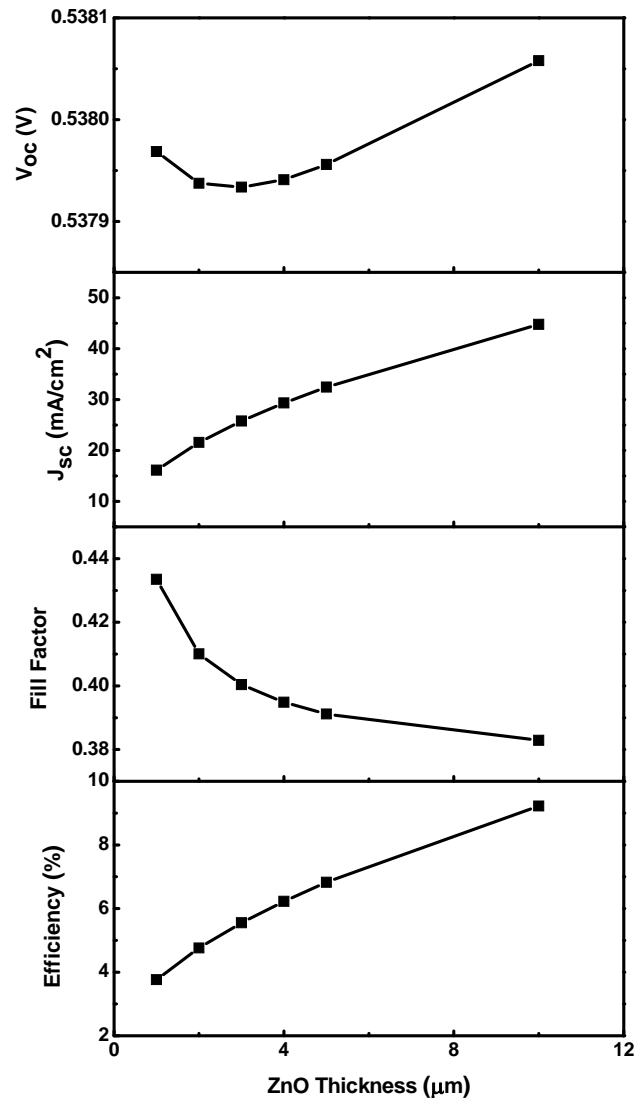


圖 10 ZnO 摻雜濃度為 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

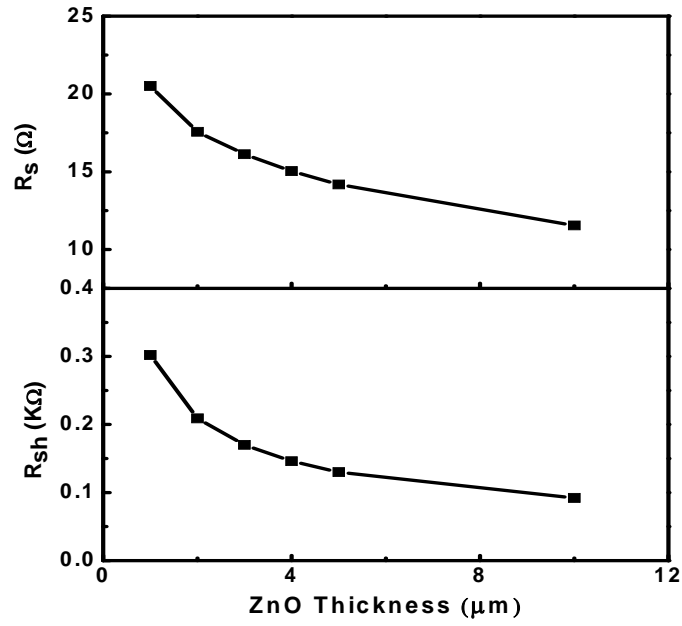


圖 11 ZnO 摻雜濃度為 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

4. 當 ZnO 摻雜濃度為 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

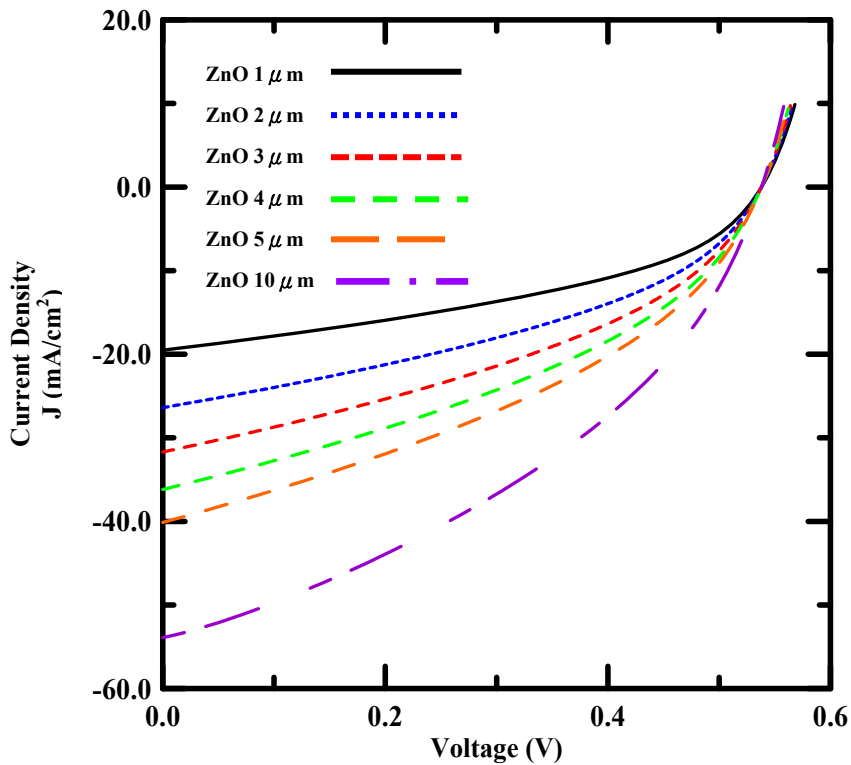


圖 12 ZnO 摻雜濃度為 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 12 電流密度-電壓曲線圖可發現，隨著 ZnO 厚度的增加，與摻雜濃度 $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 相比 (見圖 9)，短路電流的提升更加明顯，電流密度從 $1 \mu\text{m}$ 的 19.52 mA/cm^2 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 53.92 mA/cm^2 。

由圖 13 可知隨著 ZnO 厚度的增加，轉換效率提升，主要原因是因為提升 ZnO 厚度，提升光吸收的體積，產生的電子電洞對數量變多，因而提高短路電流(由電流密度公式可知)。雖然並聯電阻一直維持在很小的狀態，最後維持在 100Ω 左右(由圖 14 可知)，因而造成填充因子和開路電壓的降低，但最後開路電壓因為厚度的增加而呈現提升的狀況，而且短路電流和開路電壓的提升大於並聯電阻的影響，因此轉換效率呈現增加的狀態，由 $1 \mu\text{m}$ 的 4.37% 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 11.35% 。

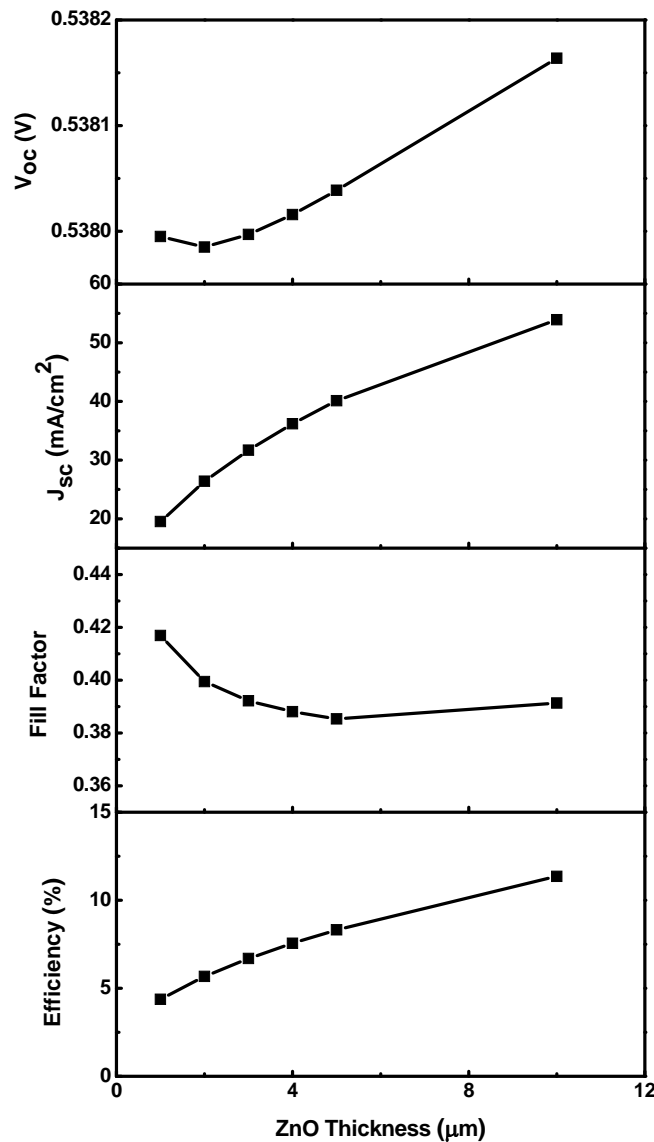


圖 13 ZnO 摻雜濃度為 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

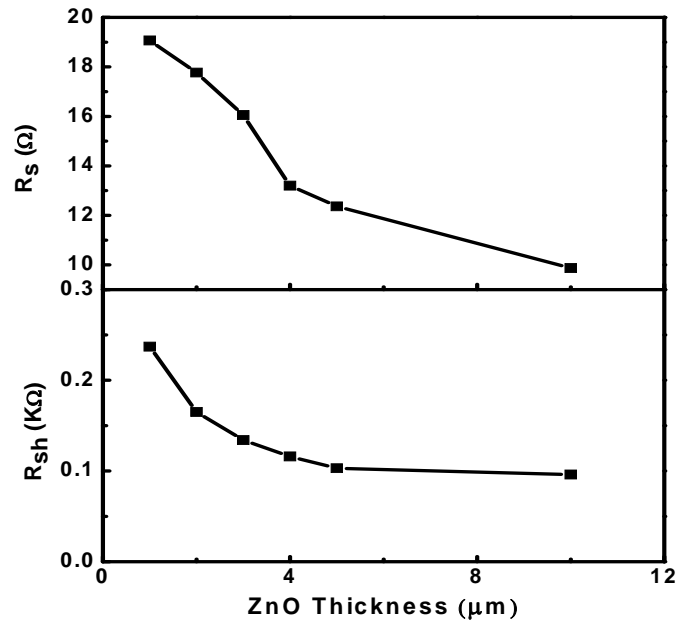


圖 14 ZnO 摻雜濃度為 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

5. 當 ZnO 摻雜濃度為 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

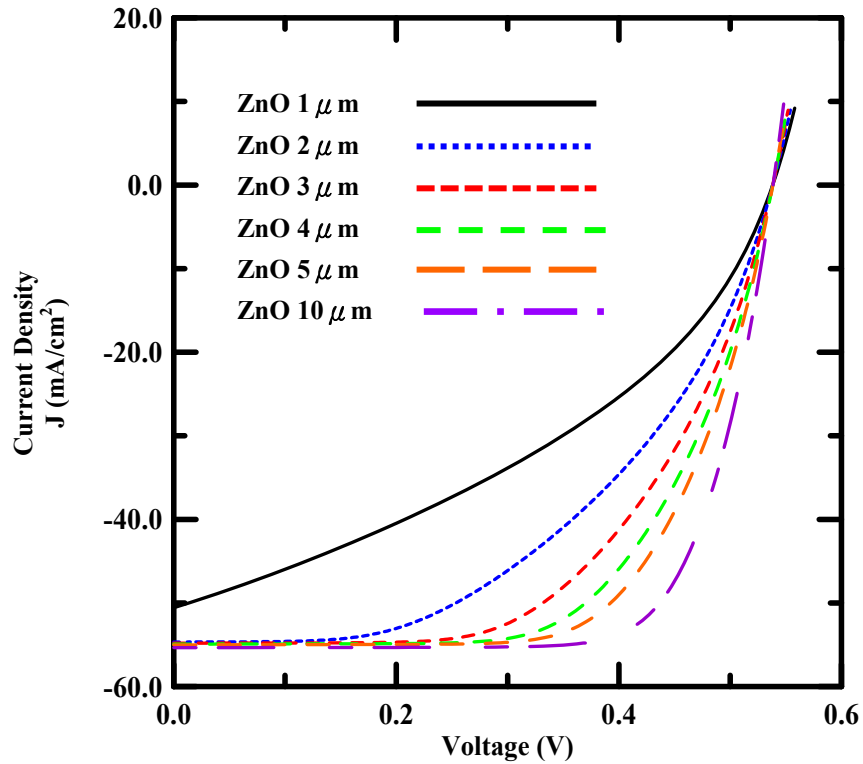


圖 15 ZnO 摻雜濃度為 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 15 電流密度-電壓曲線圖可發現，隨著 ZnO 厚度的增加，與摻雜濃度 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 相比(見圖 12)，短路電流的提升更加明顯。ZnO 厚度的改變，使得電流密度從 $1 \mu\text{m}$ 的 50.56 mA/cm^2 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 55.35 mA/cm^2 。

由圖 16 可知隨著 ZnO 厚度的增長，填充因子提升，主要原因是因為 ZnO 在此濃度下已經是高摻雜，ZnO 在高摻雜的情況下空乏區很小，且導電性和透光性都很高，已經算是一個透明導電膜而不是在濃度 10^{17} 前當作吸收層，因此主要的吸收層在 Si，而藉由 ZnO 的高透光性可以提高 Si 的光吸收，產生更多的電子電洞對，因而提高短路電流。根據片電阻定義，電阻會隨著厚度的增加而減少，故串聯電阻呈現減少的趨勢，而因為 ZnO 在高摻雜是當作透明導電膜而不是吸收層，因此就沒有之前因厚度太厚而造成復合率提升的情況，因此並聯電阻呈現增加的趨勢，最後維持在 $20 \text{ K}\Omega$ 左右(由圖 17 可知)。最後因填充因子往上提升，最後轉換效率，由 $1 \mu\text{m}$ 的 10.48% 增加到 $10 \mu\text{m}$ 的 21.95% 。

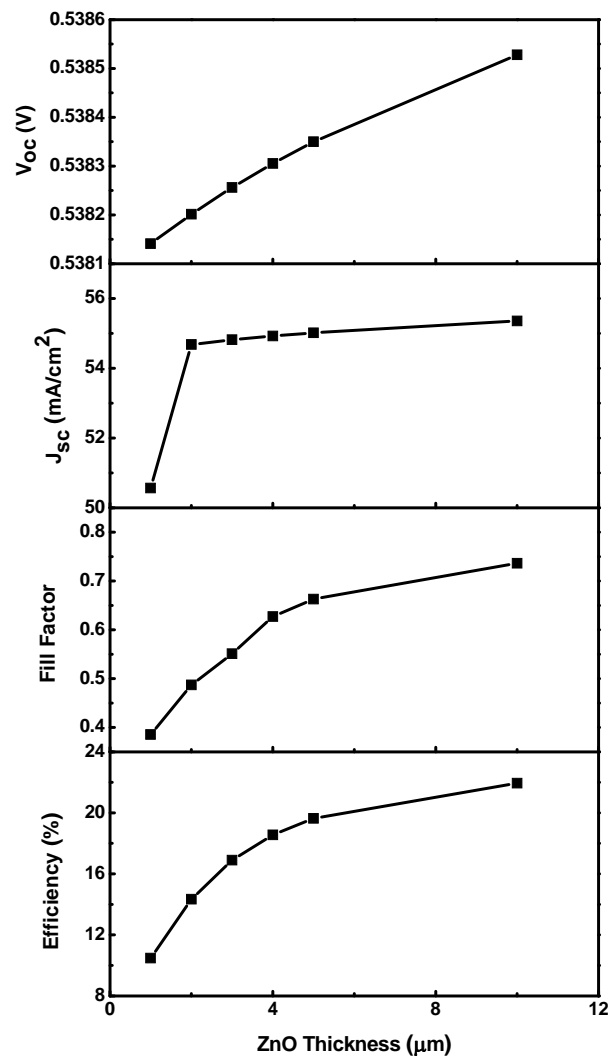


圖 16 ZnO 摻雜濃度為 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

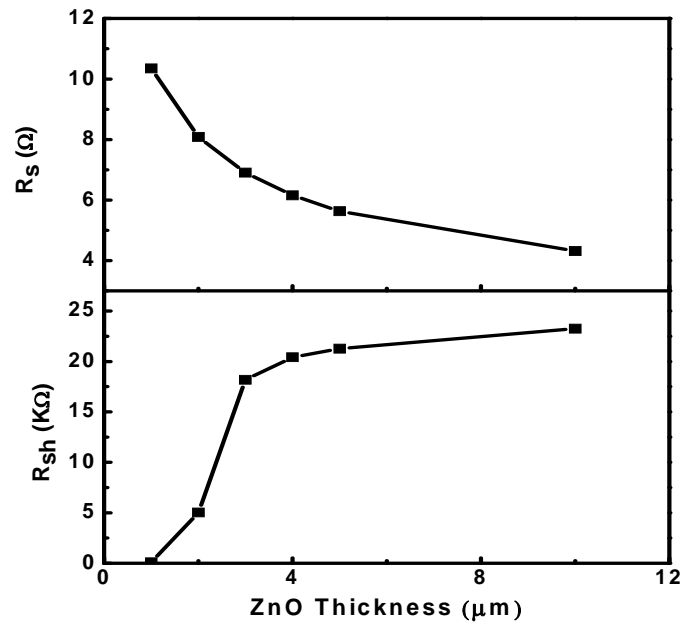


圖 17 ZnO 摻雜濃度為 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

6. 當 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

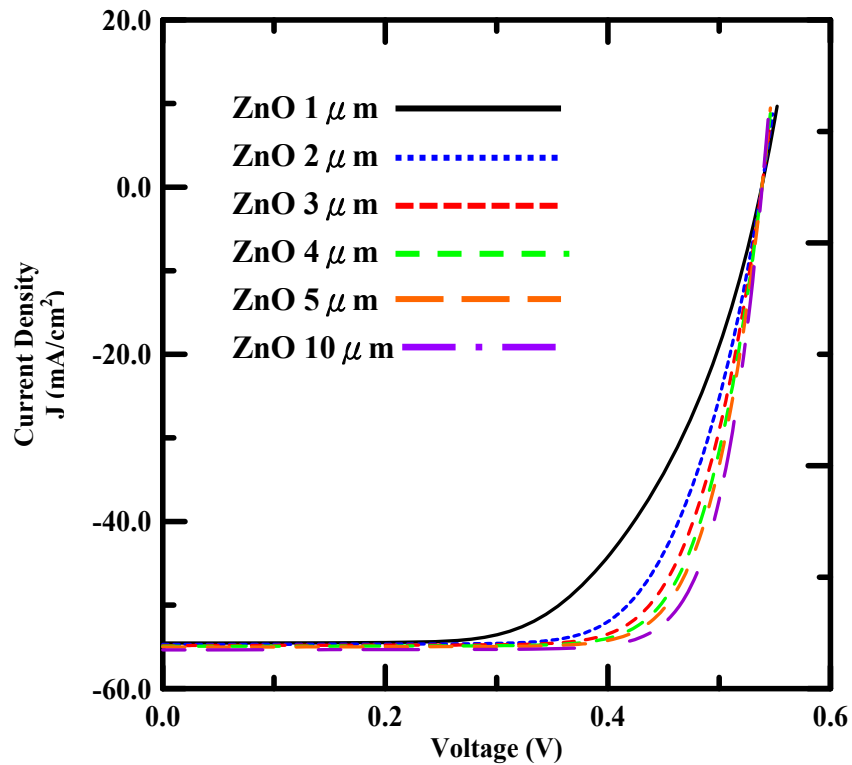


圖 18 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時的電流密度-電壓特性曲線圖

由圖 18 電流密度-電壓曲線圖可發現，隨著 ZnO 厚度的增加，短路電流維持在一定值，沒有明顯的增幅，原因為 ZnO 在高摻雜情況下，導電性和透光性都達到一定的程度，使短路電流維持在 55 mA/cm^2 左右，ZnO 厚度的改變，使得電流密度從 $1\mu\text{m}$ 的 54.55 mA/cm^2 增加到 $10\mu\text{m}$ 的 55.37 mA/cm^2 。

由圖 19 可知隨著 ZnO 厚度的增長，填充因子提升，主要原因是因為 ZnO 在此濃度下已經是高摻雜，導電性和透光性都很高，藉由 ZnO 的高透光性可以提高 Si 的光吸收，產生更多的電子電洞對，因而提高短路電流。而串聯電阻一直維持在很小的狀態和並聯電阻的增加，維持在 $26\text{K}\Omega$ 左右(由圖 20 可知)，使得填充因子往上提升，最後轉換效率，由 $1\mu\text{m}$ 的 17.94% 增加到 $10\mu\text{m}$ 的 23.5% 。

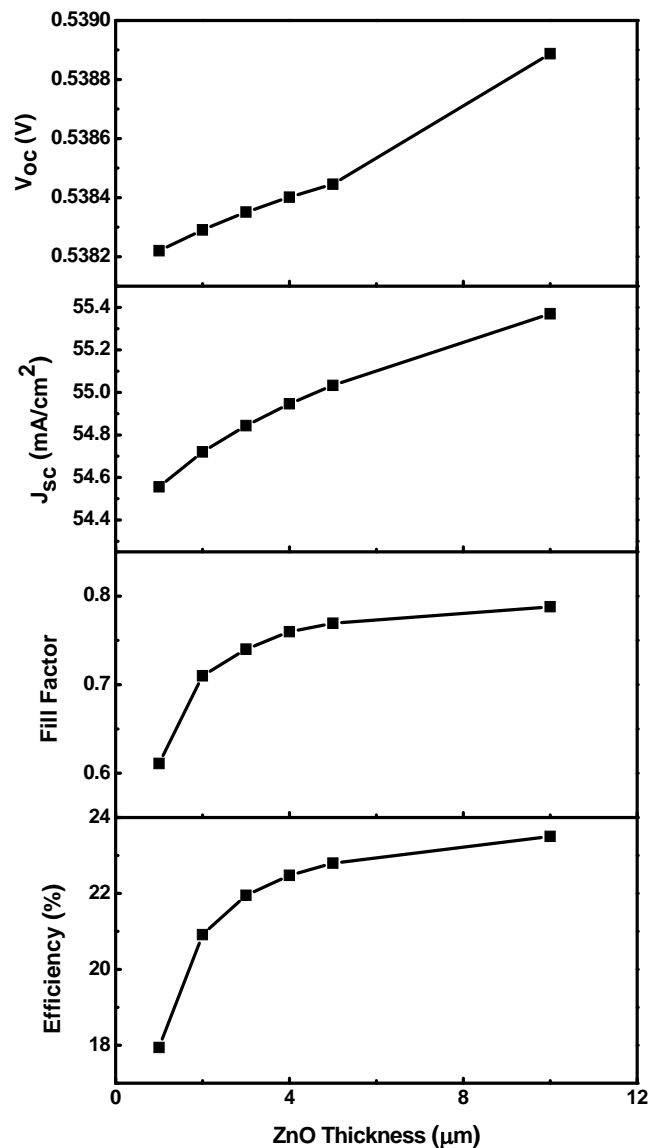


圖 19 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 時，其開路電壓、短路電流密度、填充因子、轉換效率與 ZnO 厚度之關係圖

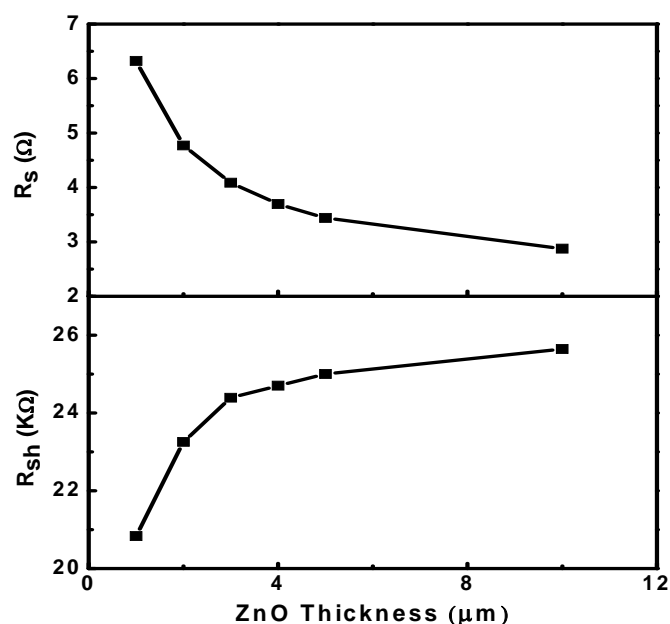


圖 20 ZnO 摻雜濃度為 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 時，串聯電阻和並聯電阻與 ZnO 厚度之關係圖

7. 與文獻之比較

表 3 與相關之文獻探討

文獻來源	ZnO 厚度(μm)	Voc (V)	Jsc(mA/cm^2)	FF	η (%)
本文	2	0.53	54.7	0.71	21
[18]	1.78	0.58	35.1	0.602	12.2
[19]	2.4	1.4	26	0.7	13.5

表 3 為本文跟其他文獻相比較，雖然本文的轉換效率高於其他文獻許多(主要原因為本文的 c-Si 厚度為 $200\mu\text{m}$)，但在實作上有許多問題是無法模擬的，畢竟模擬是理想化，因此將本文運用在實作上便是未來努力的目標。

肆、結論

本文針對 ZnO/c-Si 異質界面太陽能電池進行分析研究，改變 ZnO 的摻雜濃度與厚度。模擬結果顯示，當摻雜濃度提升時，空乏區內的內建電場增強，造成開路電壓和短路電流的上升，因而提高轉換效率。ZnO 在高摻雜情況下，導電性和透光性都達到一定的程度，最後電流密度維持在 $55 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 左右。此外 ZnO 增加厚度可以讓太陽能電池的光吸收區域擴大，因而提高轉換效率，但太大的厚度將會增加載子飄移至電極之間的距離，提高載子被復合的機會，因此最後轉換效率維持在 23% 左右。

參考文獻

- [1] L.J. Mandalapu, F.X. Xiu, Z. Yang, D.T. Zhao, and J.L. Liua, “P-type behavior from Sb-doped ZnO heterojunction photodiodes”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 88, 2006, pp. 1121081-3.
- [2] J.H. He and C.H. Ho, “The study of electrical characteristics of heterojunction based on ZnO nanowires using ultrahigh-vacuum conducting atomic force microscopy”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 91, 2007, pp. 2331051-3.
- [3] D.G. Baik, S.M. Cho, “Application of sol- gel derived films for ZnO/n- Si junction solar cells”, *Thin Solid Films*, Vol. 354, 1999, pp. 227- 231.
- [4] A. Jasenek, U. Rau, K. Weinert, I.M. Kotschau, G. Hanna, G. Voorwinden, M. Powalla, H.W. Schock, J.H. Werner, “Radiation resistance of Cu(In, Ga)Se₂ solar cells under 1-MeV electron irradiation”, *Thin Solid Films*, Vol. 387, 2001, pp. 228-230.
- [5] Z.K. Tang, G.K.L. Wong, P. Yu, M. Kawasaki, A. Ohtomo, H. Koinuma, and Y. Segawa, “Room-temperature ultraviolet laser emission from self- assembled ZnO microcrystallite thin films”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 72, 1998, pp. 3270- 3272.
- [6] S.A. Studenikin, N. Golego, and M. Cocivera, “Carrier mobility and density contributions to photoconductivity transients in polycrystalline ZnO films”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 87, 2000, pp. 2413-2421.
- [7] W.I. Park, Y.H. Jun, S.W. Jung, and G.C. Yi, “Excitonic emissions observed in ZnO single crystal nanorods”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 82, 2003, pp. 964-966.
- [8] J.Y. Lee, Y.S. Choi, J.H. Kim, M.O. Park, and S. Im, “Optimizing n-ZnO/p-Si heterojunctions for photodiode applications”, *Thin Solid Films*, vol. 403-404, pp. 553-557, 2002.
- [9] L. Shen, Z.Q. Ma, C. Shen, F. Li, Bo. He, and F. Xu, “Studies on fabrication and characterization of a ZnO/p-Si-based solar cell”, *Superlattices and Microstructures*, vol. 48, pp. 426-433, 2010.
- [10] K.A. Salman, K. Omar, and Z. Hassan, “Improved performance of a crystalline silicon solar cell based on ZnO/PS anti-reflection coating layers”, *Superlattices and Microstructures*, vol. 50, pp. 517-528, 2011.
- [11] H.Y. Kim, J.H. Kim, Y.J. Kim, K.H. Chae, C.N. Whang, J.H. Song, and S. Im, “Photoresponse of Si detector based on n-ZnO/p-Si and n-ZnO/n-Si structures”, *Optical Materials*, vol. 17, pp. 141-144, 2001.
- [12] R. Romero, M.C. López, D. Leinen, F. Mart’ín, and J.R. Ramos-Barrado, “Electrical properties of the n-ZnO/c-Si heterojunction prepared by chemical spray pyrolysis”, *Materials Science and Engineering B*, vol. 110, pp. 87-93, 2004.
- [13] M. Nawaz, E.S. Marstein and A. Holt, “*Design analysis of ZnO/cSi heterojunction solar cell*”, *IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 35th, Conference. 20-25, 2010, pp. 002213-8.
- [14] Z. Fang, B. Clafin, D.C. Look, and G.C. Farlow, “Electron irradiation induced deep centers in hydrothermally grown ZnO”, *Appl. Phys. Lett*, Vol. 101(8), 2007, pp. 0861061-3.
- [15] D.J. Cohen, “Improved transparent conducting oxides through modulation-doped zinc oxide/zinc

- magnesium oxide thin films”, ProQuest, UMI Dissertations Publishing, pp. 143, 2008.
- [16] D.C. Look, D.C. Reynolds, J.R. Sizelove, R.L. Jones, C.W. Litton, G. Cantwell, and W.C. Harsch “Electrical properties of bulk ZnO”, Solid State Communications, Vol. 105(6), 1998, pp. 399-401.
- [17] L.E. Halliburton, N.C. Giles, N.Y. Garces, M. Luo, and C. Xu, “Production of native donors in ZnO by annealing at high temperature in Zn vapor”, Appl. Phys. Lett, Vol. 87, 2005, pp. 1721081-3.
- [18] T.J. Hsueh, S.Y. Lin, W.Y. Weng, C.L. Hsu, T.Y. Tsai, B.T. Dai, and J.M. Shieh, “Crystalline-Si photovoltaic devices with ZnO nanowires”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 98, 2012, pp. 494-498.
- [19] M. Boccard, T. Söderström, P. Cuony, C. Battaglia, S. Hänni, S. Nicolay, L. Ding, M. Benkhaira, G. Bugnon, A. Billet, M. Charrière, F. Meillaud, M. Despeisse, and C. Ballif, “Optimization of ZnO front electrodes for high-efficiency micromorph thin-film Si solar cells”, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 2, 2012, pp. 229-235.