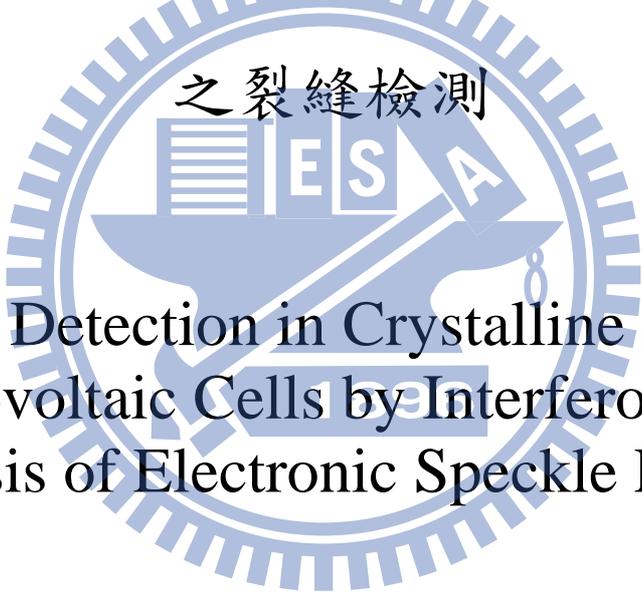


國立交通大學
機械工程學系博士班
博士論文

電子光斑干涉術應用於矽晶太陽能電池

之裂縫檢測



Crack Detection in Crystalline Silicon
Photovoltaic Cells by Interferometric
Analysis of Electronic Speckle Patterns

研究生：溫子達

指導教授：尹慶中博士

中華民國一〇一年六月

電子光斑干涉術應用於矽晶太陽能電池之裂縫檢測

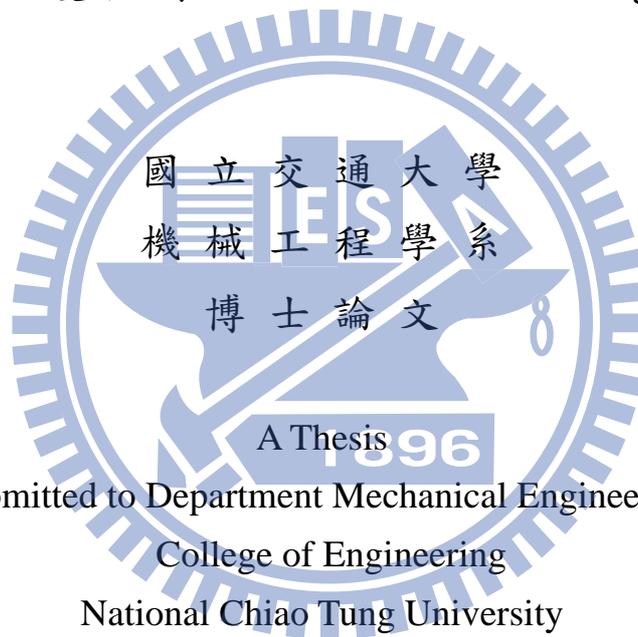
Crack Detection in Crystalline Silicon Photovoltaic
Cells by Interferometric Analysis of
Electronic Speckle Patterns

研究生：溫子達

Student : Tzu-Kuei Wen

指導教授：尹慶中 博士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin



Submitted to Department Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

in

Mechanical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年六月

致謝

長達八年的博士生涯終於在這篇致謝可以劃下句點了，對我而言，博士學位不單只是文憑，是人生的一個挑戰，更是一段改變人生的重要過程，所以我要認真的感謝身旁每一位人，謝謝你們的陪伴與相挺。

首先要感謝雙親賜與我寶貴的生命及衣食無缺的生活，讓我無後顧之憂的接受教育並完成博士學位。

從進入交通大學開始修業，承蒙恩師 尹慶中博士的提攜與照顧，尤其在研究上給予耐心的指導，使我順利的取得博士學位，僅此致上最誠摯的謝意，未來的日子我也將與實驗室繼續努力奮鬥。特別感謝口試委員，馬劍清、揚哲化、章明、蕭國模等教授在百忙之中參與子達的論文口試並給予研究上寶貴的建議。

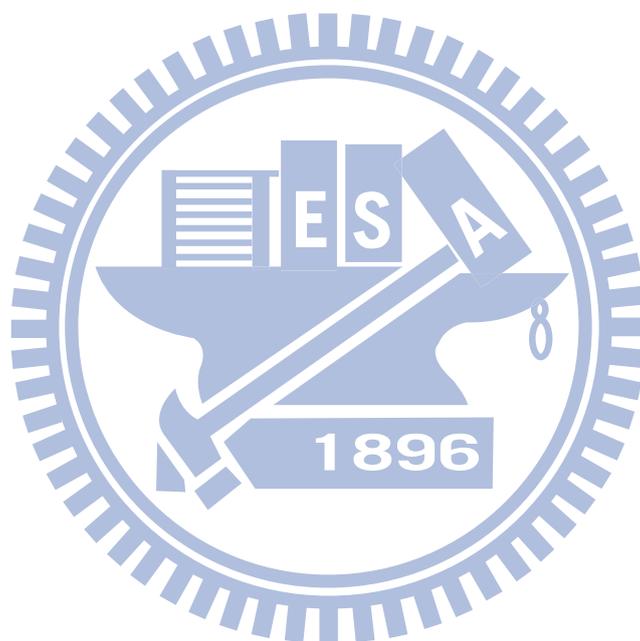
接著，我要感謝大哥温子稷給予我正面的人生態度與目標，與我分享寶貴的讀書與工作經驗，並與大嫂一路扶持，讓我能有樂觀的心態去面對人生每一次的挑戰。感謝二姊温又曄與二姊夫 Cin-ty Li 博士夫婦在在論文投稿時，於英文寫作上的建議及指正，並給與許多寶貴的經驗。

感謝人生第一份工作的主管，王總、鍾副總、簡經理、劉經理、宋經理、Eric 卓、君鴻、碧聰給予嚴格的職場訓練，培養我正確的工作態度。同事，博文、德倫、George、元煜、阿馨哥、Rita、Mei、秀鳳、文軒、小胖老師、Jack、Jessica 陪伴我在血汗工廠只流汗不流血。還有很感謝鴻海桌球社的球友，張協理、朱 Sir、張經理、游律師等，每晚不停的打球，讓我在大陸的日子不感到寂寞與孤單。

感謝 NDE 實驗室成員，泰和、世民、育翔、多聞學長，德新、

阿光、俊傑學弟，同學建宇等在研究上的協助與指教。另外，感謝這一路陪伴的朋友，長庚銲接實驗室的學長冠傑、憬鴻、文雄、大師兄與同學曹宣、志閔，還有籃球場上的球友們。

最後，感謝在久元的長官標哥、副處、徐博給予合作機會並進入公司服務。同事，冠霖、文君、文弘、阿璋、Ben、Sam、佳明、Rex等給予研究及工作上的協助。



目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
致謝.....	iv
目錄.....	vi
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.2.1 太陽能電池及矽晶圓檢測之相關研究.....	3
1.2.2 電子光斑干涉術之相關研究.....	7
1.3 論文架構.....	10
第二章 矽晶太陽能電池簡介.....	14
2.1 太陽能電池的發電原理.....	14
2.1.1 P-N 接點.....	14
2.1.2 光電流產生.....	16
2.2 太陽能電池種類.....	17
2.2.1 單晶矽晶片.....	18
2.2.2 多晶矽晶片.....	19
2.3 結晶矽太陽能電池的基本構造.....	20

2.3.1 P-N 二極體.....	21
2.3.2 抗反射層.....	22
2.3.3 金屬電極.....	23
2.3.4 背面電場.....	24
2.4 太陽能電池模組.....	25
2.5 電致螢光法.....	25
第三章 研究方法及可行性評估.....	42
3.1 太陽能電池熱變形.....	42
3.2 太陽能電池缺陷種類.....	43
3.3 有限元素法數值分析.....	44
3.3.1 數值模型的建立.....	44
3.3.2 邊界條件.....	45
3.3.3 無缺陷太陽能電池.....	45
3.3.4 含缺陷太陽能電池.....	46
3.4 裂縫成長的穩定性分析.....	49
3.4.1 破壞分析與判斷準則.....	50
3.4.2 裂縫應力強度因子計算與穩定性討論.....	51
第四章 實驗技術基本理論及架設.....	69
4.1 電子光斑干涉術基本理論.....	69
4.1.1 光斑干涉術原理.....	69
4.1.2 面內位移的量測.....	71
4.1.3 面外位移的量測.....	74

4.2 太陽能電池裂縫檢測系統架設.....	76
4.2.1 ESPI 量測系統.....	76
4.2.2 量測試片準備.....	79
第五章 結果與討論	91
5.1 實驗結果.....	91
5.1.1 貫穿裂縫.....	92
5.1.2 表面裂縫.....	93
5.1.3 內部裂縫.....	94
5.2 檢測能力評估.....	95
第六章 結論與展望.....	110
6.1 結論.....	110
6.2 未來展望.....	111
參考文獻	113



表目錄

表 2-1	結晶矽材料各方向破壞韌性.....	28
表 2-2	單晶矽材料常數.....	28
表 2-3	多晶矽材料常數.....	28
表 2-4	氮化矽材料常數(PECVD).....	28
表 2-5	金屬電極材料常數.....	29
表 2-6	鋁漿材料常數.....	29



圖目錄

- 圖 1.1 矽晶太陽能電池的 (a)正面、(b)背面、(c)模組照片.....12
- 圖 1.2 美國內華達州(Mojave)沙漠中的太陽能電廠。(美聯社).....13
- 圖 2.1 發電系統比較：(a)化學反應電池 (b)太陽能電池..... 30
- 圖 2.2 二維空間的原子鍵結示意圖：(a)在室溫下，具有完整共價鍵的純矽晶體，(b) n 型半導體，(c) p 型半導體，圖(c)中的空心圓代表電洞.....31
- 圖 2.3 (a) P-N 結合，在接合區附近形成一個空乏區，區域內只有施體與受體的正負離子，沒有自由載子，(b)P-N 接合中的漂移及擴散電流示意圖..... 32
- 圖 2.4 太陽能電池光電流產生及發電示意圖，(a)光子在空乏區中產生的漂移電流及 PN 半導體中產生的擴散電流、(b)光電流經由電極及導線至外接負載.....33
- 圖 2.5 單晶矽晶片製作流程：(a) CZ 拉晶流程示意圖、(b)切邊、(c)線切割切片.....34
- 圖 2.6 多晶矽長晶方法示意圖，(a)坩鍋下降法：將多晶矽原料置於石英坩鍋，熔化後將石英坩鍋下降冷卻；(b)澆鑄法：當多晶矽原料熔化後，將矽熔湯倒入另一方形石英坩鍋中..... 35
- 圖 2.7 太陽能電池之基本構造；P-N 型半導體、抗反射層、金屬電極、背面接觸，(a)外觀圖、(b)及各結構剖面的 SEM 圖.....36
- 圖 2.8 矽晶片表面粗化結構，(a)利用表面粗糙結構降低入射光反射，用以增加入射光子的吸收率，(b)單晶矽晶片上規律的金字塔粗糙結構[61]，(c)多晶矽晶片上無規律的表面粗糙結構[60].....37
- 圖 2.9 太陽能電池上的電極，包括 busbar 與 gridline 兩種結構..... 38

圖 2.10	形成背面電場的鋁漿與太陽能電池固化後的結構示意圖，包含共晶結構及多孔性鋁合金.....	38
圖 2.11	太陽能電池剖面圖：(a)單晶矽、(b)多晶矽，裂縫從抗反層開始延伸至矽-鋁共晶結構停或轉彎。.....	39
圖 2.12	太陽能電池串接示意圖：(a)單一太陽能電池、(b)太陽能電池之串接，(c)太陽能電池模組示.....	40
圖 2.13	矽晶太陽能電池 EL 照片：(a)單晶矽、(b)多晶矽.....	41
圖 3.1	研究方法流程圖.....	54
圖 3.2	有限元素法建立之太陽能電池分析模型：(a)多晶矽、(b)單晶矽.....	55
圖 3.3	實驗中所使用的三種邊界條件.....	56
圖 3.4	太陽能電池模型升溫 0.4 (32.4-32)各方向位移分佈圖.....	57
圖 3.5	模擬太陽能電池受熱溫度與位移量關係圖：(a)多晶矽，(b)單晶矽.....	58
圖 3.6	裂縫模型示意圖。(a)未施加任何負荷，裂縫呈一直線狀態(b)施加負荷後，內部的裂縫產生開口狀態(c)邊緣裂縫的形式.....	59
圖 3.7	太陽能電池模型上裂縫的延展方向，(a)多晶矽(b)單晶矽(c)三種缺陷於深度方向截面的示意圖.....	60
圖 3.8	比較三種典型的缺陷與無缺陷之太陽能電池模型，缺陷位移模型左緣中央向內延伸 25mm，模型受熱 0.4°C (32.4-32°C)後所產生的面外的等高線，(a)無缺陷(b)刮傷(c)表面裂縫(d)貫穿裂縫.....	61
圖 3.9	模擬 25mm 長的貫穿型裂縫於太陽能電池電池左側，於不同溫度間隔下，裂縫面上的面外方向變形。(a)裂縫位於中央(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端.....	62
圖 3.10	模擬 25 mm 長的表面裂縫於太陽能電池模型左側，於不同溫度間隔	

下，裂縫面上的面外方向變形。(a)裂縫位於中央(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端.....	63
圖 3.11 比較有裂縫與無裂縫之太陽能電池模型，受熱增溫 0.4°C (32.4-32°C) 於裂縫面位置上的面外方向位移，(a)裂縫位於中央、(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端.....	64
圖 3.12 裂縫尖端的座標系統，以極座標方式表示.....	65
圖 3.13 二維裂縫模型示意圖.....	65
圖 3.14 二維太陽能電池中的表面裂縫模型.....	66
圖 3.15 太陽能電池中的表面裂縫於不同溫度間格下，深度與應力強度因子關係圖。裂縫位於模型(a)中央、(b)四分之一處.....	67
圖 3.16 太陽能電池中的表面裂縫於 12.7g(自重)的負載下，深度與應力強度因子關係圖。裂縫位於模型(a)中央、(b)四分之一處.....	68
圖 4.1 (a)光斑的形成，(b)以波長 532 的綠光雷射照射太陽能電表面所形成的光斑圖形.....	81
圖 4.2 ESPI 面內位移量測：(a)基本光路圖、(b)實驗架構圖.....	82
圖 4.3 ESPI 面外位移量測：(a)基本光路圖、(b)實驗架構圖.....	83
圖 4.4 NEC TH9100MR 紅外線熱象儀拍攝的溫度分佈圖：(a)約 2 mm ² 面積的破裂於太陽能電池左上角、(b)以加熱板將電池加熱，缺陷處溫度傳遞不均勻.....	84
圖 4.5 於蜂鳴片上製作長度約 9 mm 未貫穿之缺陷，(a)裝置示意圖、(b)ESPI 拍攝出蜂鳴片面外位移的干涉條紋.....	85
圖 4.6 波長 532 nm 綠光半導體雷射光源照片.....	86

圖 4.7	J-type 熱電偶.....	86
圖 4.8	ESPI 量測系統實體照片.....	87
圖 4.9	太陽能電池固定於加熱裝置.....	88
圖 4.10	太陽能電池等距離九宮格升溫之在時曲線.....	88
圖 4.11	ESPI 量測系統在不同溫度間隔下，拍攝三個應變方向的光斑干涉條紋.....	89
圖 4.12	維克氏硬度計施加 20kg 負荷於太陽能電池上所造成的十字形裂縫：(a)光學顯微鏡照片、(b)SEM 照.....	90
圖 5.1	無裂縫的太陽能電池在 ESPI 量測系統中所拍下的電子光斑干涉圖形，升溫間隔 0.4 (32 至 32.4).....	98
圖 5.2	與圖 5.1 相同之無裂縫試片，在不同起始溫度下，所拍攝出辨識度較差的電子光斑干涉圖形，(a) 25 到 25.4 、(b)49.6 到 50	99
圖 5.3	長 38 mm 的貫穿裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a) EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖，位移範圍從 -2.1 至 2 mm，間隔為 0.266 μm	100
圖 5.4	長度 38 mm 的貫穿裂縫升溫 0.4 (32.4-32)，裂縫面上的位移變化：(a)實驗數據、(b)模擬數據.....	101
圖 5.5	長 22 mm 的表面裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從 -1.8 至 2.1 mm，間隔為 0.266 μm	102
圖 5.6	長度 22 mm 的表面裂縫升溫 0.4 (32.4 至 32)，裂縫面上的位移	

	變化：(a)實驗數據、(b)模擬數據.....	103
圖 5.7	長 18 mm 的表面裂縫在單晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從 -1.3 至 1.2 μm ，間隔為 0.266 μm	104
圖 5.8	直徑 33 mm 的內部裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從 -1.6 至 1.2 μm ，間隔為 0.266 μm	105
圖 5.9	直徑 30 mm 的內部裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從 -0.6 至 1.1 μm ，間隔為 0.266 μm ...	106
圖 5.10	太陽能電池表面缺陷：(a)表面刮傷、(b)表面裂縫.....	107
圖 5.11	模擬長 25 mm 的裂縫受熱後所產生的等高線，偏斜角度為表面裂縫的深度比例的函數.....	108
圖 5.12	不同裂縫長度的 ESPI 影像.....	109
圖 6.1	以脈衝方式加熱太陽能電池示意圖.....	112

電子光斑干涉術應用於矽晶太陽能電池之裂縫檢測

研究生：溫子達

指導教授：尹慶中博士

國立交通大學機械工程學系博士班

摘要

在太陽能電池製造過程中，裂縫缺陷是一非常普遍且嚴重的問題。本研究採用電子光斑干涉術(ESPI)為量測工具，快速的確認及辨識太陽能電池上的裂縫。研究步驟先數值分析有、無裂縫之太陽能電池的熱變形，以確認方法的可行性，之後再以ESPI的面外變形量測系統進行實驗。數值模擬及實驗量測皆顯示一致的結果，由面外位移的等高線或干涉條紋可清楚判斷太陽能電池裂縫的存在，並量化顯現裂縫的長度、位置及種類。光斑干涉條紋在表面刮傷、表面裂縫及貫穿裂縫三種缺陷附近的特徵分別是連續的、V形狀及條紋斷裂。為了增加本研究方法的參考價值，實驗以目前太陽能業界出貨檢驗標準的電激螢光法(EL)作為對照，並討論兩種方法個別的優勢。EL影像雖然可以掌握太陽能電池的所有缺陷，但無法如本研究方法清楚的分辨出裂縫或僅稍微影響電性的表面刮傷。本研究方法之太陽能電池的熱變形是在很小的加熱溫度($<0.5^{\circ}\text{C}$)形成，卻可以使裂縫產生很高的辨識特徵，又不會破壞太陽能電池，很適合應用於生產線上做即時的檢測。

關鍵字：裂縫檢測，電子光斑干涉術(ESPI)，結晶矽太陽能電池

Crack Detection in Crystalline silicon Photovoltaic Cells by Interferometric Analysis of Electronic Speckle Patterns

Student : Tzu-Kuei Wen

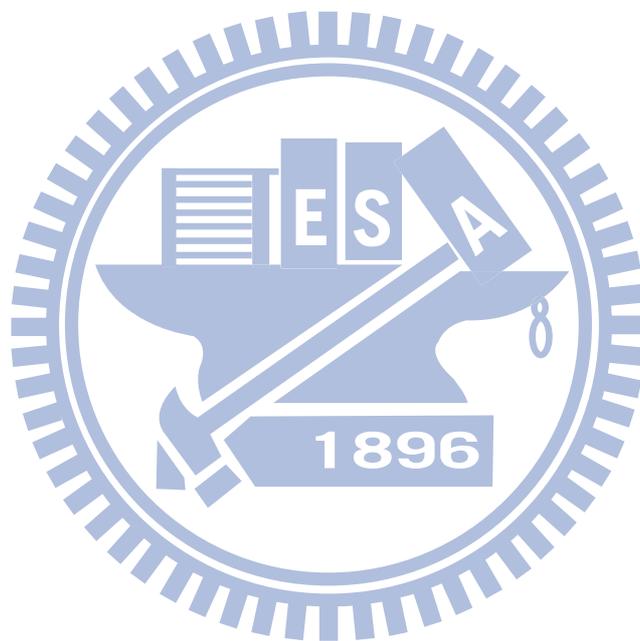
Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Cracking is a common problem encountered during the fabrication of crystalline silicon photovoltaic (PV) cells. In this study, electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is used as a tool for rapid identification of cracks in PV cells. Thermally induced cell deformation of defect-free and defect-bearing PV cells was first modeled with numerical simulations and then experimentally studied by optical configuration for ESPI measurement of out-of-plane deformations. Both numerical and experimental results indicate that the speckle patterns imparted during thermal deformation of a cell allow for simultaneous quantification of crack size, location and type in both single- and poly-crystalline PV cells. Speckle patterns near defects were manifested as continuous, chevron-shaped, and broken fringes for scratch, surface cracks, and through cracks, respectively. For comparison to other existing techniques, full field electroluminescent images were also provided for every defective PV cell. Electroluminescent imaging is capable of detecting cracks, but unlike ESPI, is unable to distinguish between the different types of cracks. Because the amount of heating needed to induce out-of-plane deformation resolvable by ESPI is small ($<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) and because ESPI is sensitive to crack type, the ESPI-based imaging study presented here can potentially be developed into a rapid, non-destructive inspection tool for the structural integrity of solar cells at any point within the manufacturing process.

Keywords: crack detection, electronic speckle pattern interferometry, crystalline silicon photovoltaic cell



第一章 緒論

1.1 研究動機

由於科技發展不斷提升，人類長期對能源的需求增加，使得天然資源越來越少，天然氣、石油、煤的蘊藏量逐漸減少。根據統計資料顯示，石油將在 40 年後耗盡，因此替代能源的開發是不容怠慢的，其中太陽能便是最潔淨的替代能源之一。

太陽能是太陽內部連續不斷的核反應過程產生的能量，太陽表面所放射出來的能量，換算成電力約 3.8×10^{23} kW。太陽光經過 1.5×10^7 km 的距離，穿過大氣層到達地球表面的能量約有 1.8×10^{14} kW，為全球每年平均所需電力的十萬倍。若能夠有效運用此能源，不僅能解決消耗性能源的問題，連環保減碳的問題也可一併獲得解決。目前，德國、美國、日本及以色列等國家已經大量使用太陽能電池(solar cell)及模組裝置(圖 1.1)，德國更以智能電網模式，朝商業化的目標前進。在這些國家中，美國於 1983 年在加州建立世界上最大的太陽能電廠，它的發電量可高達 16 百萬瓦特。南非、波札那、納米比亞及非洲南部的其他國家也設立專案，鼓勵偏遠的鄉村地區安裝低成本的太陽能電池發電系統，並在沙漠地區設置太陽能電廠，圖 1.2 所示為沙漠中的太陽能發電廠。若將太陽能發電與核能發電作比較，太陽能發電的成本約為核能發電的 3 倍，所以製造者皆以降低成本與提高轉換效率為目標，提升太陽能電池的普及率。

太陽能電池依照材料結構的種類可區分為結晶矽(crystalline silicon)、非晶矽(amorphous silicon)、III-V 族[包括: 磷化鎵銦(InGaP)、磷化銦(InP)、砷化鎵(GaAs)]、II-VI 族[包括: 銻化鎘(CdTe)、硒化銦

銅(CuInSe₂)]等，其中結晶矽太陽能電池又可分為單晶矽(single crystalline silicon)與多晶矽(polycrystalline silicon)。目前太陽能電池市場以成本較低的結晶矽為主流，約佔總市場的八成左右，其中又以多晶矽太陽能電池佔多數。結晶矽太陽能電池的結構可分為矽晶片(silicon substrate)、P-N 二極體、抗反射層(anti-reflection)、表面粗化(texturing)和金屬電極等 5 個主要部分，每一部份皆有幾道製造程序，導致在製造或運送過程中容易產生表面或隱藏於材料中的缺陷。

目前業界對太陽能電池的檢測僅侷限於電性的量測[1-2]，在生產線上的標準作業流程，並無任何針對材料結構及機械強度的檢測，只以人工目檢方式，挑檢出有明顯瑕疵產品。然而，僅有表面的瑕疵(如：斷線、刮傷、破片等)能透過肉眼辨識，大部分的缺陷瑕疵無法以肉眼鑑別。這類缺陷瑕疵的太陽能電池通常誤以為良品，導致在鐳線串接時產生破裂，甚至於太陽能電池組成模組、壓合成品時，模組與玻璃層的接觸力過大，裂縫發生延伸，造成整片太陽能電池模組都無法使用。一般市售太陽能電池的使用期約為 25 年，若無法對品質作精確的檢測，將造成後續大量維修的費用，侵蝕太陽能電池業者的利潤。架設於偏遠戶外的大型太陽能發電廠若需經常的不定期維修，產生的費用甚至會造成虧損情形。因此，暗裂瑕疵的檢測是目前業界檢測的重點，若能在前段製程發現這些缺陷或瑕疵，則可提升產品的良率和避免成本的浪費。

本研究的主要目的是發展一套兼具高解析度且快速的檢測方法，在不污染或破壞太陽能電池的情況下，有效檢測其裂縫缺陷。研究方法採用加熱方式使太陽能電池產生微變形，藉由掌握加熱溫度與邊界條件，使熱負載造成太陽能電池的面外及面內位移具有特定的分佈。使用電子光斑干涉法(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)

紀錄太陽能電池表面變形後的等位移分佈條紋，若試片有缺陷，於裂縫處將產生熱變形不連續的情形，整體位移的分佈會重新排列。實驗結果顯示有缺陷及無缺陷的太陽能電池的光斑干涉圖形有很大的差異，由光斑干涉圖形還可判斷裂縫的位置及長度。同時採用目前業界普遍接受的電激發螢光法(electroluminescence, EL)，作為太陽能電池人工缺陷位置的對照。本論文亦使用有限元素法建立太陽能電池的熱變形模型，模擬各種類裂縫受熱變形的位移分佈，於檢測實驗前評估研究方法的可行性，預測系統的檢驗能力，並與實驗結果比較。

1.2 文獻回顧

1.2.1 太陽能電池及矽晶圓檢測之相關研究

太陽能電池的相關研究由於綠色能源議題逐漸被重視而提出，除了材料及製程的研究及改良，針對電池品質的檢測研究，亦有許多相關論文及專利，甚至發表或發展出檢測設備。太陽能電池的主要材料為矽，部分針對矽晶圓(silicon wafer)缺陷檢測的研究亦可作為檢測太陽電池的參考，本節將回顧幾種檢測太陽能電池或矽晶圓的研究方法及電子光斑干涉術的發展歷史。

視覺檢測技術(visual inspection technology)為外觀瑕疵檢測使用最頻繁且簡便的一種方式，隨著CCD (charge-coupled device)相機解析度不斷的提升，可對待測物拍照，直接進行影像分析，此方法不施予任何負載凸顯缺陷的存在。Zhuang等人[3]在2004年以CCD相機拍攝太陽能電池照片，並轉換成灰階(gray transform)形式進行影像調校，採用高斯拉普拉斯轉換(Gauss-Laplacian transform)演算法進行輪廓辨

識，與無缺陷試片的灰階值比對，判別是否存在缺陷，並尋出輪廓破損或裂縫的位置。陳心怡[4]在2007年採用多選擇性的自動門檻值選取法，作為太陽電池瑕疵檢測的方法，以檢測區塊內標準差作為判定準則。若區塊的標準差非常小，表示無瑕疵存在，則直接將整個區塊設為背景。若標準差夠大，採用以Otsu門檻(threshold)值法為基礎的三值化，將區塊分為三個灰階，灰階值較小及較大的部份，代表較暗及較亮瑕疵。對於具隨機紋理表面的多晶矽太陽能電池板，對比並不是很明顯，採線偵測為基礎的方法，檢測出較亮的瑕疵。對於有規律紋理表面的太陽能電池板，則使用紋理學習的方法檢測瑕疵，若得到一個不相配的結果，表示此區塊內有瑕疵。同年，蔡欣儒[5]利用次像素邊偵測、霍氏轉換、及最小平方誤差法等演算法來偵測太陽能電池邊緣瑕疵。在線路瑕疵檢測中，將線路分為粗線(busbar)與細線(finger)兩類，以追蹤檢驗的方式檢測粗線上的瑕疵，細線上的瑕疵則由樣板比對的方法作檢測。

Kasai等人[6]在1983年將聲光(photoacoustic)效應運用在檢測矽晶圓上，以自製的聲光顯微鏡(photoacoustic microscopy, PAM)觀察矽晶圓表面成核時的堆疊缺陷(stacking fault)。實驗中，以聲光調變器(acousto-optic modulator, AOM)調變光源頻率，使試片被照射區域(直徑約 $10\mu\text{m}$ 的圓面積)受到不同頻率的激振，利用壓電陶瓷(PZT ceramics)接收激振所產生的彈性波(elastic wave)訊號，若試片有缺陷存在，產生的訊號將與無缺陷者不同，由訊號的振幅大小可推算缺陷的深度。Berquez等人[7]於2003年提出不同調變頻率對應檢測範圍及缺陷位置的關係，實驗的解析度為 $4\mu\text{m}$ ，為聲光效應檢測方式訂出規格。聲光效應檢測方式雖能有效的檢測出矽晶圓表面及表面下的缺陷，但必須以掃描試片的方式檢測，無法作一次性的全域檢測，比較

適合局部區域或小面積的檢測。若試片的面積較大且必須作全域性的檢測，則需花費較長的時間，不適合應用於生產線的即時檢測。

Breitenstein等人[8-10]提出鎖相熱影像(lock-in thermography)法檢測太陽能電池及模組。實驗以穩態的熱源加熱試片，針對電池於製程中可能產生影響電性的缺陷(如：邊緣切割化、裂縫、孔洞、表面刮傷、金屬燒結不良等)作檢測，以不同的頻率、溫度與相位等參數，拍下振幅及相位改變的熱影像圖，並與電子束誘發電流儀(electron beam induced current, EBIC)、穿透式電子顯微鏡(transmission electron microscopy, TEM)及掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)等其他檢測方式做驗證比較。Dunlop與Halton[11]於2004年以穩定脈衝的電流及氬氣燈兩種負載，施於太陽能電池或模組，使試片溫度產生短暫上升，並以紅外線熱感應器作為偵測器，由熱影像的溫度分佈狀況，檢測試片是否存在缺陷。熱影像檢測法依熱的傳遞狀況可區分為穩態及非穩態，上述的兩種方法皆為穩態方式，前者為固定加熱方式，另一則是脈衝加熱。待測物加熱後，透過紅外線照相機(infrared camera)，搭配溫度或鎖相的方式作訊號處理，可獲得待測物溫度分佈的熱影像。近年來紅外線照相機的解析度大幅提升，熱影像確實能有效的偵測出太陽能電池上的缺陷，但是鎖相造成訊號處理的速度降低許多，且檢測環境有時必須在暗房，所以也不適合被應用在線上檢測。

目前，業界對於太陽能電池及模組的檢測，最常使用的方法是觀察太陽能電池的激發螢光(luminescence)影像，根據密度分佈判斷缺陷。太陽能電池產生激發螢光的方式可依照外加負載方式的不同，分為電激發螢光(electroluminescence, EL)及光激發螢光(photoluminescence, PL)兩種。將太陽能電池施以電場負載或照射高能

量(短波長)的光，半導體材料的部分電子吸收足夠能量後，由價電帶躍遷至導電帶，釋放出光或聲能，使元件內產生光或聲的增益(optical or acoustic gain)，若採用對於 950-1250 nm 波長區間較敏銳的近紅外 CCD 感光原件，可拍下試片的螢光密度分佈圖。分析激發螢光的圖片資料，對應光譜中的特徵，可得知材料摻雜的雜質種類、能隙大小、化合物中的組成成分、晶圓表面及表面下的缺陷，甚至奈米材料之量子點的尺寸、載子傳輸路徑與生命週期等重要訊息 [12-15]。Kasemann 等人[16-17]於 2006 年曾比較激發螢光影像及鎖相熱影像兩種檢測法。本研究採用 EL 檢測法作為實驗的對照組，本文第二章將針對此法作進一步的介紹。

除了上述幾種對於使太陽能電池，進行影像分析的檢測方式之外，利用材料缺陷造成結構的改變，使能量傳遞的衰減率產生差異，亦可成為檢測矽晶圓或太陽能電池的方法。Belyaev 等人[18]在 2006 年提出超音波共振法(resonance ultrasonic vibration, RUV)法檢測矽晶圓，以超音波探頭接觸矽晶圓，使其產生振動，量測、分析面內共振及頻率，根據共振頻率的平移及頻寬的變化，判斷太陽能電池是否有缺陷或裂縫，並以自製的掃描式超音波顯微鏡(scanning acoustic microscope, SAM)檢驗試片作為對照，確認檢測法的正確性。Dallas 等人[19]於 2007 年延續同樣的方法檢測太陽能矽晶片，搭配有限元素分析模擬，估算出裂縫長度，並增加實驗數據使此法降低誤判率，並發表專利及製造成設備。

目前使用於太陽能電池檢測方法可歸納出三個重點：(1)高解析度的檢測方式侷限於小區域，若要進行全域的檢測，檢測速率相對降低，必須依賴昂貴的設備提高效率；(2)快速的檢測方式將使解析度降低或無法確認缺陷位置；(3)太陽能電池的構造較複雜，文獻中的

檢測方式即使適用於矽晶圓，應用於太陽能電池上必須作調整。上述三點正是目前線上量產的太陽能電池仍依賴作業員進行視覺及聽覺檢測缺陷的主要原因，還沒有任何檢測設備可在生產線上直接對太陽能電池作高效率的檢測。

1.2.2 電子光斑干涉術之相關研究

光斑(speckle)在早期被認為是光學量測中令人討厭的雜訊，在同為量測物體表面位移變化的全像術中，更是盡力消除的雜點。Butters 與 Leendertz [20]於 1971 年提出光斑干涉術，利用雷射光照射在待測物體與參考鏡面上，將兩道光反射進入電視攝影機(television camera)後，於待測物變形前後各擷取一光斑圖形，將兩圖照度相減而獲得干涉條紋，藉由分析干涉條紋獲得物體表面靜態或動態的位移[21]。此法克服全像術許多先天的缺點，直接刺激了當時對光學量測研究的投入與發展[22]。近幾年亦有研究將電子光斑干涉術與光學量測物體全域變形的雲紋(moire)法進行比較[23-24]。

光斑干涉術在發展初期是利用光電倍增管(photomultiplier tube, PMT)作為接收器，被拍下的干涉資料沒有任何適合的裝置可儲存，在時間平均(time-average)及即時(real-time)的量測發展受到限制。Spooren [25]於 1994 年提出以電荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)攝影機取代光導管作為光斑干涉的接收器，從此電子光斑干涉術量測待測物的面外、面內位移變得較簡便，逐漸取代了記錄相對不方便的全像術。之後，隨著 CCD 解析度的提升，電子光斑干涉法可使量測的尺寸範圍越來越大，例如 Gülker 等人[26]於 1990 年將此法應用於建築物牆壁的健康監控，Aswendt 等人[27]於 2003 年則針對晶

圓上的微機電(micro-electro-mechanical system, MEMS)結構作檢測。

電子光斑干涉術的量測應用可分為(1)待測物的動態振幅及相位量測、(2)待測物表面的靜態位移及殘留應力量測。Butters 與 Leendertz 於 1971 年提出光斑干涉術，即用於量測物體由振動所造成的面外(out-of-plane)位移。Løberg 與 Høgmoen [28-29]於 1976 年提出相位調制(phase-modulation)結合時間平均的電子光斑干涉術，將相位變化圖形以等高曲線(contour)呈現。在 1977 年，兩人再提出以干涉系統中的參考光束(reference beam)加上相位調制方法，可紀錄振幅 200\AA 的微小振動相位變化[30]。Nakadate [31]於 1986 年提出相位平移光斑圖形干涉術(phase-shifted speckle-pattern interferometry)，消除相位圖形中雜訊所造成的模糊情形，只呈現出與待測物振動相關的相位圖，增加干涉條紋之間的對比度，使亮暗相間的干涉條紋區隔得更清楚。電子光斑干涉術應用於振動量測上，所使用的時間平均演算技巧及量測動態位移的實驗架設，幾乎皆參考或延續 Jones 與 Wykes [22] 於 1989 年所提出的時間平均演算技術。Wang 等人[32]於 1996 提出振幅變動(amplitude-fluctuation)電子光斑干涉術(AF-ESPI)，使參考物於頻率一致、振幅不等的振動狀態下分別拍攝，結合時間平均及相位平移的優點，使振動模態能更清楚的被拍攝，此技術亦為近年來電子光斑干涉術於振動量測上一大突破。Ma 等人[33]於 2001 年則運用 AF-ESPI 於壓電材料及含裂紋板的振動問題。

電子光斑干涉術可量測物體表面的準靜態位移，擷取物體遭受外力(例如機械力、壓力、熱應力等)作用後所產生的變形，透過干涉條紋的分佈及數量可推算出待測物表面的應變量[34]。Leendertz 與 Butters[35]、Hung[36]分別於 1973 及 1974 以麥克森干涉儀的光學架構，將待測平面轉一角度，使成像於像平面(image plane)的位置偏移

(shift)，稱為剪切光斑干涉干涉術(image-shearing speckle pattern interferometer)，藉由此技術量測待測物表面的翹曲度(surface curvature)。Winther[37]於 1988 年以三組光纖在不同角度下照射待測物體表面，利用三組入射光角度變化對應所產生的光斑干涉條紋，推算平面位移及翹曲程度，再以內差方式模擬面外方向的位移，將物體表面每一點三方向位移數據組合，重建三維的應變。

在 80 年代後期，ESPI 的光路架構及相關演算法都已發展成熟，後續研究多以應用量測或監控待測物受熱、壓等外力作用後產生的變形，並藉由光斑干涉條紋推算相對應的位移大小及分佈。物體在穩定狀態中，不容易察覺發生於內部的裂縫或瑕疵，許多電子元件及產品在工作時，伴隨溫度或壓力的升高而產生應變，裂縫由密合的狀態分離、擴張甚至延展，當產生的變形超過結構的負荷時，會影響功能甚至產生結構性破壞。ESPI 量測系統對於周邊環境所造成的誤差相對於雲紋及全像術等光學量測系統小，可作全域性的變形量測，所以常被應用於即時監測物體因溫度、壓力差異所產生變形擾動，快速診斷元件的品質。

Nassim[38]等人於 1998 年以面內(僅 x 方向)及面外兩種 ESPI 光路架構，即時監測面積 $2 \times 3 \text{ mm}^2$ 矽氧化金屬功率元件(mos power device)在功率 1 瓦特(watt)下所產生的熱變形。Hack 及 Brönnimann[39]於 1999 年以面外 ESPI 架構，量測以碳纖複合材料(CFRP)與鋁兩種材料做成的蜂巢板(honeycomb panel, $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$)，擷取溫度從室溫上升 20 後的變形量，並與有限元素法的分析結果作比較。

Kim 等人[40]於 2003 年運用面外及剪切 ESPI 兩種方式檢測壓力管件內部裂縫。管件於運作壓力提高時，裂縫附近應變增加，造成內部裂縫被凸顯，控制壓力以剪切檢測方式估算裂縫數量，並以面外檢

測方式測量裂縫周圍的位移變化。Wang 與 Kido[41-42]於 2003 及 2004 年，在高溫及拉力等疲勞(fatigue)測試下，利用面內 ESPI 量測表面熱噴塗陶瓷材料的 304 不鏽鋼的變形。試片在反復的拉力及溫度(20-600)負載後，產生表面裂縫及脫層，由面內 ESPI 量測法所拍下的干涉條紋獲得試片表面的變形分佈，並由條紋數估算表面應變大小，與應變規(stain gauge)量測獲得的數據比較。Zarate 等人[43]於 2005 年，將 6061 鋁材料加熱至 225 ，使裂縫周圍與其他區域的變形量不一致，再根據面外 ESPI 影像中的光斑干涉條紋分佈找出裂縫。

1.3 論文架構

本文共分為六章，第一章為緒論，說明研究動機，介紹目前業界及學術研究單位對於結晶矽太陽能電池的檢測方法，並敘述電子光斑干涉術的發展歷史及實際上的應用。

第二章介紹太陽能電池的基本構造、發電原理、製造流程，另外介紹目前業界檢測太陽能電池缺陷所使用的電激發螢光法，與後續實驗結果相互驗證、比較。

第三章為本研究方法的可行性評估，在實驗前以有限元素法建立太陽能電池的模型，模型上建立邊緣及內部不同位置的裂縫，並依照缺陷的深度區分為貫穿裂縫、表面裂縫與表面刮傷三種。在數值模型上施予適當的熱負載及邊界條件，進行模擬分析，由分析結果說明本研究的可行性。

第四章介紹電子光斑干涉術基本原理及本研究方法。電子光斑干涉術依照光路架構不同，可分為面內及面外量測系統。待測物變形前後產生的光斑強度及相位變化，經過影像處理後可獲得亮暗相間的干

涉條紋，條紋的分佈與數量即代表待測物變形的位移量，建立太陽能電池受熱產生變形與干涉條紋的關係。

實驗方法說明如何架設實驗系統及太陽能電池之人工裂縫的製作。實驗使用之 CCD 相機感應器(sensor)對於波長 532 nm 的綠光較敏感，所以本檢測系統採用綠光雷射作為光源，透過空間濾波器將光束放大，再經由分光鏡分光，將光源同時照射於參考物及待測物上。檢測系統運用 LabVIEW 儀控軟體自動監控加熱溫度及控制 CCD 相機的拍攝間隔。

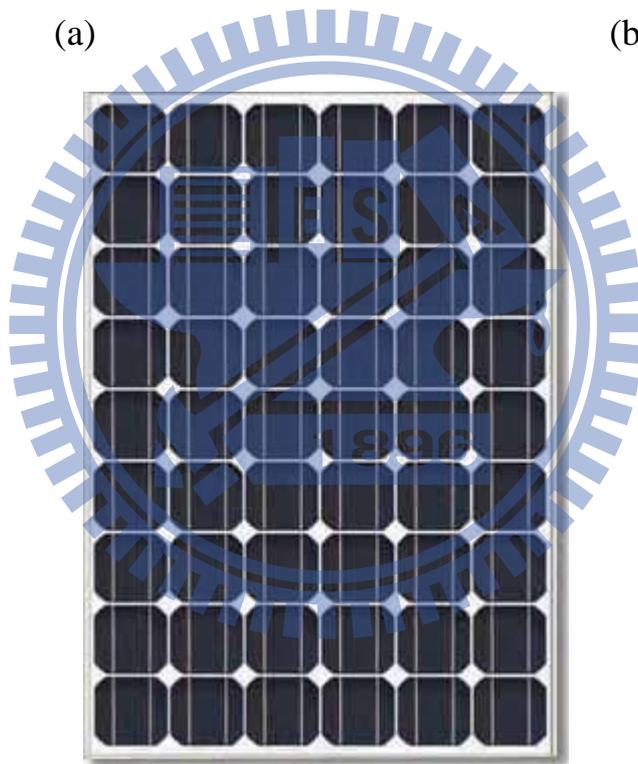
第五章為實驗結果與討論，呈現本研究方法的實驗結果，並與電激發螢光法及數值模擬的結果作比較及討論。針對裂縫的長度、深度與變形量的關係作整理，進行檢測能力的評估。第六章為本研究結果的結論，並對未來研究的方向作整理與規劃。





(a)

(b)



(c)

圖 1.1 太陽能電池的 (a)正面、(b)背面及(c)模組照片

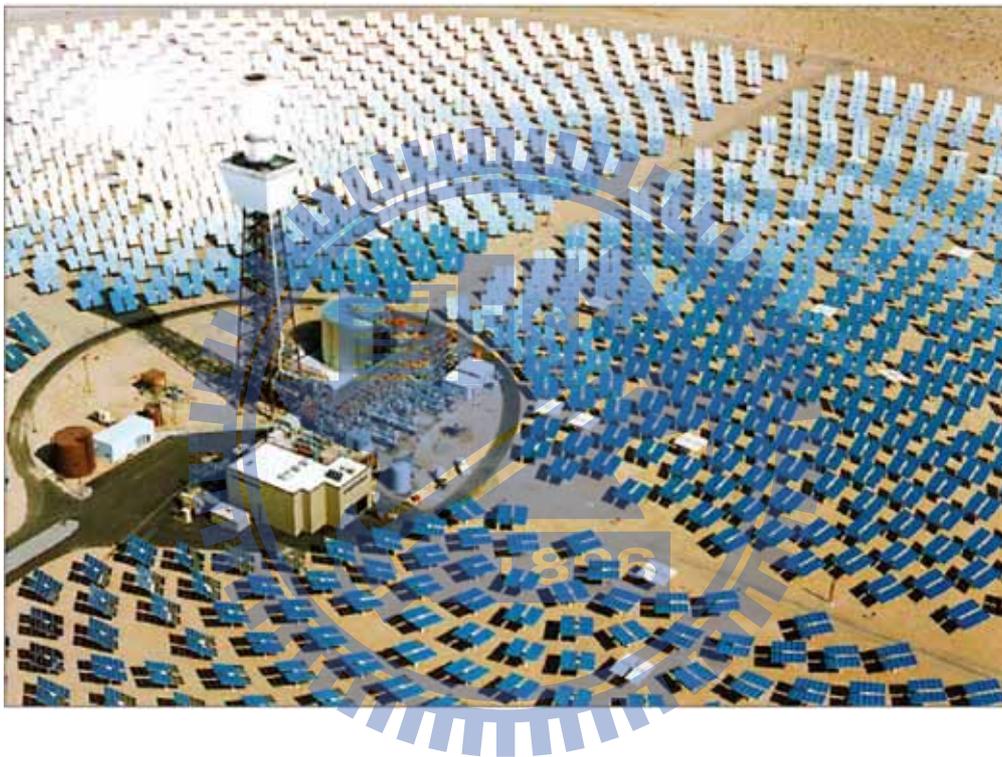


圖 1.2 美國內華達州(Mojave)沙漠中的太陽能電廠。(美聯社)

第二章 矽晶太陽能電池簡介

太陽能電池是一種利用光伏效應(photovoltaic effect)，將光能轉換成電能的裝置[44]，Fritts[45]於 1894 年以金(Au)和硒(Se)及其他金屬，做出第一個可於戶外運轉的太陽能電池。Chapin[46]等人則於 1954 年，以半導體製程做出轉換效率約 6%的太陽能電池。一般的化學反應電池為藉由氧化還原反應，把正極、負極活性物質的化學能轉化為電能。太陽能電池則是藉由光子照射到半導體，使 P-N 接點(P-N junction)的兩端電極獲得電位差，產生可輸出功率的電壓，圖 2.1 表示電子於化學反應電池與太陽能電池兩種不同的傳遞方式。

2.1 太陽能電池的發電原理

太陽輻射以可見光為主，其分佈範圍從 0.3 μm 之紫外光到數微米之外紅外光為主，若換算成光子的能量，則約在 0.4 到 4 電子伏特(eV)之間。當光線照射在太陽能電池材料時，若光子的能量小於半導體的能隙(energy bandgap)，則光子不被半導體吸收，亦無法使該材料產生電子-電洞對。當光子的能量大於半導體的能隙，則相當於半導體能隙的能量將被半導體吸收，產生電子-電洞對，其餘的能量則以熱的形式消耗掉[47]。

2.1.1 P-N 接點

所謂的 P-N 接點就是將 n 型半導體和 p 型半導體接觸在一起所形成的接點。在矽材料摻雜(doping)少量 V 族元素之不純物，例如砷、磷、

鈹、銻等，若晶格內一個矽原子被一個帶有五個價電子的砷原子取代，如圖 2.2(b)所示，晶格結構並不受影響，砷原子會傾向與周圍矽原子形成共價鍵，其第五個價電子雖然仍被束縛，但因砷原子與周圍矽原子形成共價鍵結，導致砷原子第五個價電子束縛能大幅減弱，能在接近室溫下，就游離成導電電子。這種能夠提供導電電子的雜質稱做施體(donor)，或 n 型摻雜，此種結合的原子會放棄電子，稱之為捐獻原子(donor atom)。此時半導體材料內的導電電子數目由所摻雜濃度決定，且一般遠大於本質載子濃度，傳導是由電子-負電荷主導，故稱之為 n 型半導體(n-type semiconductor)，材料內部的多數載子(majority carrier)為自由電子，而少數載子(minority carrier)為電洞。

當矽材料摻入 III 族元素，例如硼、鋁、鎵、銦等，晶格內一個矽原子被一個帶有三個價電子的硼原子所取代，如圖 2.2(c)所示，硼原子會傾向與四個鄰近的矽原子形成共價鍵，但缺少一個價電子，就如同共價鍵上有一個空洞。在接近室溫溫度下，其周圍矽原子所形成共價鍵內的價電子就有可能游離，替補硼原子不足的價電子，而在價電帶產生導電電洞，這種能夠提供電洞的雜質稱做受體(acceptor)。半導體材料內的導電電洞數目由所摻雜雜質濃度來決定，傳導也是由代表正電荷的電洞主導，所以稱之為 p 型半導體(p-type semiconductor)，此時多數載子變為電洞，而自由電子成為少數載子。

一般 P-N 接點是以摻雜少量 III 族元素的 p 型半導體作為基板，然後再用高溫熱擴散(diffusion)的方式將 V 族材料摻入，此時即形成一個 P-N 二極體(diode)。n 型半導體內的過多電子會擴散到 p 型半導體中，填補其內的電洞，在 p 型半導體中的電洞則會向 n 型半導體擴散，因此產生電荷的流動，稱為擴散電流 I_{diff} (diffusion current)。在 P-N 接點附近，因電子與電洞互相結合，會形成一個載子空乏區(depletion

region)，或稱為空間電荷區(space charge region)，空乏區不存在多餘的自由電子與電洞，如圖 2.3(a)所示。然而，n 型半導體的過多電子並不能無限制的往左邊移動，因為帶電離子在接點附近產生一電場，此一電場會排斥少數載子，電子在接近 p 型半導體時，會受到受體負電荷之排斥力。同理，左邊 p 型半導體之電洞在接近接合處，也會受到施體正電荷的排斥力。在接合面之正負離子排斥少數載子所造成的電流稱為漂移電流 I_{drift} (drift current) 或稱為逆向飽和電流，方向與擴散電子流相反。到達平衡時，在任一位置的漂移和擴散電子流會完全抵銷，如圖 2.3(b) 所示，總電子流及總電洞流均為零，二極體電流 $I = I_{diff} + I_{drift} = 0$ 。

2.1.2 光電流產生

太陽光照射在太陽能電池上所產生的光電流，可分為兩個部分作討論，第一為空乏區所產生的漂移電流，第二為空乏區以外 p 型及 n 型半導體所產生的少數載子擴散電流。當太陽光照射在兩端點連接的 P-N 接點時，光子會在空乏區內產生電子-電洞對，並受內建電場影響，電子會向 n 型半導體區漂移，電洞則會向 p 型半導體漂移，產生由 n 型流向 p 型的漂移電流。而光子在空乏區以外之 n 型及 p 型半導體區內-準電中性(quasi-neutral)區域中被吸收，亦會產生光電流。在準電中性區域所產生的電子-電洞對，由於缺少內建電場的作用，且多數載子濃度基本上不受光照的效應而有明顯改變，所以光電流是由少數載子決定的擴散電流。以 p 型半導體為例，準電中性區域的少數載子為電子，由於空乏區靠近 p 型半導體端區域內的電子不斷流向 n 型半導體區，造成該區域的電子濃度較低，p 型準電中性區域內由於光照產生

的電子就會往 n 型區方向擴散，形成擴散電流。同理，n 型準電中性區域的少數載子-電洞，亦會形成往 p 型區方向擴散的擴散電流，圖 2.4(b)為太陽能電池發電示意圖。

當 P-N 二極體受到光照而產生超額載子(excess carrier)後，準電中性區域會開始產生由高濃度往低濃度的擴散效應，此過程中亦伴隨著被原有平衡態的載子復合(recombination)同時發生，進而回復平衡態。自由載子在被復合前所能擴散的時間稱為生命週期(lifetime)，距離稱之為擴散長度(diffusion length)。然而，p 型半導體的超額少數載子(電子)比 n 型中超額少數載子(電洞)的擴散長度來得長，即 p 型半導體中的自由載子將有較高的機率被收集為光電流。因此，太陽能電池所使用的晶片雖然可分為 p 型或 n 型兩種，但一般都會選擇 p 型作為基底(substrate)，增加自由載子的收集。

2.2 太陽能電池種類

太陽能系統的基本單位就是太陽能電池，單一的結晶矽太陽能電池之輸出電壓約為 0.5 V，其最大的功率輸出與太陽能電池效率及其表面積有關，若要與一般家庭或工業用電相容或配合，需將多個太陽電池並聯及串聯起來形成模組。其中串聯的作用是為为了提高輸出電壓，並聯的作用是為增加輸出功率。若要提高模組的輸出電壓或功率，則需由多個模組並聯或串聯起來形成陣列(array)。一套完整的太陽能應用系統，不僅要有電池、模組或陣列，還必須有儲電裝置(storage devices)、功率調節器(power conditioner)及一些周邊設備。

太陽電池可分為矽基材料型和化合物型兩大種類，矽基材料型太陽能電池又可區分結晶矽和非結晶矽兩種類型。化合物型太陽能電池

可區分為 III-V 族、III-VI 族或其他材料。本研究所檢測的對象為結晶矽太陽能電池，本章節僅對結晶矽太陽能電池的製程做介紹，但不論何種材料或製程的太陽能電池，最基本的結構可分為基板(substrate)、P-N 二極體、抗反射層(antireflection layer)、表面粗糙層(texturization)和金屬電極 5 個主要部分。基板是太陽電池的主體，P-N 二極體是光伏特效應來源，抗反射層的目的在於減少光的反射，增加光子的吸收，進而增加光電流，表面粗糙層主要是為了減少太陽光反射而增加電池效率，金屬電極則是連接元件與外界負載。矽的能隙為 1.12 電子伏特，且為間接能隙半導體，對光的吸收性不如直接能隙材料，但由於矽是地表中含量僅次於氧的第二豐富之元素，且本身無毒性，氧化物穩定又不具水溶性，因此，矽是目前太陽能電池產業最主要的材料[48-50]。

2.2.1 單晶矽晶片

矽在室溫之下，屬於高強度的脆性材料，強度與結晶缺陷或雜質有關聯，例如：氧濃度對含有差排矽晶的強度有顯著的影響，但對於零差排的單晶矽強度影響不大。單晶矽在{111}面具有最高的原子密度及楊氏係數或彈性模數[51]，代表裂縫最容易沿此平面延展(crack propagation)或在此面產生劈裂(cleave)[52]，單晶矽在各方向的破壞韌性如表 2-1 所列[53]，其中較常被討論之{111}方向的 K_{IC} 約為 $0.9 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，單晶矽的相關重要材料常數如表 2-2 所列。

單晶矽晶片的製程包括柴氏長晶(Czochralski, CZ)、修邊、切片、蝕刻清洗等步驟。在工業界有兩種方法可用來生長單晶矽，其中柴氏長晶法約佔 85%，另一個方法浮融法(float zone, FZ)。柴氏長晶是 Czochralski 於 1918 年研究固液界面的結晶速度所發展出來的方法，

Teal 和 Little[54]於 1950 年最先將之應用於生長矽及鍺單晶。

經由柴氏長晶法所生成單晶矽棒會先經過一道修邊的程序，將圓柱形的晶棒修成四方柱，使矽晶片為四方形，在排設太陽能電池模組能有較好的面積使用率；四方形的單晶矽晶柱接著以線切割的方式切割成矽晶片，厚度約為 200-250 μm 。從矽晶柱切下的矽晶片表面常會殘留機械應力而造成的結構損傷，稱之為切割損傷(saw damage)，進而影響到太陽電池之效率，為去除這損傷層，必須使用強酸(HF/HNO_3)或強鹼(KOH/NaOH)進行蝕刻，業界在生產單晶矽晶片時一般使用氫氧化鉀作為蝕刻液，工作溫度約為 80-120 $^{\circ}\text{C}$ ，蝕刻的深度約為 8-12 μm ，圖 2.5 為單晶矽晶片製造流程的示意圖。

2.2.2 多晶矽晶片

由於 CZ 單晶矽晶片的生產成本較高，因此促使太陽能業者尋求使用價格低廉的多晶矽片(multicrystalline silicon wafer)當作原料基板。多晶矽及單晶矽可從外觀上加以區別，但真正的鑒別須通過分析測定晶體的晶面方向、導電類型和電阻率等。多晶矽材料晶格排列無特別的方向，一般視為等向性(isotropic)材料，當有裂縫產生，不會像單晶矽材料會在特定的方向延展，破壞韌性在各方向皆為 0.84-1.24 $\text{MPa m}^{1/2}$ [55]，其他重要材料常數如表 2-3 所列[53]。

多晶矽一般是將熔融的矽以鑄造(casting)的方式製造而成，因其製程簡單及產出率高，且以鑄造的方式可直接產出四面體型的矽晶棒，不必如同單晶矽棒一樣必須將圓柱狀加工成四方柱，材料的利用率及縮減製程，使多晶矽具有成本較低的優勢，為目前結晶矽太陽能電池的主流。鑄造多晶矽錠通常會採用方向凝固的方式，使長出的晶粒不

會雜亂沒有次序，經過方向性的凝固控制，則可以長出約數毫米到數釐米寬度的柱狀排列晶粒。目前主要有兩種方法被業界所使用，分別為坩鍋下降法(Bridgman method)及鑄錠或澆鑄法(casting method)。坩鍋下降法中原料的熔化與結晶過程都在同一個坩鍋內進行，澆鑄法的熔料過程在第一坩鍋而結晶則在第二坩鍋。

坩鍋下降法最早是由 Bridgman[56]與 Stockbarger [57]分別於 1925 年及 1936 提出相似的方法，兩者的差異僅在於對溫度梯度的掌控，由於當時實驗的對象皆不是多晶矽而是一般金屬及單晶矽，所以後續稱此法為 Bridgman-Stockbarger 法。坩鍋下降法的特點是讓熔體在坩鍋中冷卻而凝固，凝固過程是由坩鍋一端開始，逐漸擴展到整個熔體。但因為矽熔漿與石英坩鍋在高溫的反應耗時，所以完成一次鑄造的時間較長，產出率比澆鑄法來得低。但不論是坩鍋下降法還是澆鑄法所生產的多晶矽錠，皆必須將立方體的六個表面切除，確保多晶矽的品質，圖 2.6(a)與(b)分別為坩鍋下降法及澆鑄法示意圖。

2.3 結晶矽太陽能電池的基本構造

結晶矽太陽能電池可以分為單晶及多晶矽兩種，單晶矽電池相對多晶矽有較好的效率，一般工業上所生產的單晶矽電池效率大約從 16%至 17%，但相對成本也較高，多應用於發電廠、大型充電系統等。多晶矽電池雖然效率較低，約為 15%至 16%，但因製程較簡單，擁有成本上的優勢，多應用於低功率的電力系統。單晶矽及多晶矽電池雖然在效率上有明顯的差異，但組成結晶矽太陽能電池的基本結構大致上是相同的，包括基板、P-N 二極體、抗反射層、金屬電極及背面電場(back surface field, BSF)等 5 個主要結構，圖 2.7(a)為太陽能主要結構

示意圖，圖 2.7(b)為各結構的 SEM 照片，主要結構厚度為矽(Si)約 170 μm 、正面金屬電極(Ag)約 30 μm 、背面金屬電極(Ag)約 20 μm 、抗反射膜(SiN_x)約 0.8-1 μm 與鋁漿(Al)約 30 μm 。生產太陽能電池程序的步驟包括有長晶(growth)、修邊(ingot squaring)、切片(slicing)、蝕刻清洗(etching and cleaning)、表面粗糙結構化(texturuzation)、磷擴散(phosphorus diffusion)、邊緣絕緣處理(edge isolation)、抗反射層塗佈(arc deposition)、正面電極之網印(front contact print)、背面電極之網印(back contact print)、火烤(cofiring)等[58-59]。

經由線切割製程所產出的單晶與多晶矽晶片，會立即進行清洗與蝕刻的製程，其目的有二，其一為消除切割的殘留應力，內容在 2.2 節已提過；其二為使晶片的表面產生粗糙結構，使太陽能電池在接受照光時，透過粗糙的表面使入射光多重反射，增加光的行進路徑，提升光子被吸收的機率。然而，製程中多晶矽晶片所使用的蝕刻溶劑與單晶矽晶片不同，多晶矽晶片由於晶格排列無特定的方向性，使用蝕刻速度較快的氫氟酸(HF)或硝酸(HNO_3)於低溫(5-25 $^{\circ}\text{C}$)下進行[60]。單晶矽晶片所使用蝕刻溶劑為氫氧化鈉或氫氧化鉀加異丙醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ，工業上稱 IPA)，由於單晶矽的晶格在[111]方向的蝕刻速度會較[100]慢，所以晶片表面在蝕刻後會呈現規律的金字塔狀[61]，如圖 2.8 所示。

2.3.1 P-N 二極體

矽晶片要形成 P-N 二極體必須經由高溫擴散製程，p 型半導體為基底的太陽能電池所使用的是磷擴散製程。一般的磷擴散製程作法是將矽晶片置入石英爐管裡，通入反應氣體 POCl_3 ，使之在爐管內與氧氣反應產生 P_2O_5 氣體，此氣體會與矽反應產生磷原子，並藉高溫擴散

進入矽晶格內，形成 n 型的摻雜。由於氣體擴散製程在生產時花費較多的時間，目前工業界發展出另一套縮短製程時間的磷擴散方法，將含磷的膏狀化合物(H_3PO_4)先塗抹在矽晶片上，再放入爐管中進行擴散製程。此方法的磷擴散雖只發生在有塗抹含磷膏狀物的矽晶片表面，但由於一般太陽能電池也是單面接受太陽光照射，所以與上述通入含磷氣體方式所生產的電池，在發電效率上並無差異。經過磷擴散後的 P-N 二極體，必須將矽晶片邊緣的 n 型摻雜去除，否則正面與背面的電極將自行導通，一般使用雷射或電漿進行乾蝕刻的方式將其去除，所以在太陽能電池的邊緣常可發現有燒焦的痕跡。

2.3.2 抗反射層

正常照光下，結晶矽晶片在表面的光反射率大約 35%，經由上述的表面粗化處理後，反射率約降至 25%，但仍還是有很多光子無法進入 P-N 二極體內部，為了讓入射光大部分的光子都能進入半導體內而不反射，會在矽晶片表面鍍上一層厚度約 80-100 nm 的抗反射膜，目前業界大都使用電漿輔助化學氣相沈積(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)法作為快速生產的方法[62]。當矽晶片被送入反應爐之後，反應爐會通入 SiH_4 及 NH_3 氣體，使矽晶片表面產生氮化矽 SiN_x ，但在這層抗反射層裡約有 40% 的氫原子，所以正確的化學表示式為 $\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$ 。結晶矽太陽能電池的抗反射層折射率的最佳值約在 1.9 至 2.5 之間，可使 600 nm 波長的紅光在電池表面有低於 10% 的反射率，這也是目前市面上看到結晶矽太陽能電池的正面都是藍色的原因[63]。

氮化矽薄膜(<1 μm)的材料係數與厚度尺寸無關聯性，只與製程種

類與製程溫度及壓力有關聯[64-65]。不同製程下所生產的氮化矽薄膜機械性質會有些許的差異，例如以低壓化學氣相沈積(low-pressure chemical vapor deposition, LPCVD)產生的氮化矽薄膜的破壞韌性比電漿輔助化學氣相沈積生產的大很多，前者約 $6.3 \pm 0.4 \text{ MPa m}^{1/2}$ [64]，後者約為 $1.35\text{-}1.7 \text{ MPa m}^{1/2}$ [66-67]。太陽能電池抗反射層之氮化矽薄膜的製程參數為工作溫度 300 以下以及壓力 600 mTorr，採用此製程所產生的材料性質與矽晶片接近，其他的重要的材料常數如表 2-4 所列 [68-70]。

2.3.3 金屬電極

當太陽光照射在太陽能電池上，入射光子攜帶的能量在 P-N 接點及 p 型與 n 型半導體中產生漂移及擴散電流，這些光電流若能被利用，需經由金屬電極才能與外界的電路流通。太陽能電池上的主要金屬電極為正反兩面都有的兩平行金屬電極，一般稱為 bus bar，若只在太陽能電池正面才有，且較 bus bar 細的金屬電極稱為 gridline，如圖 2.9 所示。Bus bar 的功能在於提供與外接線路銲接，使太陽能電池能一片接著一片被串聯起來。金屬箔線串聯太陽能電池時，一端銲接於在正面的 busbar，另一端則接到電池反面的 busbar。Gridline 的功能主要在收集自由載子，理論上，若太陽能電池上有越多的 gridline。越能有效地收集自由載子，提升發電效率。若數目太多，將遮蔽入射光的比例，所以 gridline 的排列與線寬必須經過最佳化設計[71]。太陽能電池金屬電極的主要材料是由銀、鋁、玻璃粉及有機溶劑所組成，以網版印刷(screen printing)的方式附著至電池上，再以紅外線或熱風烘烤的方法固化成電極。製造過程中，活性物質必須能穿透抗反射層，所以技術關

鍵除了網版的線寬及金屬膏的成分比例之外，烘烤的時間及溫度也非常重要[72]，電極的各材料係數如表 2-5 所列。

2.3.4 背面電場

當光子進入P-N二極體，有效產生自由載子之後，p型半導體的少數載子(電子)有可能會在底部被復合，降低產生光電流的效率。能有效阻止此情形發生的作法是Zhao等人[73]於2001年提出，利用擴散製程在p型半導體底部製作一背面電場(back surface field, BSF)，當電子接近底部時將被電場的效應所反彈，降低電子被復合的機率。目前業界由於生產效率的考量，發展出與電極同樣的網版印刷製程，在p型半導體底部塗上一層鋁漿(aluminium paste)，鋁漿烘烤後會與半導體產生一層矽-鋁共晶結構(Si-Al eutectic structure)，如圖2.10所示，而外層的鋁材料可以使太陽能電池有更好的歐姆接觸。

利用銀漿及鋁漿分別製作電極及背面電場的方式雖然可大幅提升生產效率，但這些材料的熱膨脹係數(thermal expansion coefficient, CTE)與楊氏係數(Young's module)都與矽有很大差異，鋁漿的各材料係數如表2-6所列[74-75]，尤其是作為金屬電極主要成分的銀之熱膨脹係數與鋁相差達5-6倍。在烘烤固化的過程中，不同熱膨脹係的材料結合在一起，會使太陽能電池產生翹曲(bending)，稱之為bow。此問題不僅會在烘烤製程中使電池本身結構產生破壞，當進行電池的模組製程時，甚至造成整體性的脆裂[76]。

矽-鋁共晶結構與矽晶圓的機械性質除熱膨脹係數及楊氏係數有很大的不同外，兩種材料的破壞韌性也有很大的差異，多晶與單晶矽材料的破壞韌性一般約在0.8-1.2 Mpa. m^{1/2}之間。然而，共晶結構最大

可達到 $80 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ [77]，如此大的差異將使裂縫的成長不易橫跨兩種材料。當太陽能電池上有一裂縫發生於矽材料中，裂縫在厚度方向的成長經常會在兩材料的交界處停止或轉換方向，不易貫穿整個電池，即使初始裂縫垂直基板，裂縫的成長也會停頓於共晶結構上緣。圖2.11所示為太陽能電池剖面的SEM照片，圖中可看到一裂縫從電池正面的抗反射層延伸至共晶結構後停止，且延伸走勢止於共晶結構的上緣。具有裂縫的太陽能電池長時間置於戶外遭受陽光照射，電池受熱彎曲將使裂縫往共晶結構延伸，最終形成貫穿型裂縫，進而造成整體脆裂。

2.4 太陽能電池模組

太陽能電池模組是由太陽能電池串聯及並聯組合成的，如圖 2.12 所示，電池的串接通常是將金屬箔片銲接於正面的電極或匯流排，箔片的另外一端則接到另一電池的背面。戶外型的太陽能電池，必須能夠至少操作 20 年以上，所以太陽能電池模組需要考慮承受機械負載、避免環境污染的影響、承受雨水侵蝕與溫度的變化、提高安全性等設計因子。

圖 2.12(c)所示為典型的太陽能電池模組結構示意圖，在太陽能電池正、反面各有一保護層，材質為高分子塑膠乙烯-醋酸乙烯共聚物(ethylene-vinyl-acetate)，最上及最下層為必須有足夠的透光性及機械強度的強化玻璃(chemical glass)。太陽能電池串聯後與高分子塑膠板及強化玻璃堆疊完成，一同放入層壓機(laminator)上做真空封裝，即成為市售上的太陽能電池模組[2]。

2.5 電致螢光法

太陽能電池製造過程中通常會產生一些缺陷，有些缺陷是經由人為刻意造成的，例如摻雜產生的缺陷，所有的缺陷都會影響電池的光電轉化效率及電池的壽命。缺陷影響電池的電性是可以被發展為有效的檢測方法，例如：電致發光或光致發光方法就可以檢測太陽能電池或其他半導體材料[12][15]。

半導體材料的能隙介於導體與絕緣體之間，本質半導體在穩定時所有電子幾乎都是位在價電帶(valence band, VB)上，若給予穩定之半導體一個順向偏壓，使產生高於能隙之能量，部分電子會被激發由價電帶躍遷至導電帶，留下電洞在價電帶。被激發的電子在不穩定的情形下，會與晶格碰撞，以熱或聲的形式釋出能量而掉至導電帶底部。同樣的，高能量的電洞亦會掉至價電帶頂部，接著導電帶底部的電子與價電帶的電洞會復合而發出光子，即電致螢光。半導體中的載子從激發到復合的過程稱為生命週期，若應用在P-N二極體上，這些被激發的電子與電洞各為p型及n型半導體中的少數載子，所以在P-N二極體中又稱少數載子生命週期，所需的能量必須至少與材料之能隙相等，若太小則無法有效激發電子或電洞至導電或價電帶。

半導體中的電子經由復合效應以輻射方式發光，不同材料會有不同的激發能量與相對應的光譜圖，太陽能電池發出的光波長介於950-1250 nm之間[78]，以此區間波長較靈敏的CCD相機才能拍下太陽能電池的輻射復合分佈圖像。太陽能電池的電致發光亮度正比於少數載子的擴散長度，所以太陽能電池電致發光影像展現出太陽能電池擴散長度的分佈特徵，透過EL照片可以有效地分析太陽能電池產生的缺陷，例如裂紋、晶界等。圖2.13顯示無破壞之單晶及多晶矽太陽能電池的EL照片。多晶矽太陽能電池由於晶格排列無特定的方向，會產生許多晶格缺陷，也容易產生摻雜缺陷，通電後電池無法發出螢光，或

是光強度太弱，故EL照片呈現較暗的灰階。



表 2-1 單晶矽材料各方向破壞韌性

Testing method	Crack orientation	K_{IC} (MPa m ^{1/2})
Double cantilever beam	{111}	0.94±0.03
Controlled flaw	{111}	0.82±0.07
Four-point bending	{110}	0.9±0.11
	{100}	0.95±0.05
Microindentation	{110}/{112}	1±0.08

表 2-2 單晶矽材料常數

彈性常數(GPa)	熱膨脹係數(ppm/K)	密度(g/m ³)	泊松比
$E_x = 169$	3.6	2.33	$\nu_{yz} = 0.36$
$E_y = 169$			$\nu_{zx} = 0.28$
$E_z = 130$			$\nu_{xy} = 0.064$
$G_{yz} = 79.6$			
$G_{zx} = 79.6$			
$G_{xy} = 50.9$			

表 2-3 多晶矽材料常數

彈性常數(GPa)	熱膨脹係(ppm/K)	密度(g/m ³)	泊松比
160	2.6	2.33	0.28

表 2-4 氮化矽材料常數(PECVD)

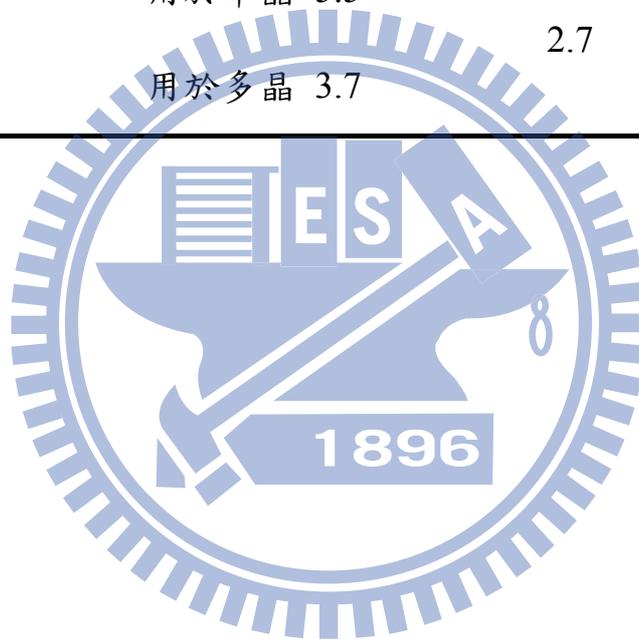
彈性常數(GPa)	熱膨脹係數(ppm/K)	密度(g/m ³)	泊松比
168	2.6	2.7	0.23

表 2-5 金屬電極材料常數

彈性常數(GPa)	熱膨脹係數(ppm/K)	密度(g/m^3)	泊松比
72	18.9	10.5	0.28

表 2-6 鋁漿材料常數

彈性常數(GPa)	熱膨脹係數(ppm/K)	密度(g/m^3)	泊松比
43	用於單晶 5.5	2.7	0.35
	用於多晶 3.7		



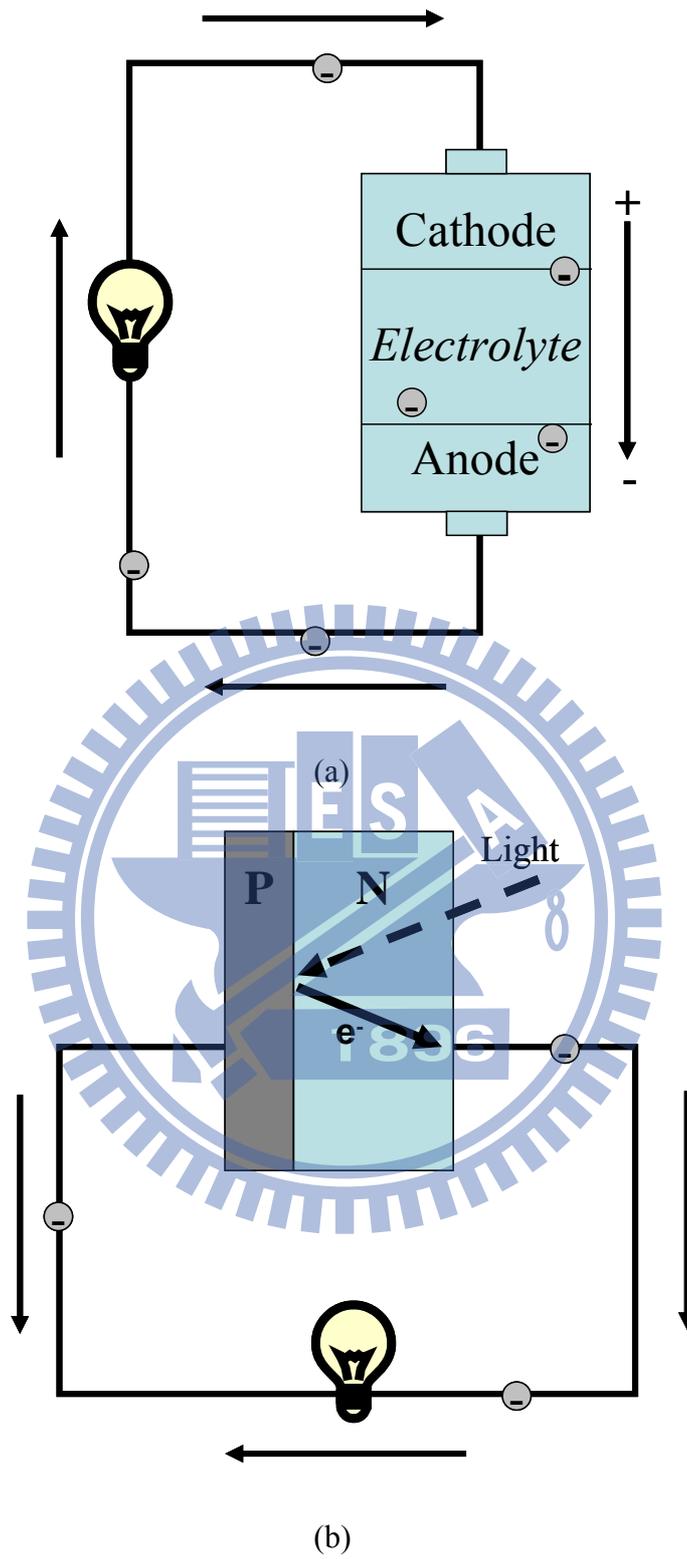


圖 2.1 發電系統比較：(a)化學反應電池、(b)太陽能電池

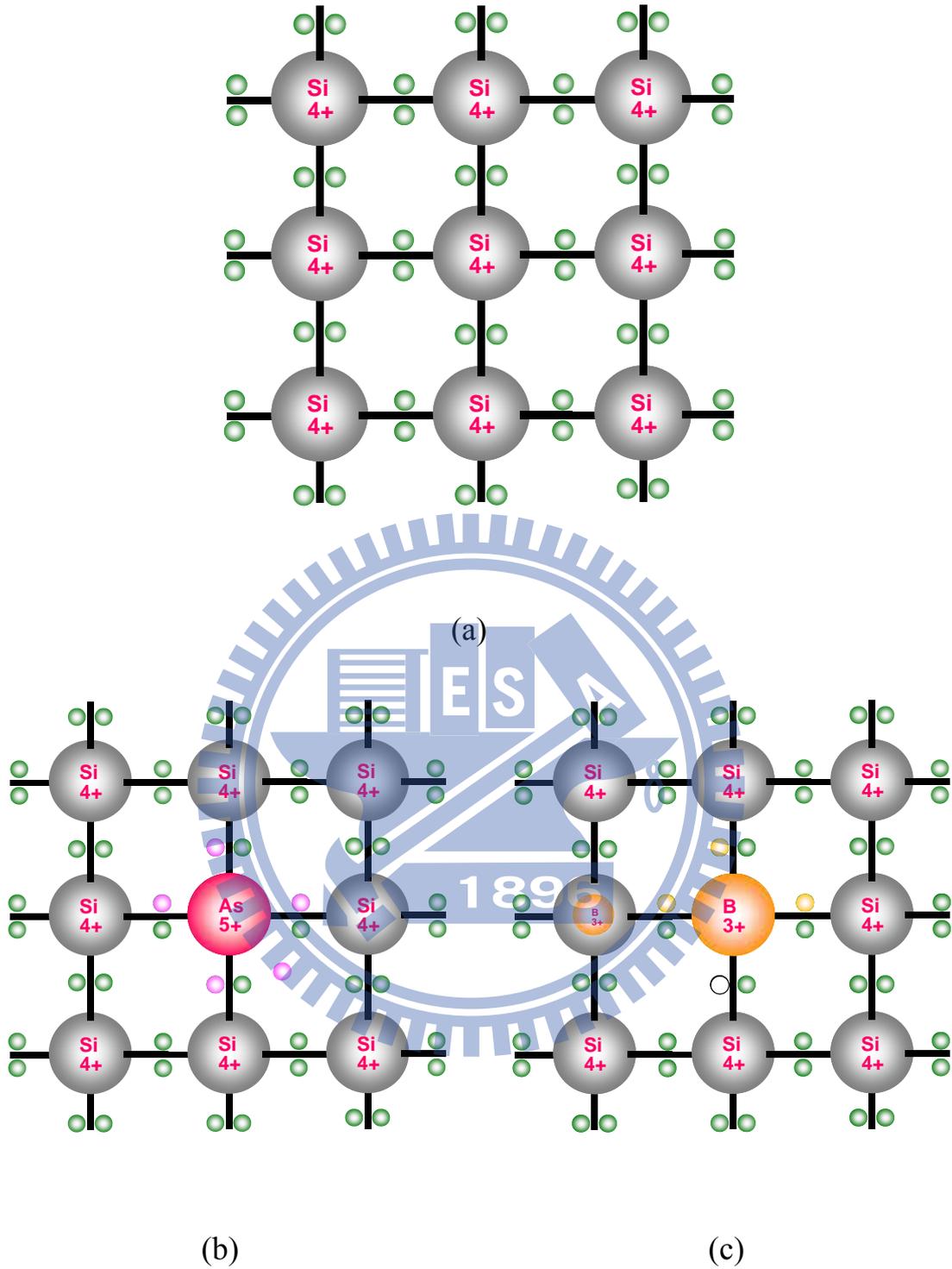


圖 2.2 二維空間的原子鍵結示意圖：(a)在室溫下，具有完整共價鍵的純矽晶體、(b) n 型半導體、(c) p 型半導體，圖(c)中的空心圓代表電洞

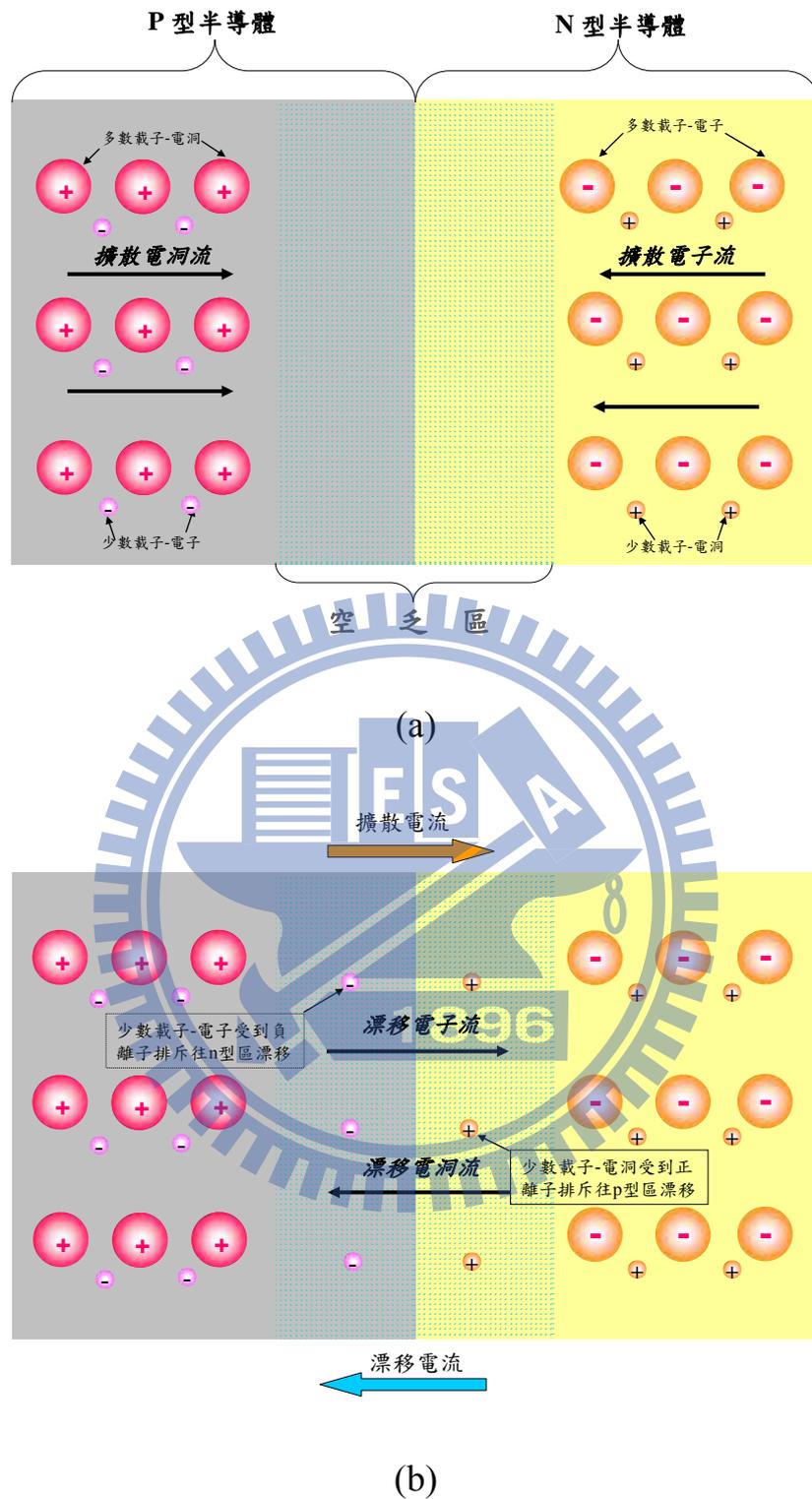
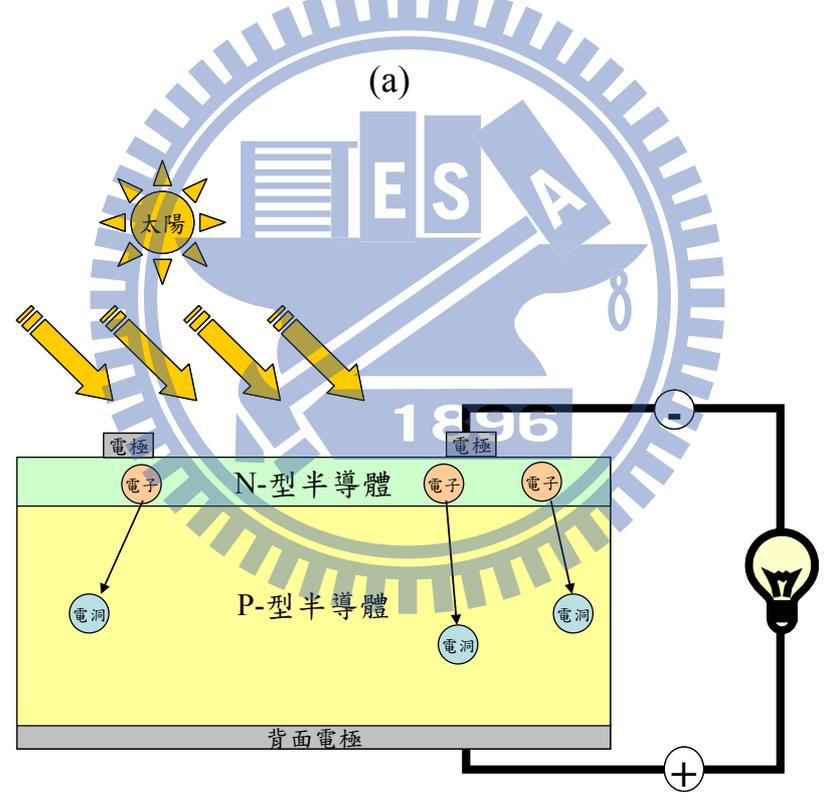
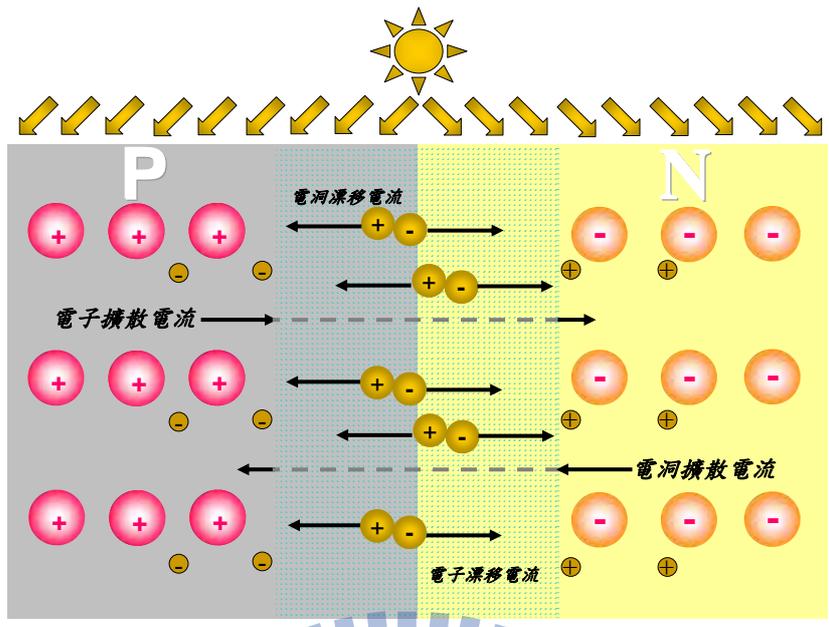


圖 2.3 (a) P-N 接點，在接合區附近形成一個空乏區，區域內只有施體與受體的正負離子，沒有自由載子，(b)P-N 接合區中的漂移及擴散電流示意圖。



(b)

圖 2.4 太陽能電池光電流產生及發電示意圖，(a)光子在空乏區中產生的漂移電流及 PN 半導體中產生的擴散電流；(b)光電流經由電極及導線至外接負載。

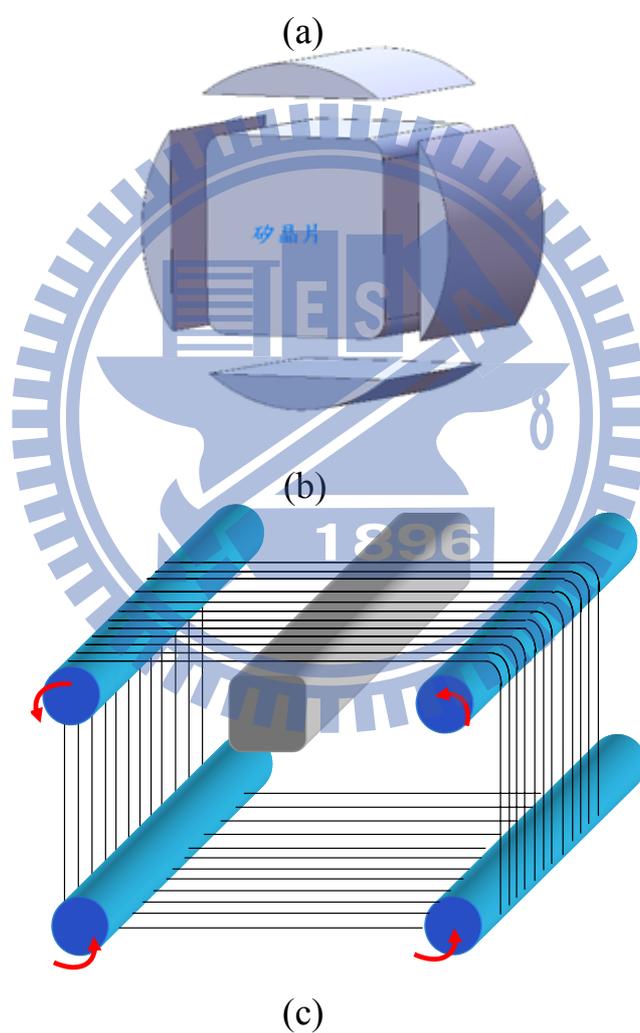
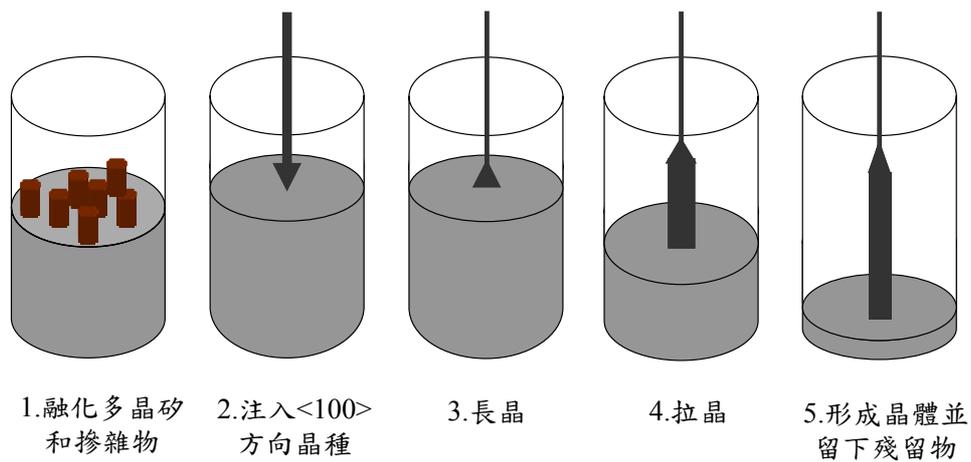
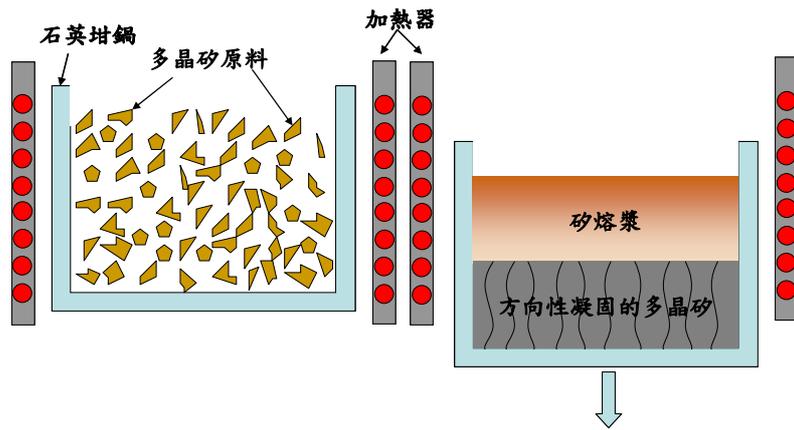
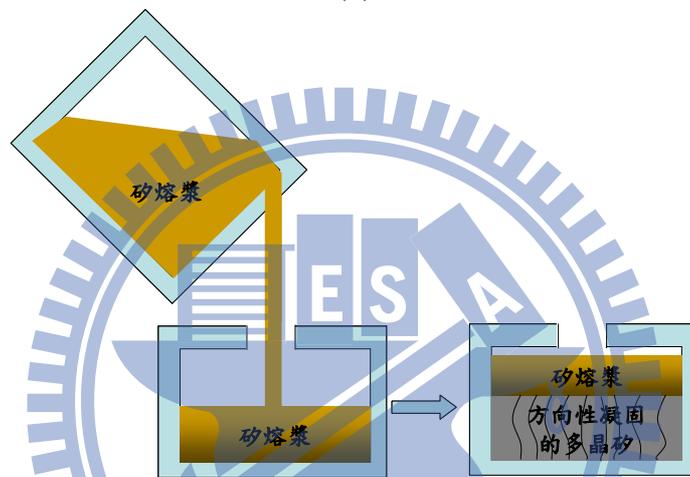


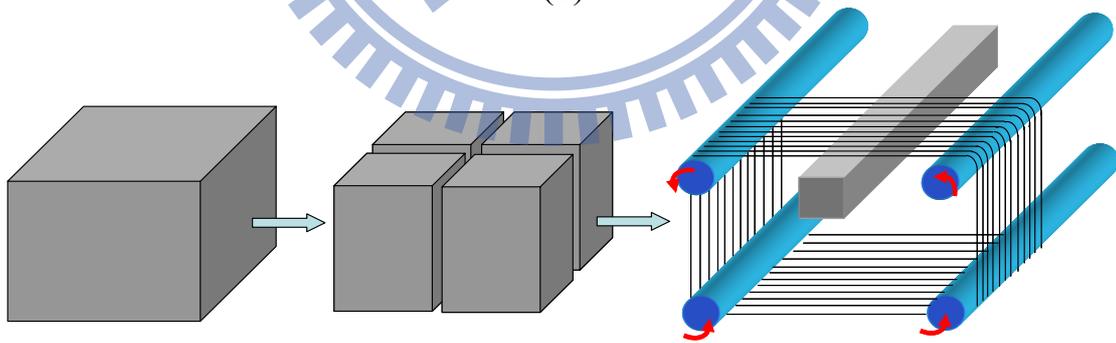
圖 2.5 單晶矽晶片製作流程：(a) CZ 拉晶流程示意圖、(b)切邊、(c)線切割切片。



(a)

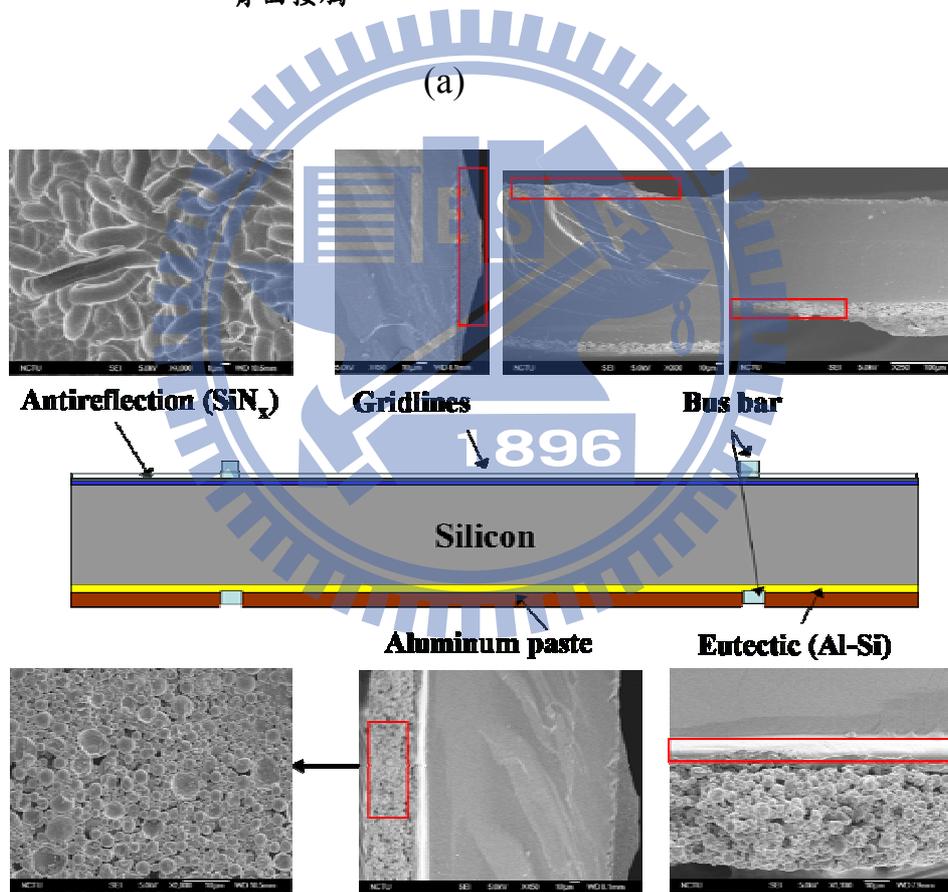
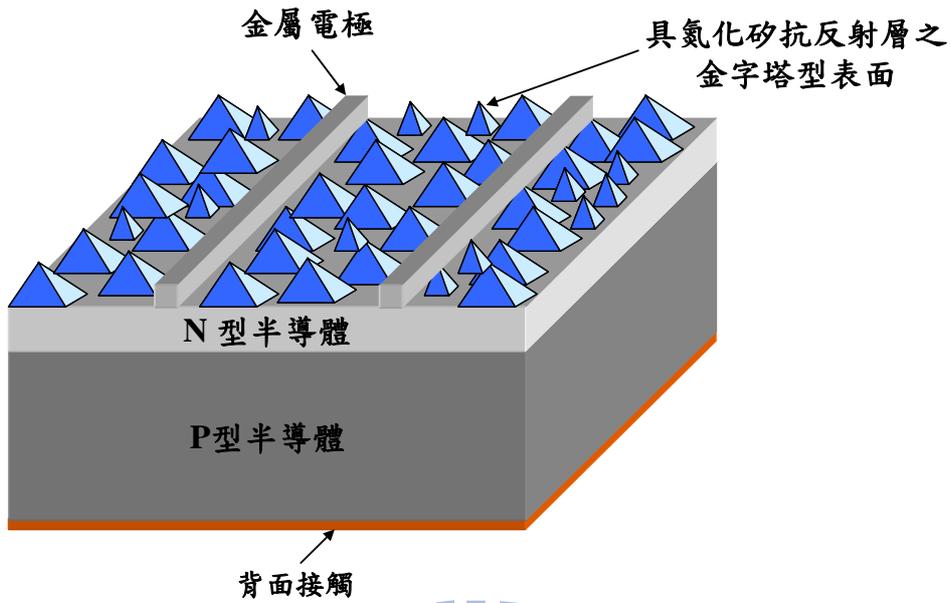


(b)



(c)

圖 2.6 多晶矽長晶方法示意圖，(a)坩鍋下降法：將多晶矽原料置於石英坩鍋，熔化後將石英坩鍋下降冷卻；(b)澆鑄法：當多晶矽原料熔化後，將矽熔漿倒入另一方形石英坩鍋中。



(b)

圖 2.7 太陽能電池之基本構造；P-N 型半導體、抗反射層、金屬電極、背面接觸，(a)外觀圖、(b)及各結構剖面的 SEM 圖。

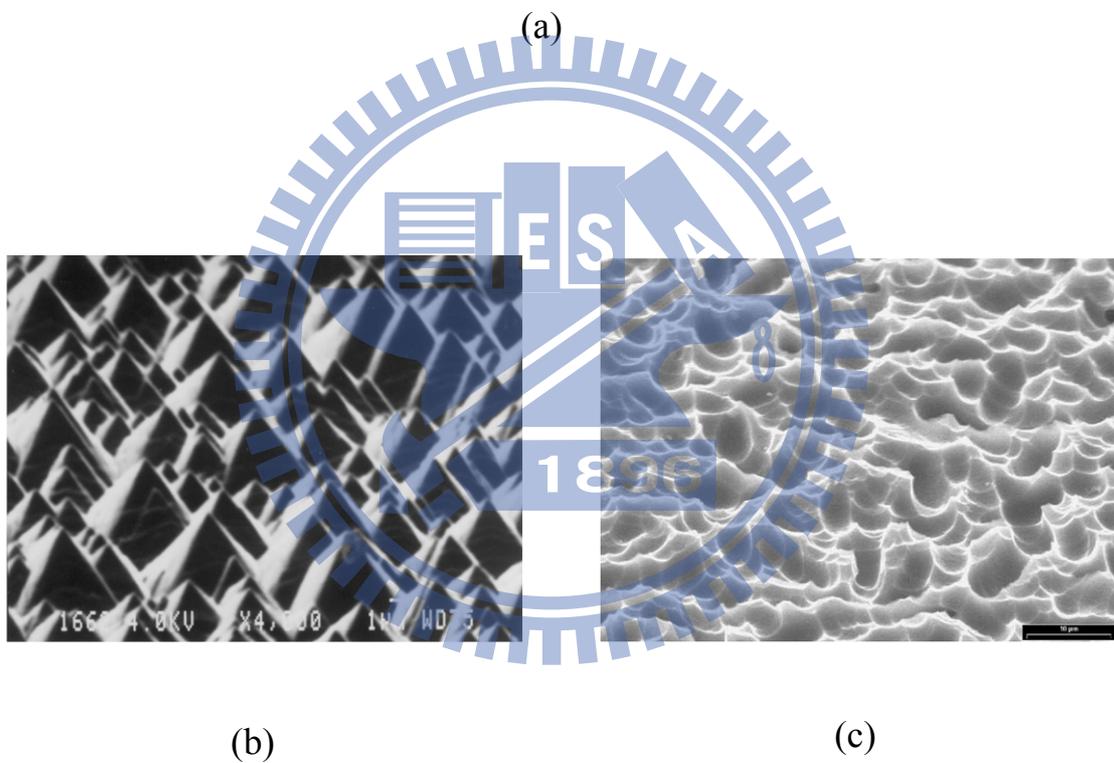
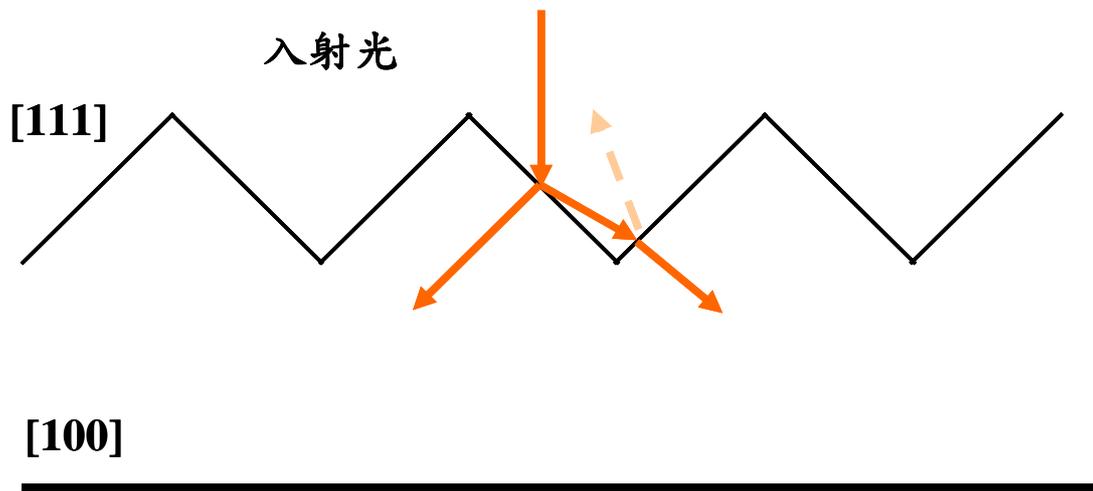


圖 2.8 矽晶片表面粗化結構，(a)利用表面粗糙結構降低入射光反射，用以增加入射光子的吸收率，(b)單晶矽晶片上規律的金字塔粗糙結構[61]，(c)多晶矽晶片上無規律的表面粗糙結構[60]。

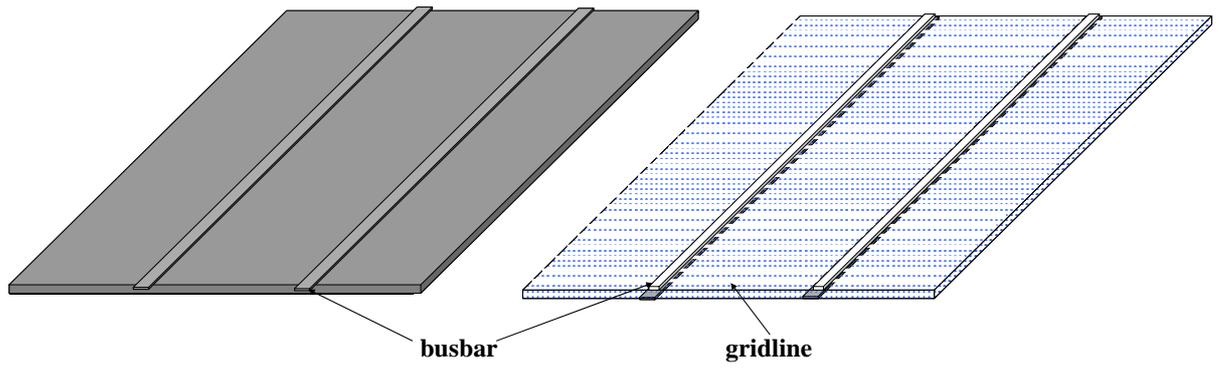


圖 2.9 太陽能電池上的電極，包括 busbar 與 gridline 兩種結構。

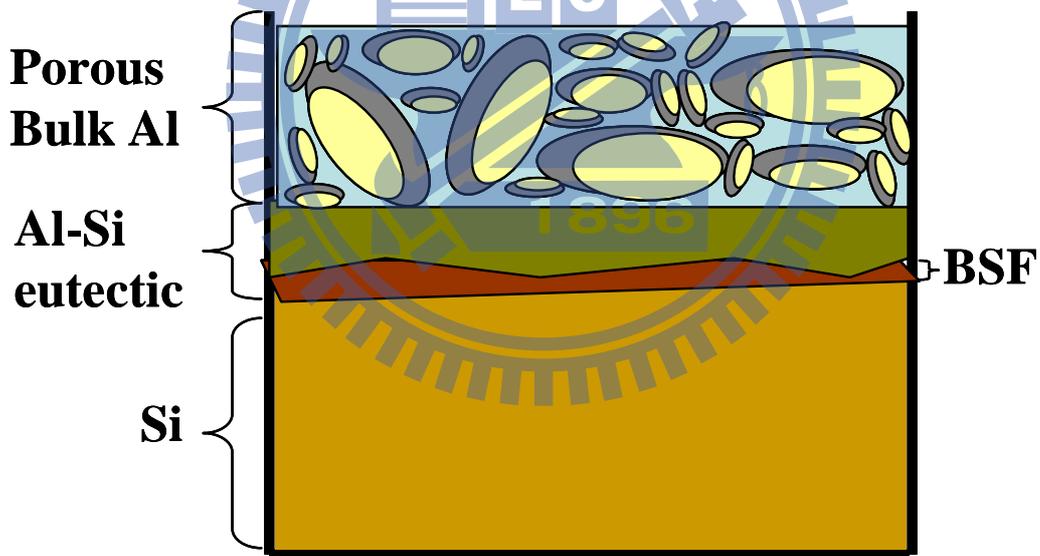
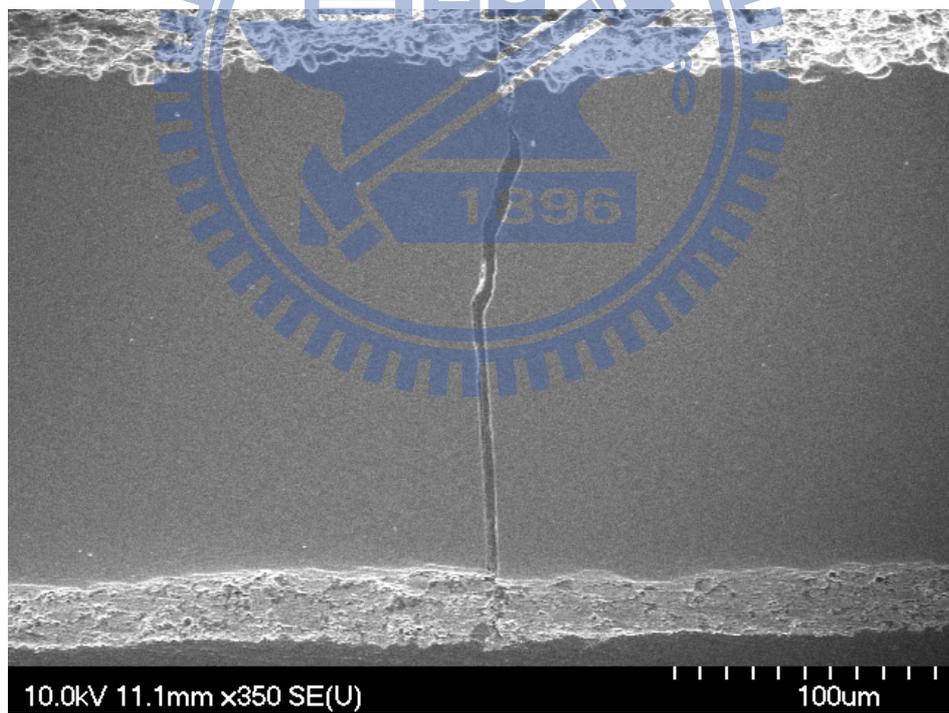
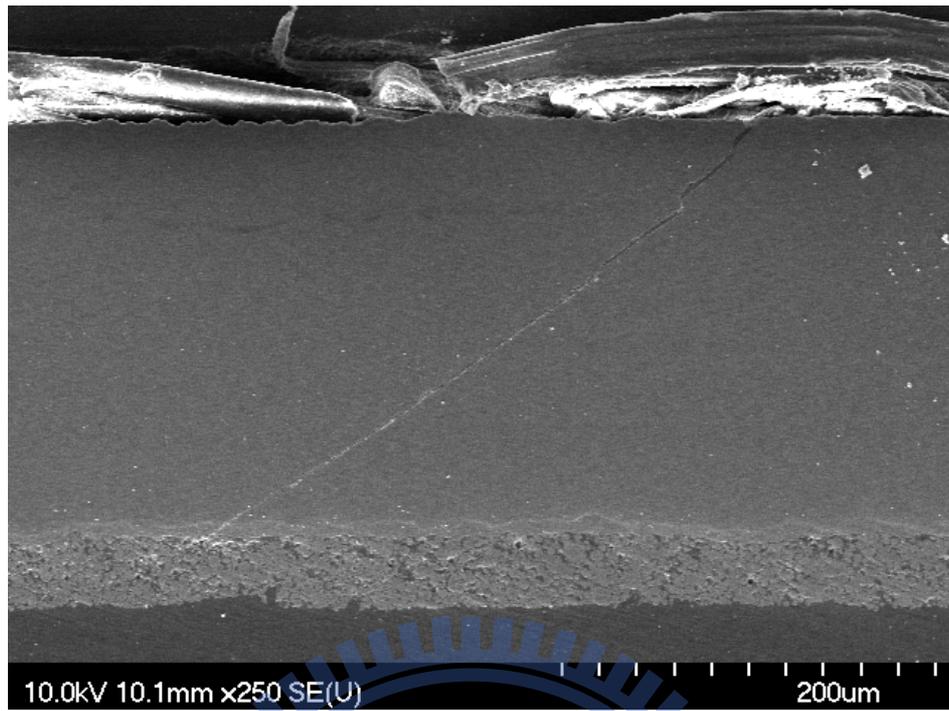


圖 2.10 形成背面電場的鋁漿與太陽能電池固化後的結構示意圖，包含共晶結構及多孔性鋁合金。



(b)

圖 2.11 太陽能電池剖面圖，(a)單晶矽、(b)多晶矽裂縫從抗反層開始延伸至矽-鋁共晶結構停止或轉彎。

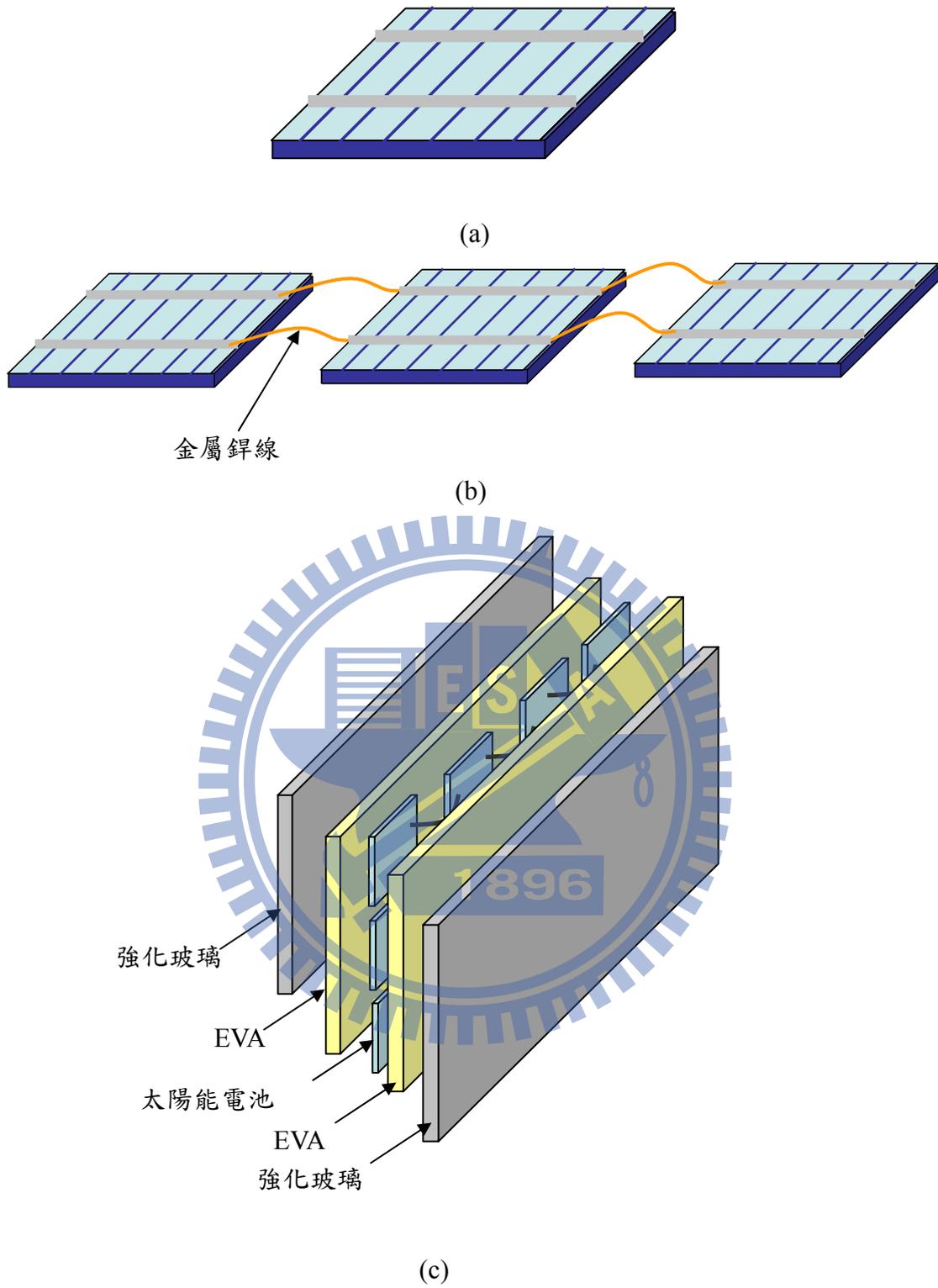
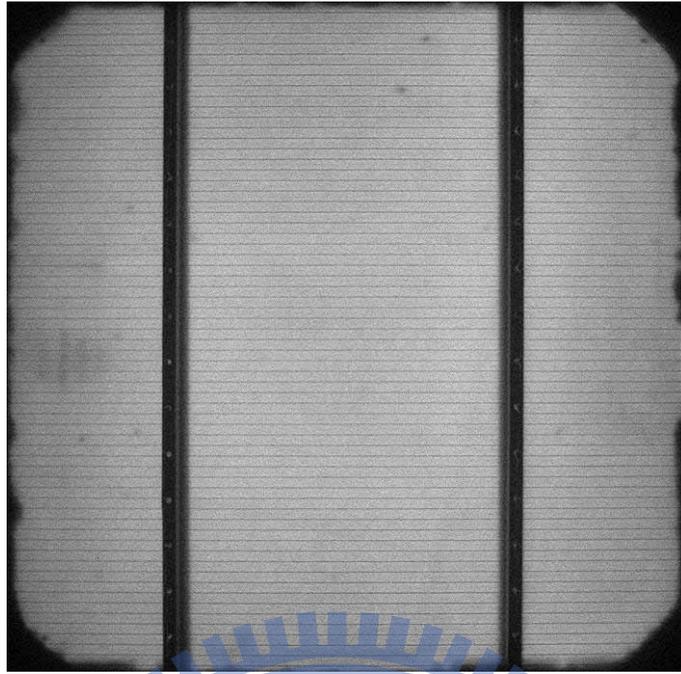


圖 2.12 太陽能電池串接示意圖：(a)單一太陽能電池、(b)太陽能電池之串接，(c)太陽能電池模組示



(a)



(b)

圖 2.13 矽晶太陽能電池 EL 照片：(a)單晶矽、(b)多晶矽

第三章 研究方法及可行性評估

太陽能電池的正、反面電極與矽材料的熱膨脹係數不同，太陽能電池受熱時會發生彎曲變形。倘若電池存有裂縫或缺陷，將會在裂縫面兩側產生不連續的變形。本研究應用此力學特性作為偵測太陽能電池是否存在裂縫缺陷的依據，檢測系統的開發程序如圖 3.1 所示。本章說明以有限元素法(Finite element method, FEM)數值模擬太陽能電池的熱變形，檢測實驗的架設與結果則分別於第四及第五章說明。

透過數值模擬分析，可瞭解太陽能電池受熱變的位移分量大小，選擇以太陽能電池的面外或面內變形位移作為 ESPI 的量測標的，與實驗試片近似的邊界及負荷條件的模擬結果亦可作為實驗結果的比較參考。數值模擬除了與實驗相同探討位於試片邊緣及內部的兩種缺陷，並依照缺陷的深度區分為貫穿、非貫穿裂縫與表面刮傷三種情形，在相同加熱溫度下比較模擬結果的差異。最後，本章應用破壞力學分析探討太陽能電池裂縫深度的穩定性。

3.1 太陽能電池的熱變形

太陽能電池結構類似於薄的複和材料層板，參考 Zehnder 等人[79]在 2005 年所提出的研究，若薄板有破壞存在，受到彎曲、扭曲等作用時，產生的面外方向變形會比面內變形明顯。太陽能電池受熱而產生變形的過程中，由於正反面電極的銀材料，背面的鋁材料層與結晶矽的熱膨脹係數不同，造成電池發生明顯的彎曲變形，面外方向會有較大的位移變化量。

太陽能電池由幾種不同的材料所構成，與主要成分的矽晶片相

比，無論在材料尺寸或是力學行為都不同，即使電池沒有或破壞缺陷，於加熱過程發生的熱變形也比矽晶片複雜，若僅使用單一材料矽晶片作為模擬分析的對象，簡略的力學分析將無法與太陽能電池試片檢測實驗獲得的光斑干涉條紋分佈比較。為求數值模擬變形的模型更準確，本研究採用有限元素法，數值分析有、無裂縫之太陽能電池的熱變形。

3.2 太陽能電池缺陷種類

進行太陽能電池缺陷檢測前，先將不同形式的裂縫缺陷之實驗數據或特徵，作為檢測系統的資料庫。未來進行太陽能電池即時檢測時，除可判斷是否存在缺陷，並可判別其種類及型式。

因應降低矽材成本的殷切需求，結晶矽太陽能電池的厚度越來越薄，大部分材料的缺陷來自於製程中的表面刮傷(scratch)，這些細微的刮傷經過後續繁複的製程之後，可能會成長為裂縫缺陷。由於矽晶與電池背面鋁層之間的矽鋁共晶，結構的破壞韌性大於氮化矽及結晶矽，裂縫在厚度方向的成長通常會止於在共晶結構，形成表面裂縫(surface crack)，如圖 2.11 所示，較少有貫穿型的裂縫(through crack)產生。甚至在貫穿裂縫的長度方向，接近裂縫尖端區域亦以表面裂縫與貫穿裂縫混合的形式呈現。所以本研究將太陽能電池上的缺陷依照貫穿深度的不同，分為表面刮傷、表面裂縫與貫穿裂縫三種，再依裂縫發生於電池的位置分為邊緣裂縫(edge crack)與內部裂縫(interior crack)。

3.3 有限元素法數值分析

在太陽能電池上製作人工裂縫時，很難控制裂縫的長度或深度。為進行裂縫偵測的可行性評估，本研究先藉數值模擬，獲得不同長度及深度之裂縫於太陽能電池模型的熱變形，作為實驗設計的依據。本研究以有限元素套裝軟體 ANSYS 作模擬分析，採用三維 8 節點等參 (isoparametric) 元素 Solid 45 建立模型，針對不同長度、位置、深度的裂縫，進行熱變形數值分析。

3.3.1 數值模型的建立

第二章提及矽晶太陽能電池分為多晶與單晶矽兩種，單晶矽的長晶方式與多晶矽不同，除晶片的外觀、尺寸與晶格排列的方式等都有差異，當晶格排列的方向不同時，會影響物體變形量的分佈，所以本研究中的模擬分析也將建立兩種不同的模型，尺寸大小皆為 6 吋 (156×156 mm)。雖然太陽能電池的結構大部分為矽材料，為增加模擬結果的準確度，數值模型除了矽材料之外，還包含電池正反兩面佈有供電流傳遞的電極，正面有一層增加陽光吸收的抗反射膜，反面則有鋁漿與作為背面接觸在建立太陽能電池模型前必須先實際量測所有材料的尺寸，並掌握較符合實際情形的材料常數。模型中的各材料尺寸設定皆透過金相實驗程序，由 SEM 照片量測獲得。矽材料層厚度為 170 μm ，鋁材料層厚度為 30 μm 。由於抗反射層及矽鋁共晶結構的厚度約只有 0.08-0.1 及 2.5-3 μm ，沒有建立於模型中，所建立的數值分析模型如圖 3.2 所示。太陽能電池模型在厚度方向使用 3 個元素 (element)，多晶矽及單晶矽電池的全部模型分別使用 115,806 及

152,772 個元素。現行太陽能電池所使用的矽材料，大都屬於次級料，相較晶圓廠所使用的 IC 等級矽晶圓，純度相差很多，數值計算使用文獻上的材料參數作為模型的材料係數(楊氏係數、密度、熱膨脹係數、蒲松比)，預期模擬的結果將與實驗會存有些許誤差，各材料參數如表 2-2 至 2-6 所列。

3.3.2 邊界條件

數值模擬及實驗中，太陽能電池熱變形的邊界條件主要作用是防止試片在變形過程有剛體運動(rigid body motion)發生，產生過大的變形量，使實驗中所拍攝的干涉條紋過密，導致無法辨識。當試片或模型在相同的負載下，熱變形的分佈會隨著邊界條件改變而不同，邊界條件的選擇以不讓模擬或實驗中產生剛體運動即可。本研究中曾討論以三種固定的方式作為邊界條件，第一種為太陽能電池的四邊緣皆固定，第二種為四邊緣中間區域($1.5 \times 1.5 \text{ mm}$)固定，第三種為四角落固定，圖 3.3 分別為三種固定方式示意圖、模擬結果及 ESPI 照片。當熱負載相同時，第一種邊界會使太陽能電池時產生較大的面外位移變化，但被固定的區域太多，較適合驗證方法時使用。第二種邊界條件比較適合面積較小的單晶矽太陽能電池，單晶矽太陽能電池的四角落已經切除，受熱時不會發生四角翹曲，熱變形的均勻性較好。第三種邊界由於固定區域較少，且將局部翹曲最嚴重的角落固定，實驗試片受熱彎曲變形的均勻性最好，所以後續實驗皆以此作為邊界條件。

3.3.3 無缺陷太陽能電池

無缺陷模型熱變形模擬之目的是為了提供一基準的應變分佈模

擬，包括物體個應變三方向(面外及兩種面內)的位移分量，此模擬可當作背景數據，與有損傷的模型作比較，未來也可與實驗所拍攝的光斑干涉圖形比對。太陽能電池熱變形的模擬結果可作為判斷面外或面內方向的光路架構何者較適合檢測實驗的依據，並可評估變形量是否超過實驗架構的量測範圍。圖 3.4 所示分別為多晶矽及單晶矽受熱增溫 0.4 (32.4-32)的各方向位移分佈圖(單位為釐米)。圖中顯示面外位移的變化量大於面內位移，尤其在邊緣區域。圖 3.5 所示為太陽能電池模型升溫 1 時 X、Y、Z 三方向位移變化量的模擬結果，圖中顯示隨著溫度上升，熱變形所造成的 Z 方向淨位移量大於 X 及 Y 方向，多晶矽模型的熱變形量在三方向皆大於單晶矽，符合文獻[53]中對於多晶矽與單晶矽材料常數的差異。太陽能電池熱變形的模擬結果與 ESPI 之干涉條紋數量與位移對應，後者的面外及面內擷取影像，中，亮紋的間隔分別為 $\lambda/\sin 2\theta$ 及 $\lambda/2\sin \theta$ 。若量測系統採用的半導體綠光雷射 $\lambda=532\text{ nm}$ ，量測系統中的 θ 為 45° ，則位移量增分別為 266 nm 及 376 nm。如果實驗中使用像素為 5M (2048×2050) CCD 相機，在加熱溫度 0.2 間隔之內即可清楚拍出在面外方向干涉條紋；而在面內的 X 及 Y 方向，則必須至少 1°C 以上，才有可能拍攝到干涉條紋，條紋數過少則無法表現溫度的改變所造成位移的變化。綜合上述，可推測本研究方法量測太陽能電池熱變形之面外位移比面內位移適合。

3.3.4 含缺陷太陽能電池

太陽能電池上有許多金屬電極的分佈，使得三維有限元素分析模型較複雜些，若欲在模型上建立裂縫，較簡易的作法可先由二維的模

型著手，再經由延展(extend)的方式建立三維裂縫模型。建立二維裂縫的方式是先將兩相連結之面積的共用邊刪除，於原先的共用邊上重新建立二條直線(line)，在這兩線上除裂縫端點外的每一個點(point)皆建立兩個節點(node)，兩相鄰面積僅靠一(邊緣裂縫)或兩個點(內部裂縫)或節點連結，使得該線段兩側的節點與元素(element)皆不相連，在未加任何負荷的狀況下，裂縫保持直線狀態，若施予適當的負荷，裂縫即呈現開口形狀，如圖 3.6 所示。非貫穿型的裂縫是利用二維模型沿厚度方向往三維模型，裂縫深度到達預定的程度時，將裂縫面封閉後，才繼續延展該區域體積，即可完成非貫穿試片的裂縫模型。依照太陽能電池模型四分之一對稱形式，模擬裂縫方向主要以兩種形式作討論，多晶矽材料的晶格排列無特定方向，模擬裂縫延展的方向僅以水平或垂直方式呈現；單晶矽材料上的裂縫延展則沿著 45° 方向建立，如圖 3.7 所示。除了以上討論的裂縫之外，太陽能電池上經常出現一些表面刮傷，此類型缺陷的表面積通常比裂縫大，深度通常較小。表面有刮傷時，會使 P 型或 N 型半導體暴露於空氣中，而使小微塵的堆積在此區域，進而影響傳導電流，對太陽能電池的電性會有些微的影響，然而，此缺陷卻不會造成完全性的破壞。在模擬分析中，表面刮傷的模型建立是刪除太陽能電池模型上表面的部分元素。

模擬太陽能電池上的缺陷時，依照貫穿深度的不同，分為表面刮傷(scratch)、表面裂縫(surface crack)與貫穿裂縫(through crack)三種，圖 3.7(c)為三種缺陷於厚度方向的截面示意圖。其中，表面刮傷設定長度為 25 mm、寬度 0.6 mm、深度 0.01 mm，位於矽材料層上表面或鋁材料層下表面。表面裂縫定義為在深度方向貫穿整個矽材料層，即裂縫初始的位置在矽材料層的上表面，裂縫尖端位於矽鋁共晶界面層。貫穿裂縫則定義為裂縫深度等於矽材料層加上鋁材料層，即完全

貫穿整個太陽能電池模型，裂縫初始的位置與表面裂縫一樣在矽材料層上表面，裂縫尖端位置則在鋁材料層的下表面。若裂縫發生的位置恰於電極上，裂縫也將貫穿電極。圖 3.8 顯示長度同為 25 mm 的三種缺陷及無缺陷的多晶矽太陽能電池模型受熱增溫 0.4°C ($32\text{-}32.4^{\circ}\text{C}$) 後，面外位移變化的模擬結果比較，圖中等高線間隔設定與實驗上的干涉條紋間隔一樣為 266 nm。圖中可清楚觀察到，在三種缺陷表面刮傷、表面裂縫及貫穿裂縫周圍的等高線特徵分別為連續、V 形狀及斷裂三種，與圖 3.8(a) 中無缺陷的模型比較起來，除表面刮傷之外，其餘兩種缺陷的模型經過加熱之後，非常容易被辨認出。由受熱之面外位移的模擬結果，可以判斷太陽能電池是否有裂縫存在，以下將進一步探討上述兩種加熱後會造成明顯特徵的裂縫。

在貫穿裂縫的太陽能電池模擬中，模型受熱後的面外位移等高線，在裂縫兩側呈現斷裂，且數目不相等，如圖 3.8(d) 所示，此特徵是由於裂縫面兩側之外位移不相等所致，所以在分析結果中，裂縫面上的每一個節點皆有兩個位移值。圖 3.9 顯示裂縫兩側不同加熱溫度間隔下的面外位移模擬結果，圖中橫座標的原點為裂縫初始的位置，終點則代表裂縫尖端位置。圖 3.9(a) 的結果為一特別情形，當裂縫面位置恰於模型中央，使模擬的模型在裂縫面上恰形成對稱 (symmetric)，雖然兩面外位移於裂縫兩側的一次微分不連續，但兩側的位移值會相等，亦即模擬結果的每一個分析節點會有兩個相同的面外位移值。除在模型正中央的位置之外，其餘任何位置的裂縫面均勻受熱變形則是非對稱的情形，貫穿型裂縫的裂縫面兩側都會有不連續的面外位移值產生，如圖 3.9(b) 所示。

具表面裂縫之太陽能電池模擬的結果中，不同於貫穿裂縫的位移場在裂縫兩側呈現非對稱情形，面外位移在裂縫面上每個位置皆只有

單一數值，亦即位移等高線不會有斷裂的情形。圖 3.10 顯示表面裂縫在與上述貫穿裂縫在相同受熱條件下的面外位移，圖中顯示裂縫面上每一個節點皆只對應一個位移值，且不論在模型中央或其他位置皆是相同情形。由於裂縫會影響位移的連續性，所以在裂縫處的等高線會出現 V 形輪廓，類似 chevron 的形狀，如圖 3.8(c)所示。在表面裂縫模擬結果所出現的這種特別輪廓，其彎曲的角度會隨著裂縫的深度而改變，利用位移分佈圖是否出現 V 形輪廓可作為判別表面裂縫的依據，預期裂縫深度將會影響該檢測特徵，此部分將留在第五章實驗結果詳細討論。

圖 3.11 為上述兩種裂縫在裂縫面上的位移變化與無裂縫模型的比較，各模型受熱增溫條件都為 0.4°C ($32-32.4^{\circ}\text{C}$)，圖中長 25 mm 的表面裂縫與無裂縫的位移變化相差接近 $1.5\ \mu\text{m}$ ，若以同等於 ESPI 量測系統中干涉條紋間隔所代表的位移量 266 nm 估算，有表面裂縫的模型將比無裂縫的多出 5-6 條位移等高線，而貫穿型裂縫亦會較後者多出 3-4 條，圖 3.8(a)無裂縫的模型於電池左緣中央向內延伸 25mm 的區域約有 7-8 條等高位移線。上述兩種裂縫會使等高線數目多出原有的 50-60%，使裂縫區域的等高線數目明顯增加。

3.4 裂縫成長的穩定性評估

進行上述模擬分析時，表面裂縫的深度設定為貫穿整個矽材料層且停止於鋁材料層，這是由於矽材料的破壞韌性遠小於鋁矽共晶結構，一旦太陽能電池中有表面裂縫形成，裂縫於深度方向容易成長至矽-鋁共晶結構，但不易繼續成長，貫穿整片電池。實驗上以冷鑲埋方式製作裂縫截面的試片，於顯微鏡下觀察裂縫在深度方向的特徵，

大都是屬於未貫穿太陽能電池整體的表面裂縫，深度恰等於矽材料層，所以進行模擬分析時沒有針對不同深度的裂縫做細部討論。雖然太陽能電池的裂縫是否延展及成長等破壞行為，並不是本研究的主題，惟本研究仍根據破壞力學的理论，對於裂縫在太陽能電池厚度方向的成長進行穩定性分析，簡略討論表面裂縫的破壞行為。

本節將以破壞力學理論配合有限元素法分析，考慮微小的溫度變化及太陽能電池本身自重兩種負載，計算裂縫尖端的應力強度因子，並說明發生於矽材料的表面裂縫處於一個不穩定的狀態，證明假設表面裂縫的深度等於整個矽材料層厚度的合理性，而較少機會有小於的情形。

3.4.1 破壞分析與判斷準則

當彈性體上存有一裂縫並承受負載時，裂縫尖端的應力場或裂縫的變形可以三種形式表示，分別為開口模式(open mode)、滑移模式(sliding mode)及撕裂模式(tearing mode)，前兩者屬於面內破壞(in-plane fracture)，後者為面外破壞(out-of-plane fracture)。裂縫尖端附近的應力相當複雜，應用線彈性理論所推導得到裂縫尖端的應力公式，可計算裂縫尖端的應力強度因子。參考圖 3.12 所示， r 與 θ 為以裂縫尖端為原點之極座標系統， θ 代表場點及裂縫尖端連線與裂縫面的水平夾角考慮一含有裂縫的二維彈性體，承受面內負載，其裂縫尖端($r \rightarrow 0$)的應力強度因子(stress intensity factor, SIF)可表示為[80]

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{\sin\theta}{2} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (3-7a)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{\sin\theta}{2} \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (3-7b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{\sin\theta}{2} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (3-7c)$$

其中， K_I 及 K_{II} 為第一與第二模式的裂縫尖端強度因子。若場點位於裂縫尖端的前緣，即 $\theta \approx 0$ ，可將(3-7)式簡化，並整理為

$$K_I \rightarrow \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (3-8a)$$

$$K_{II} \rightarrow \tau_{xy} \sqrt{2\pi r} \quad (3-8b)$$

當 K_I 與 K_{II} 分別大於應力強度因子臨界值或稱破壞韌性 K_{IC} 及 K_{IIC} ，裂縫即處於不穩定狀態，會發生延展。倘若裂縫尖端的應力強度因子隨著裂縫成長而增加，稱之為不穩定裂縫成長，若隨著裂縫成長而降低，則稱之為穩定裂縫成長。數值模擬不同深度或長度的裂縫受到相同負荷，由裂縫尖端應力強度因子值的變化，可判斷裂縫的成長屬於穩定或不穩定階段。

3.4.2 裂縫應力強度因子計算與穩定性討論

本研究有關太陽能電池裂縫在深度方向成長的穩定性分析，是在太陽能電池深度方向橫切面建立二維裂縫模型，分析微小溫度變化及自重負載施加於模型引致的應力場。分析模型中使用八節點 plane 82 元素，元素上每個節點僅有 x、y 兩個方向的位移自由度，裂縫周圍的節點與元素如圖 3.13 所示。二維裂縫的建模方式與 3.3.1 節所述相同，裂縫模型中靠近裂縫尖端的之元素邊長為 $1 \mu\text{m}$ ，整體裂縫截面

示意圖及分析模型之裂縫尖端的局部放大如圖 3.14 所示。在裂縫應力強度因子的計算中，為求數值解的準確性，紀錄裂縫尖端前方五個節點之應力值(間距皆為 $0.5 \mu\text{m}$)，除去其中差異較大的數值，代入(3-8)式並予以平均，再依序計算不同深度之裂縫尖端應力強度因子，整理可獲得裂縫於深度與應力強度因子的關係。最後與矽材料的破壞韌性值比較，判別裂縫成長的穩定性。倘若應力強度因子相對於裂縫深度的梯度大於零，一旦應力強度因子超越矽材料的破壞韌性值，裂縫延展會持續發生，稱為不穩定裂縫。反之，裂縫延展會停頓稱為穩定裂縫。

在溫度變化的負載中，分別計算溫度從室溫 25 變化 0.2、0.4 與 0.6 三種情形的應力強度因子，即模擬裂縫於一般環境下受溫度變化的影響，並將裂縫發生的位置假設為位於模型邊緣的中央及四分之一處。模擬結果如圖 3.15 所示，圖中顯示當裂縫深度於超過整體模型厚度的 30% 之後，應力強度因子即大於多晶矽的破壞韌性 ($K_{IC} \approx 1.0 \text{MPa m}^{1/2}$)。此時，裂縫處於不穩定的狀態，會在深度方向持續成長直到矽-鋁共晶結構 ($K_{IC} \approx 80 \text{MPa m}^{1/2}$) 停止。事實上，太陽能電池於一般環境中，溫度的變化應大於上述模擬中所使用的溫度增量，且於 2.3.4 節中提到電池背面電場固化的過程，溫度變化更遠大於此情形。所以，若太陽能電池上有表面裂縫形成，裂縫在深度方向會持續成長至矽-鋁共晶結構，此結果亦說明於裂縫截面之 SEM 照片上觀察到的情形。另外，3.15(a)及(b)圖顯示儘管裂縫位於上述兩不同位置，應力強度因子卻幾乎相同的情形。這是當電池模型受均勻熱負載時，由於矽與鋁的熱膨脹係數的差異，模型產生純彎曲(pure bending)的變形，導致應力強度因子在不同位置有相同的數值。

在自重的模擬中，先以電子秤量測多晶矽太陽能電池的重量約為

12.7g，將此重量以均佈力(單位面積的受力 N/m^2)方式施加於模型上，以三點彎曲測試(three point bending test)做分析，模擬每片太陽能電池於工作吸盤運送過程所受的負載。圖 3.16 為裂縫位於模型邊緣的中央及四分之一處，受到自重影響，應力強度因子與裂縫深度比例的關係曲線。圖中顯示裂縫深度超過整體模型厚度的 10%時，裂縫尖端的應力強度因子即超過多晶矽的破壞韌性，與微小溫度負載的結果相似，裂縫的成長處於不穩定狀態，會在深度方向持續地成長。

最後，總結利用有限元素法模擬電池裂縫成長及熱變形的結果如下：

1. 可藉由面外位移等高線的分佈特徵作為辨別是否有裂縫的參考依據，貫穿型裂縫會使位移等高線於裂縫面位置產生斷裂的特徵，且兩側的數目不相等，表面裂縫則在裂縫處產生 V 形狀，類似 chevron 輪廓。
2. 當太陽能電池存在裂縫時，位移等高線的數目會比無裂縫情況多。
3. 當太陽能電池有表面裂縫形成，裂縫的成長處於一不穩定狀態，受到自重或溫度變化的影響，裂縫會持續往深度方向成長，至矽-鋁共晶結構才停止。
4. 合理預期本研究藉由比對及辨識面外 ESPI 實驗系統量測電池熱變形的干涉條紋，應有能力檢測出太陽能電池中具有風險的裂縫。

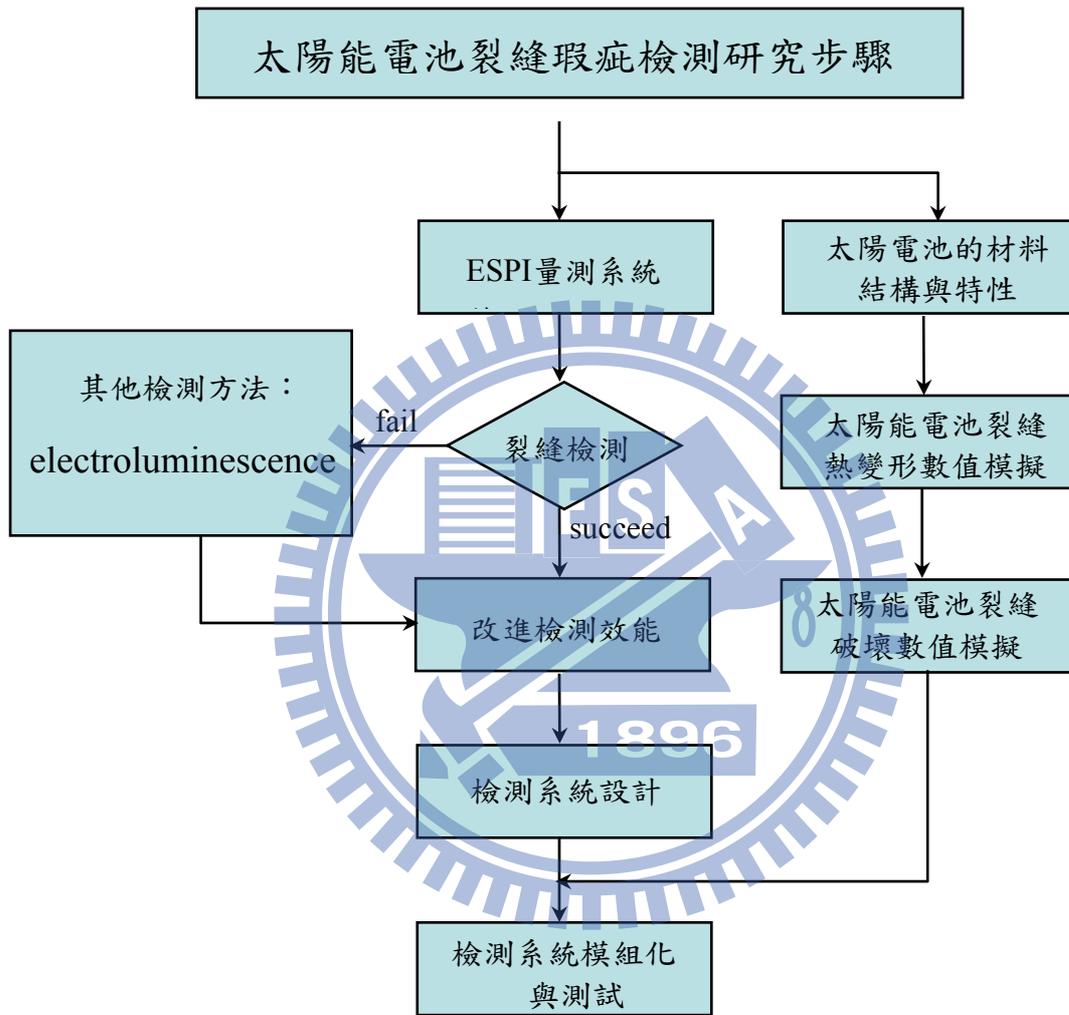
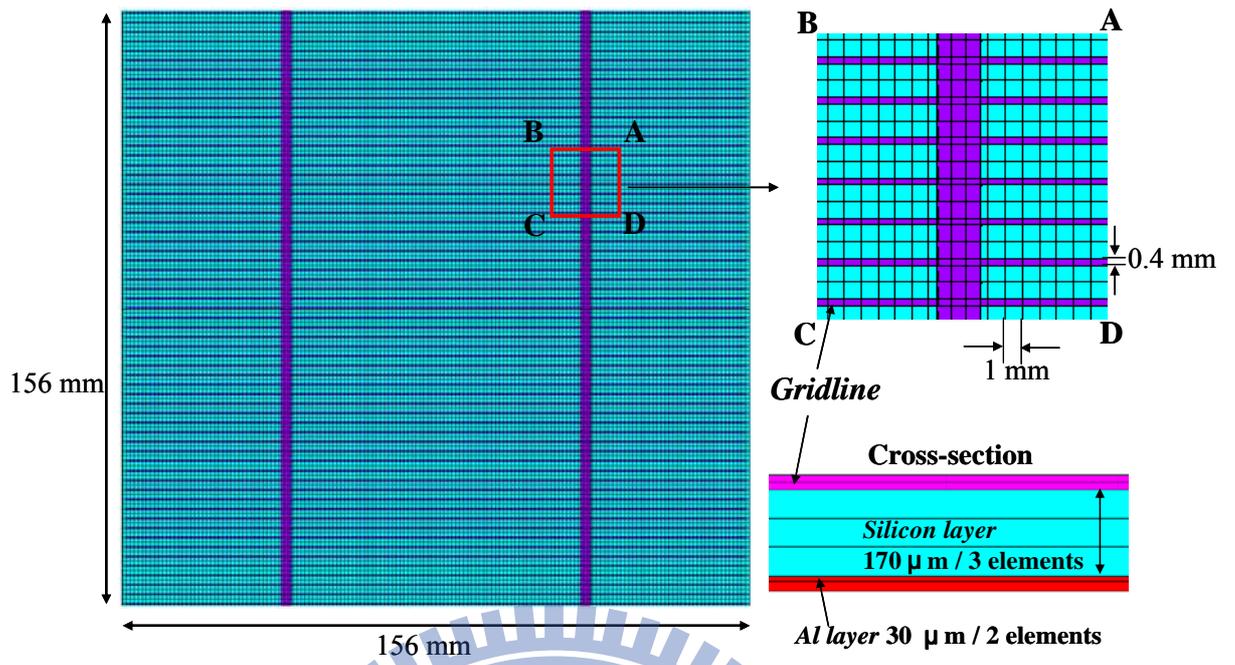
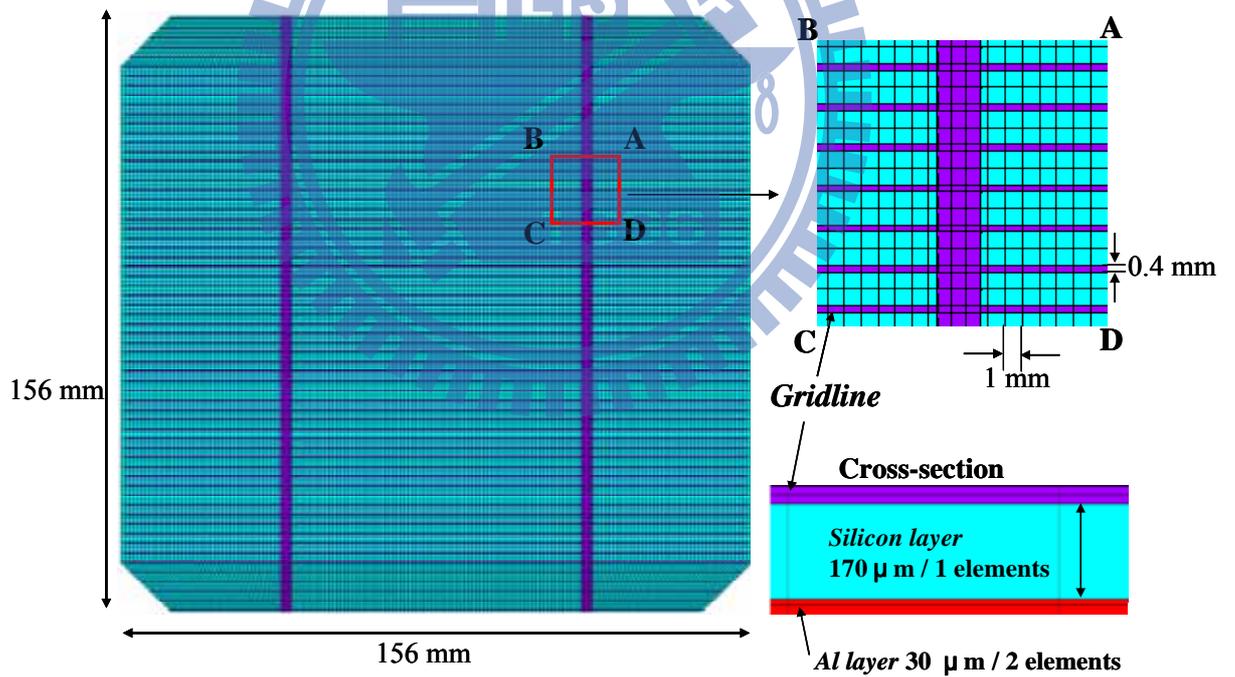


圖 3.1 研究方法流程圖



(a)



(b)

圖 3.2 有限元素法建立之太陽能電池分析模型：(a)多晶矽、(b)單晶矽。

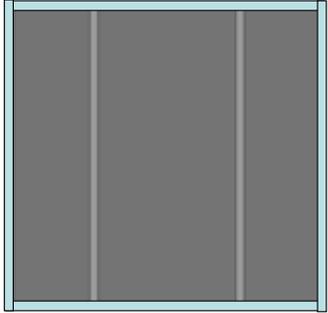
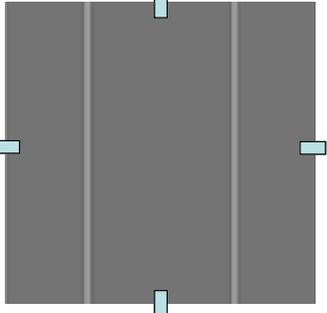
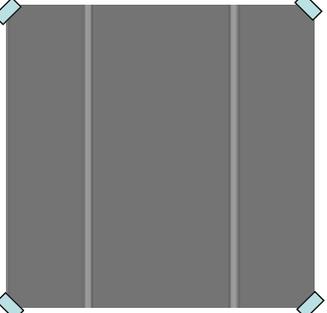
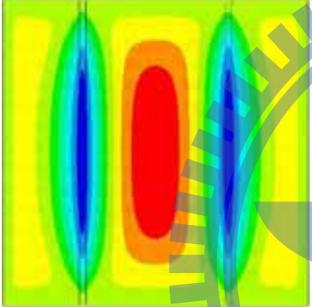
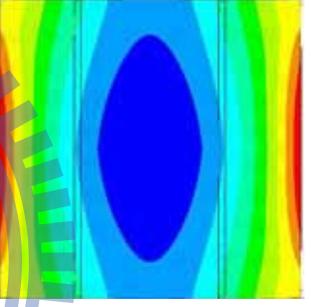
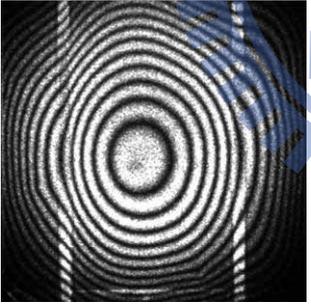
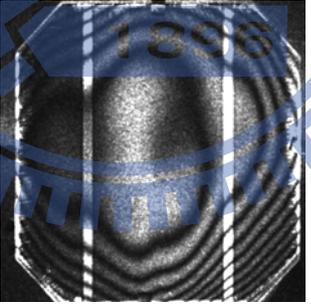
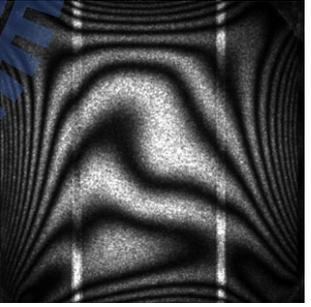
	(1)	(2)	(3)
邊 界 條 件			
模 擬			
實 驗			

圖 3.3 實驗中所使用的三種邊界條件

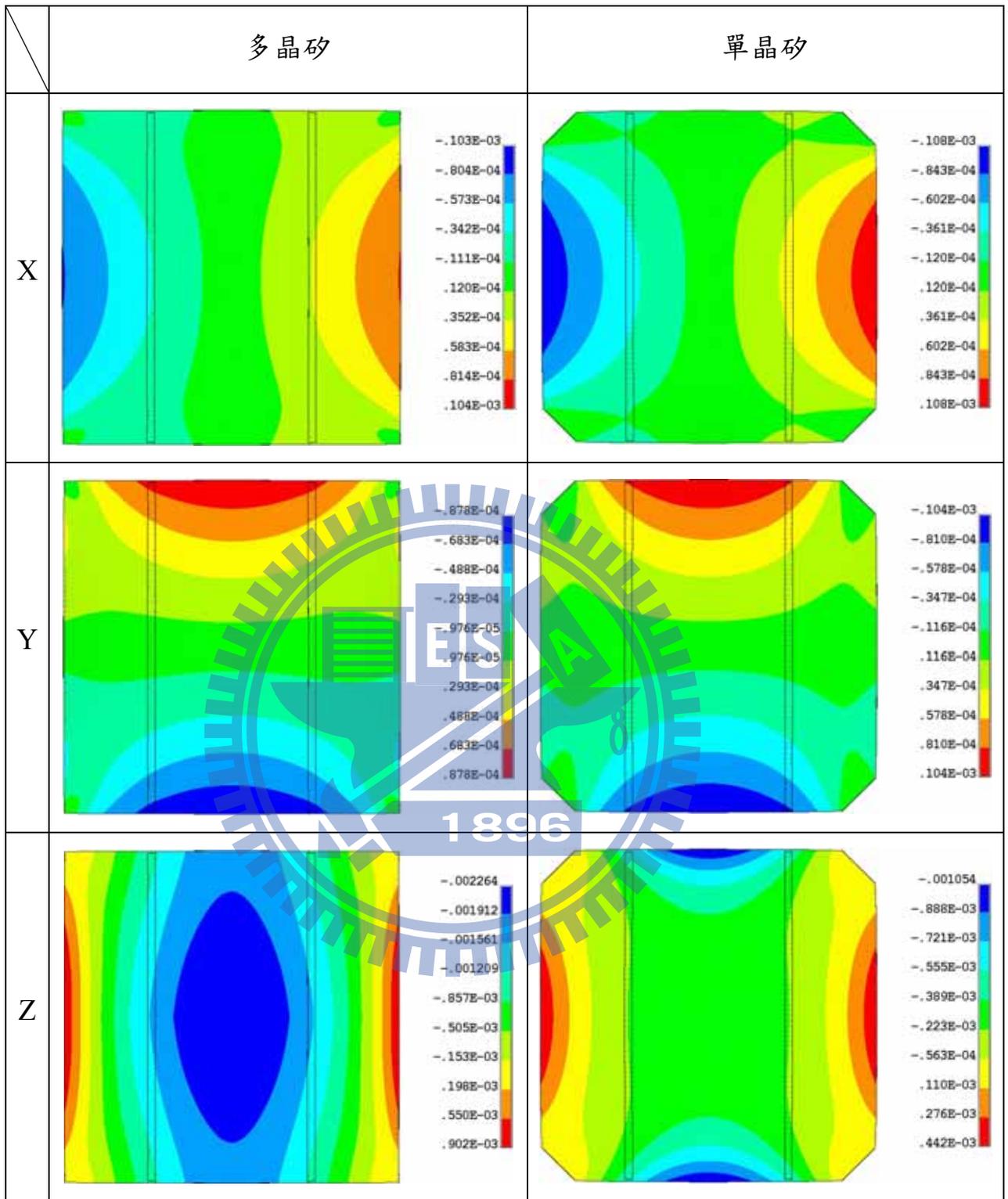
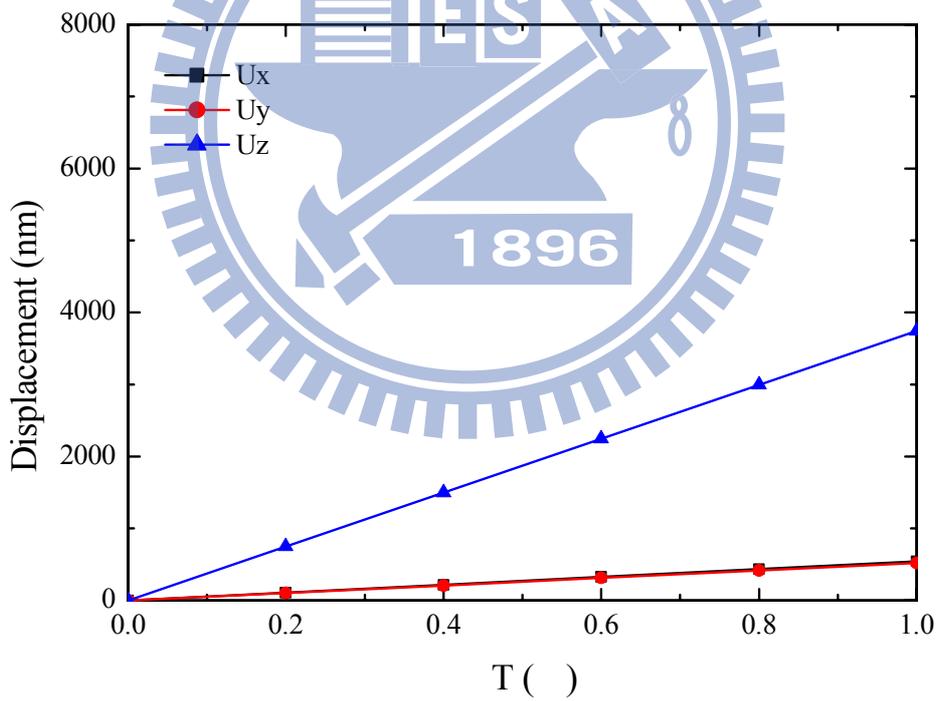
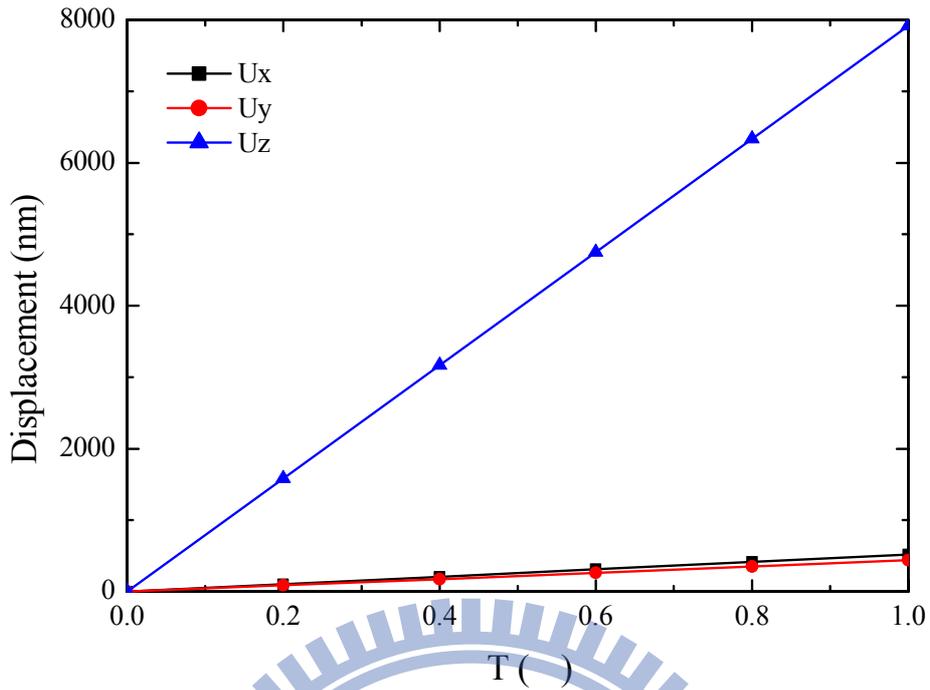


圖 3.4 太陽能電池模型升溫 0.4 (32.4-32)各方向位移分佈圖



(b)

圖 3.5 模擬太陽能電池受熱溫度與位移量關係圖:(a)多晶矽、(b)單晶矽。

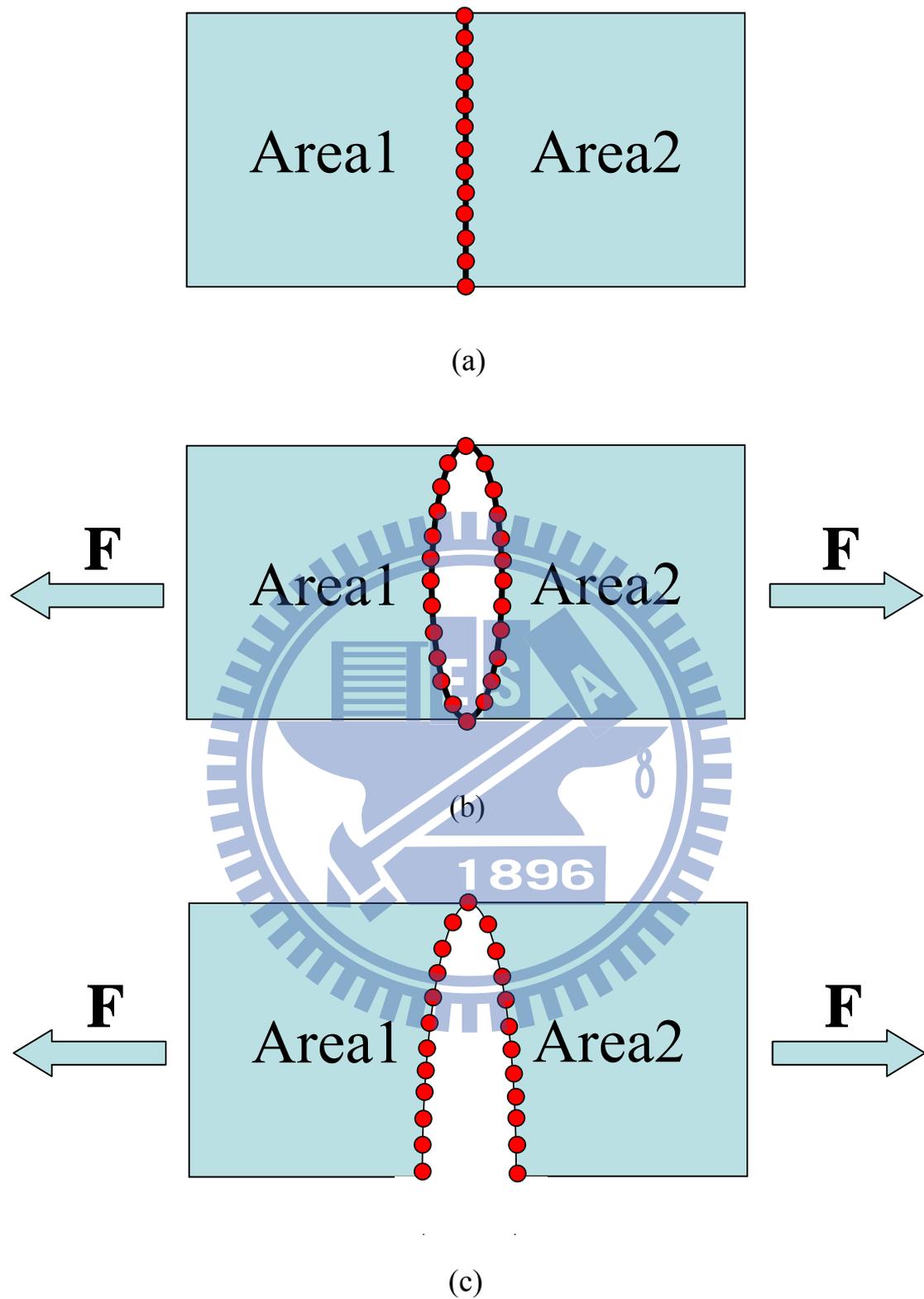
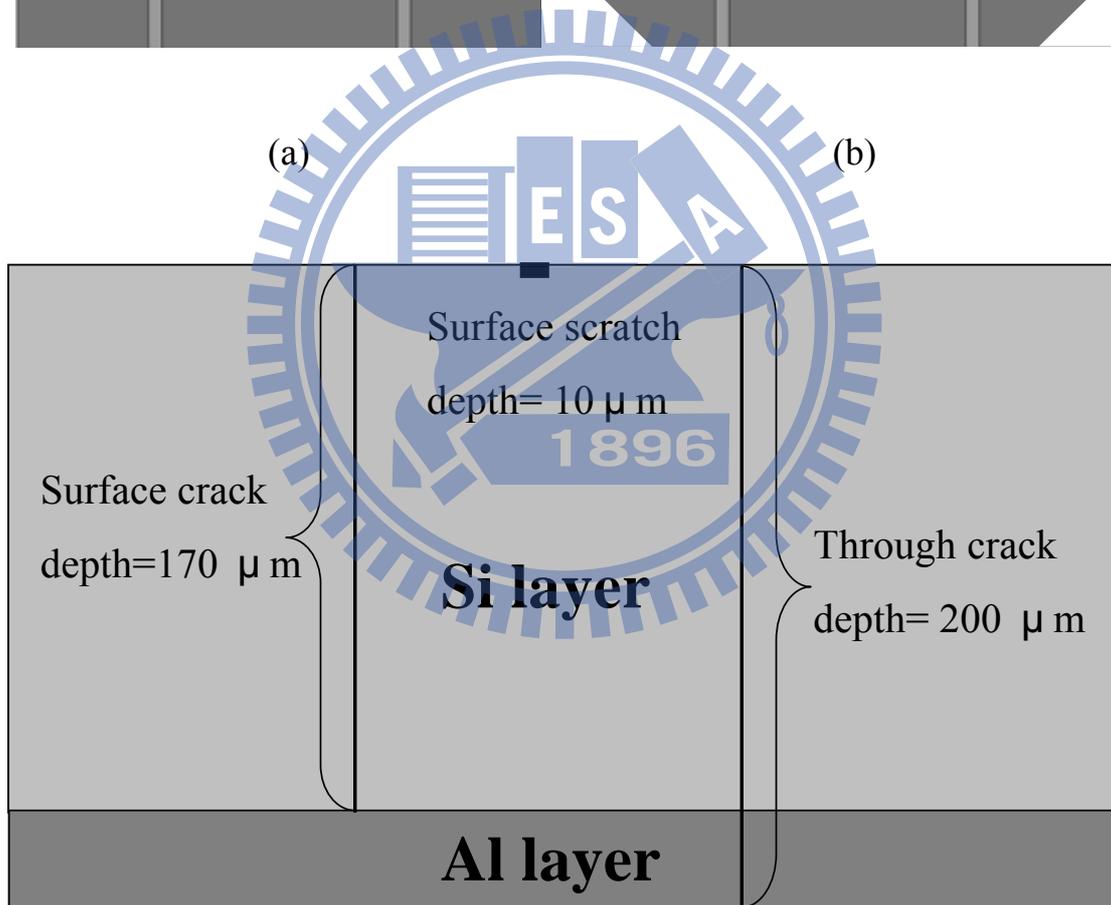
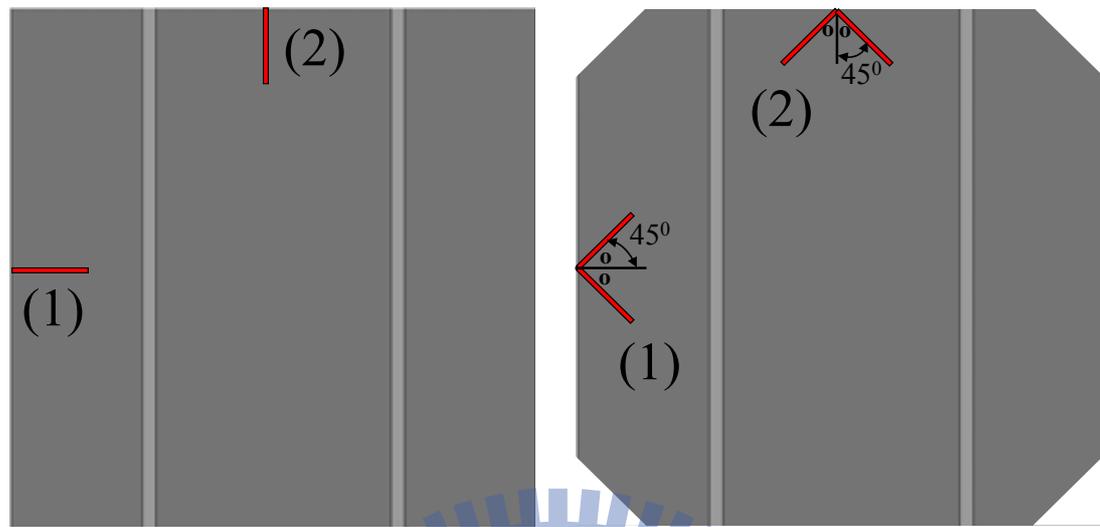


圖 3.6 裂縫模型示意圖。(a)未施加任何負荷，裂縫呈一直線狀態(b)施加負荷後，內部的裂縫產生開口狀態；(c)邊緣裂縫的形式。



(c)

圖 3.7 太陽能電池模型上裂縫的延展方向，(a)多晶矽、(b)單晶矽、
(c)三種缺陷於深度方向截面的示意圖。

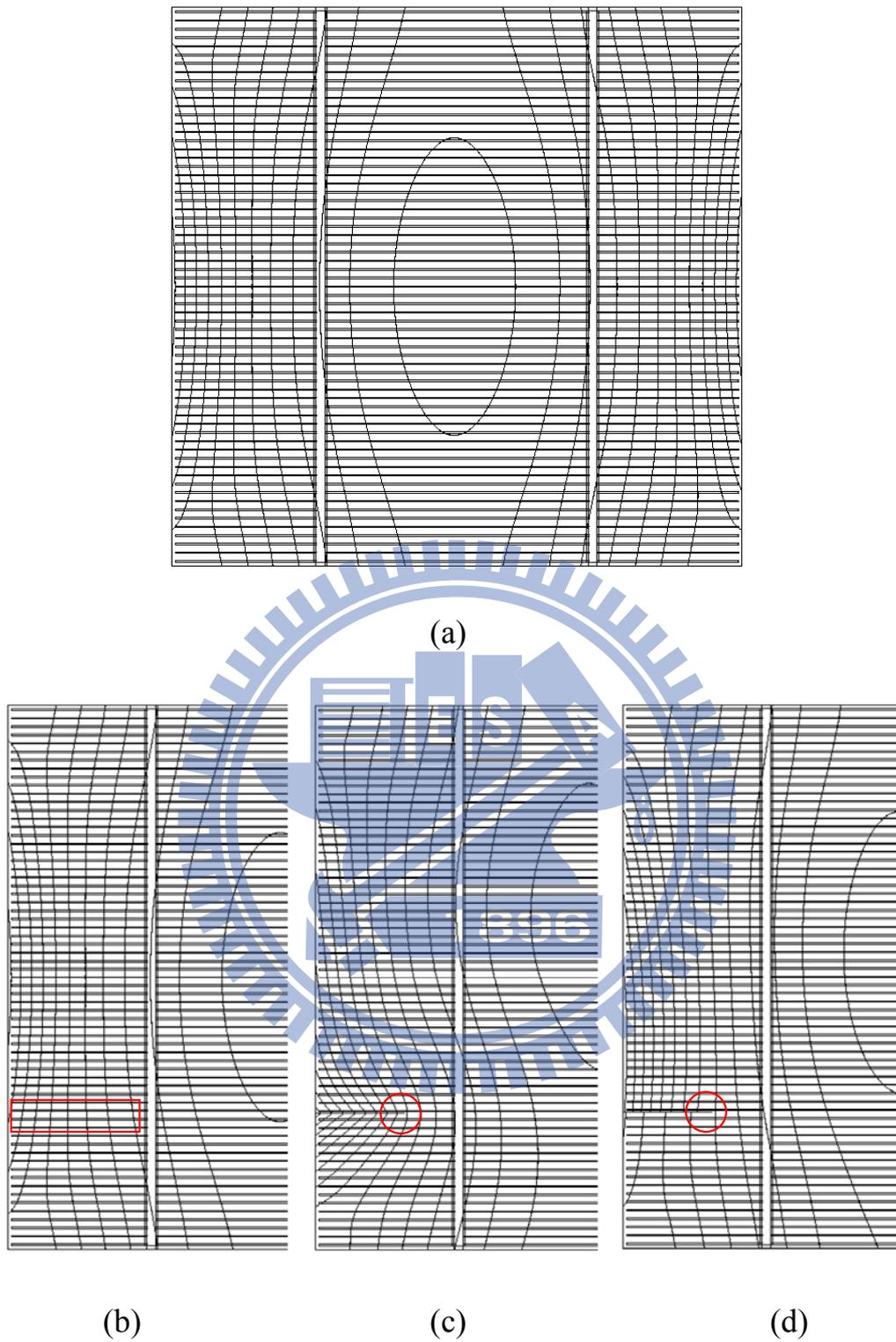
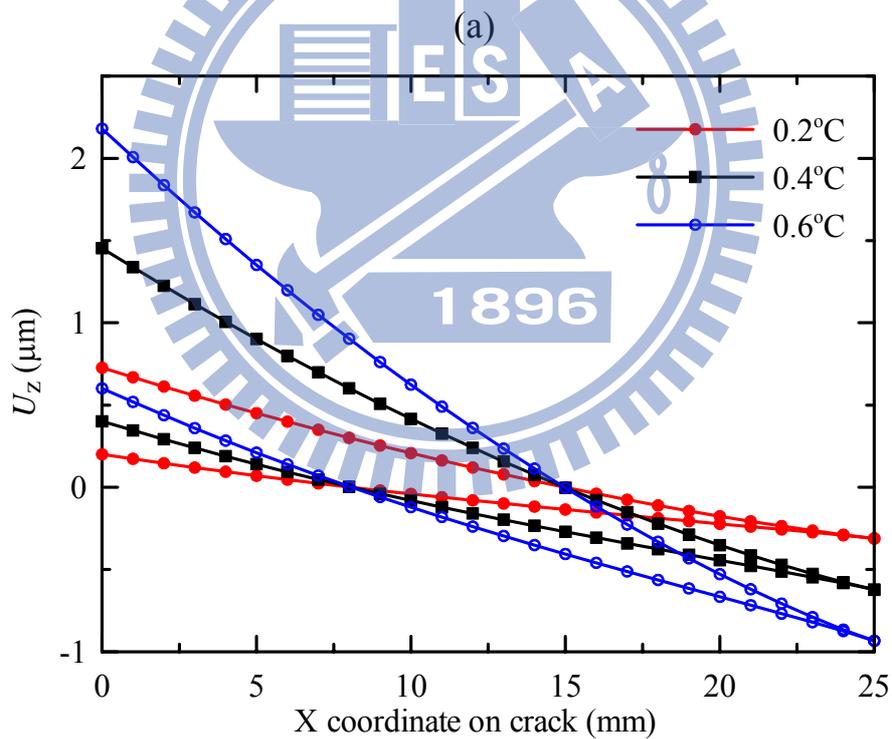
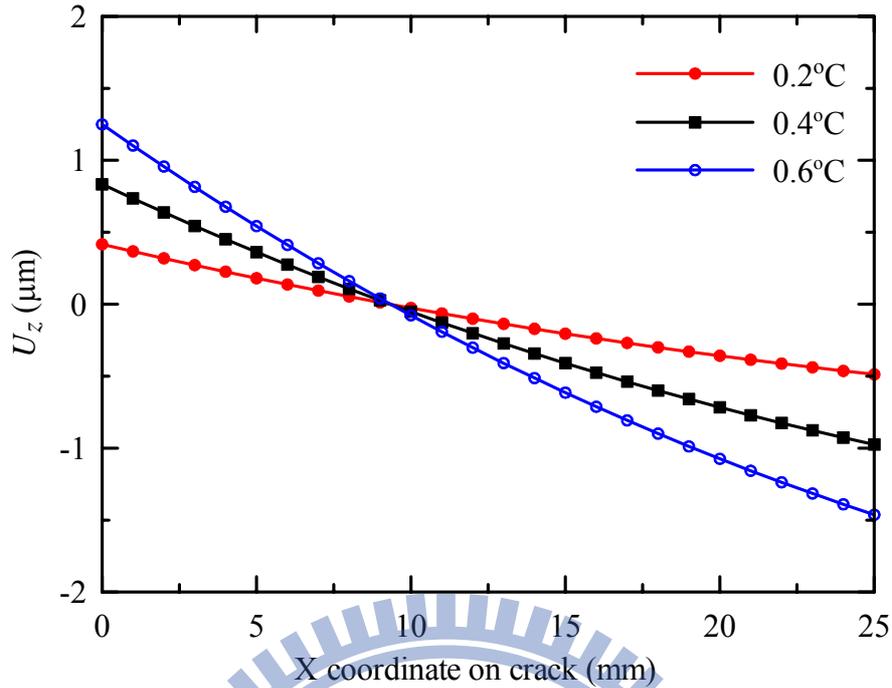
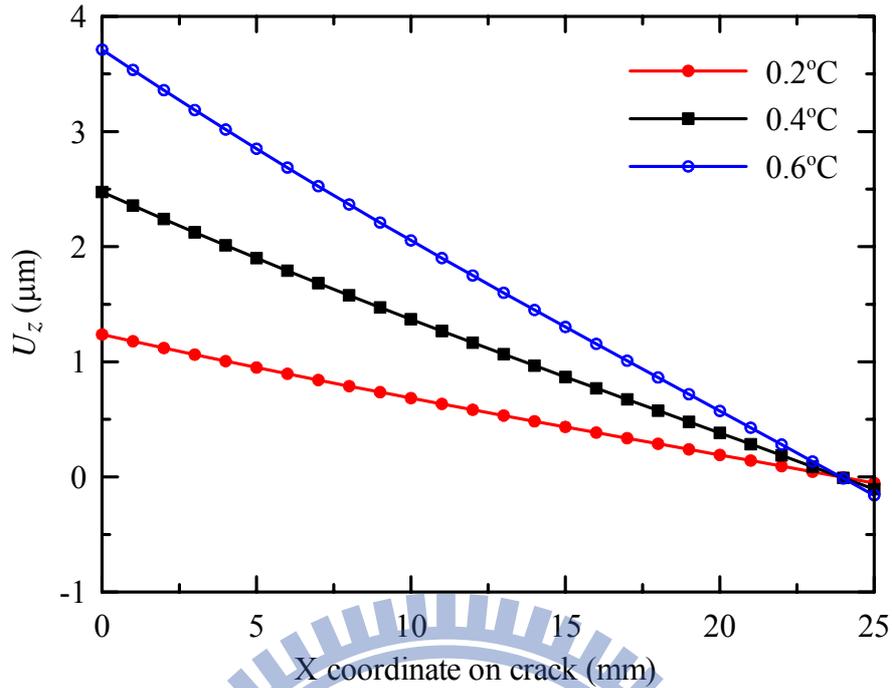


圖 3.8 比較三種典型缺陷與無缺陷之太陽能電池模型，缺陷位於模型左緣中央，向內延伸 25mm，模型受熱增溫 0.4 (32.4-32) 後所產生的面外位移的等高線，(a)無缺陷、(b)刮傷、(c)表面裂縫、(d)貫穿裂縫。

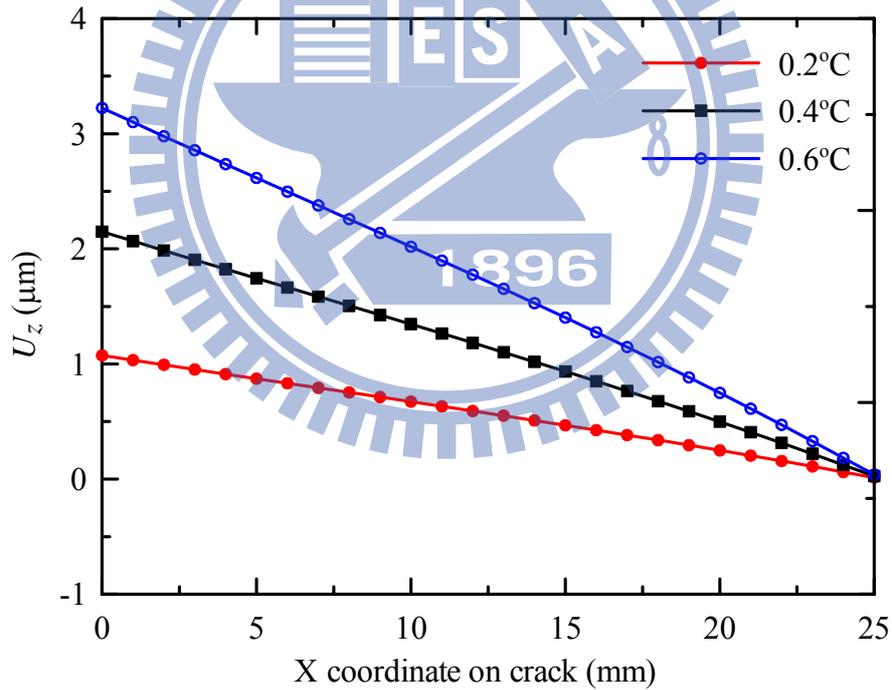


(b)

圖 3.9 模擬 25 mm 長的貫穿型裂縫於太陽能電池電池左側，於不同溫度間隔下，裂縫面上的面外方向變形。(a)裂縫位於中央、(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端。

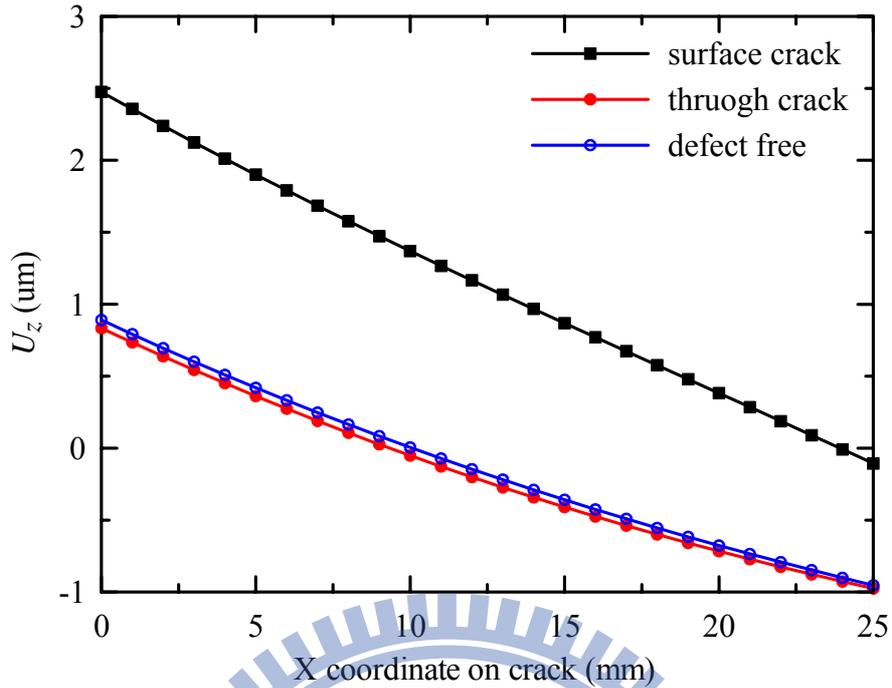


(a)

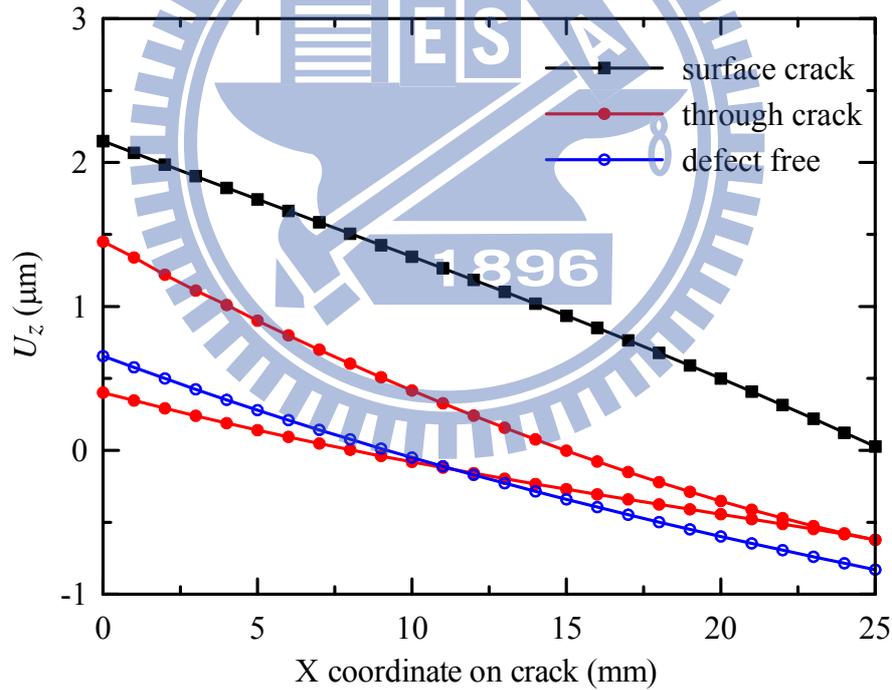


(b)

圖 3.10 模擬 25 mm 長的表面裂縫於太陽能電池模型左側，於不同溫度間隔下，裂縫面上的面外方向變形。(a)裂縫位於中央、(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端。



(a)



(b)

圖 3.11 比較有裂縫與無裂縫之太陽能電池模型，受熱增溫 0.4 (32.4-32) 於裂縫面位置上的面外方向位移，(a)裂縫位於中央、(b)裂縫位於 3/4 之位置。X 座標原點為裂縫初始位置，25 mm 處為裂縫尖端。

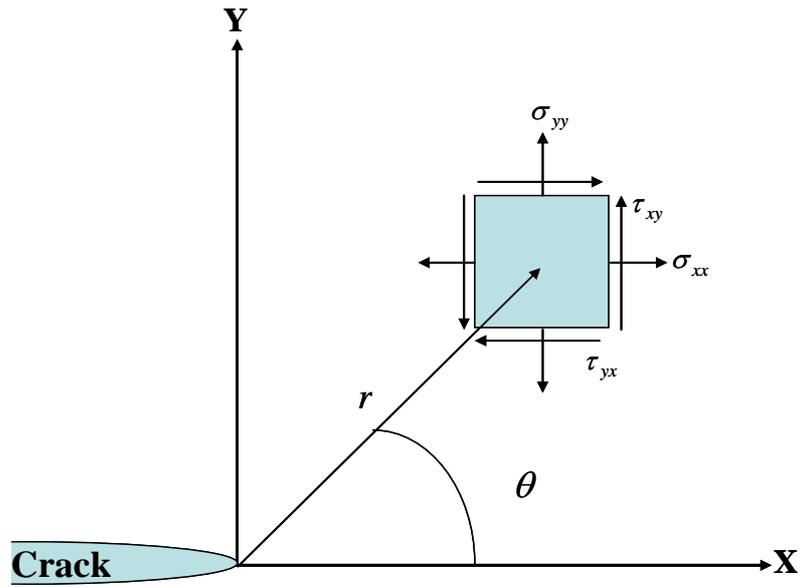


圖 3.12 裂縫尖端的座標系統，以極座標方式表示

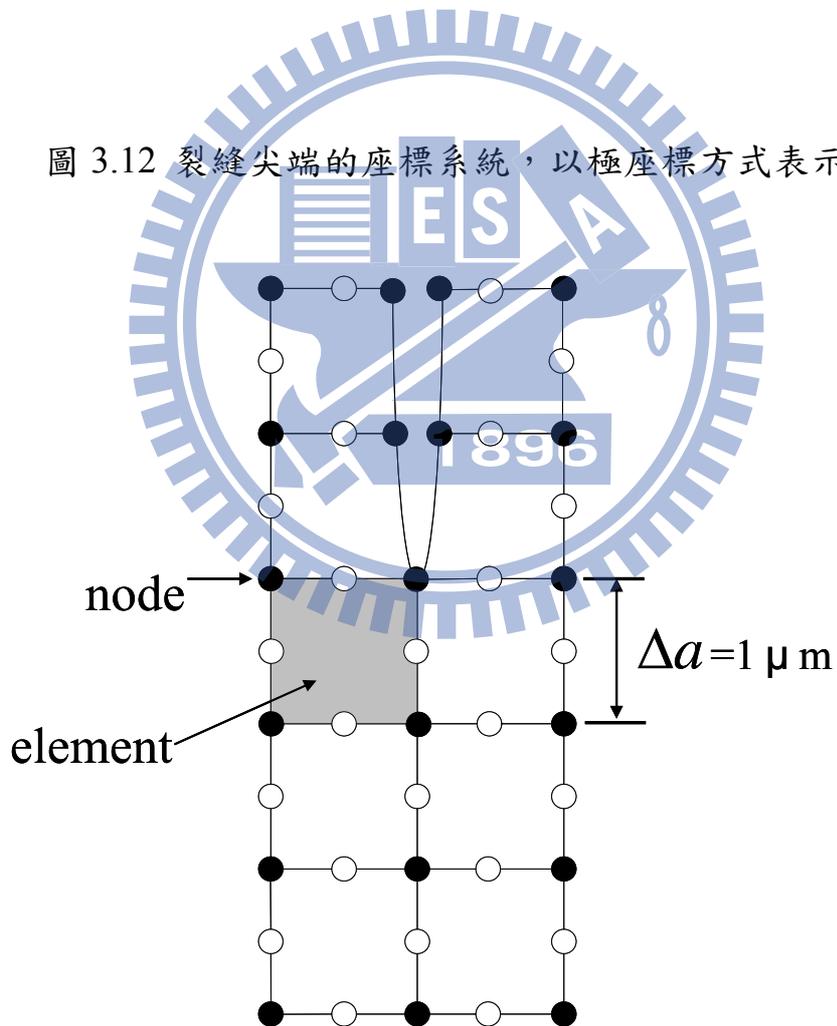


圖 3.13 二維裂縫模型示意圖

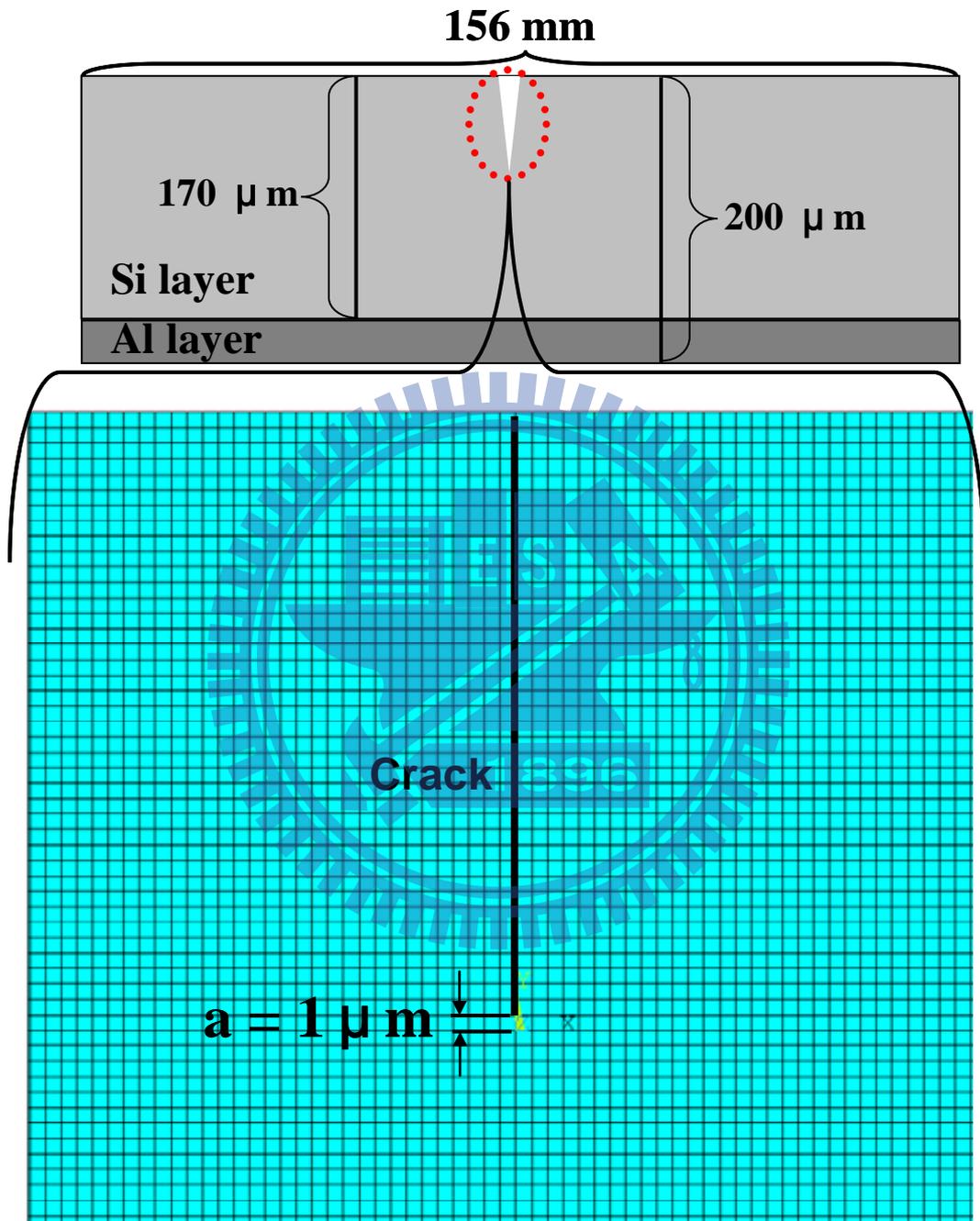
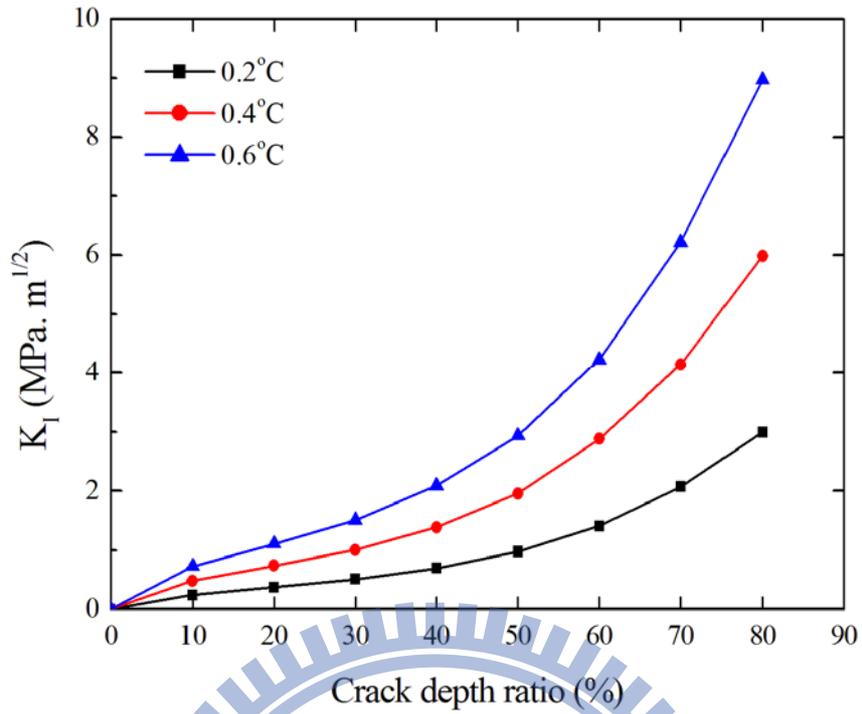
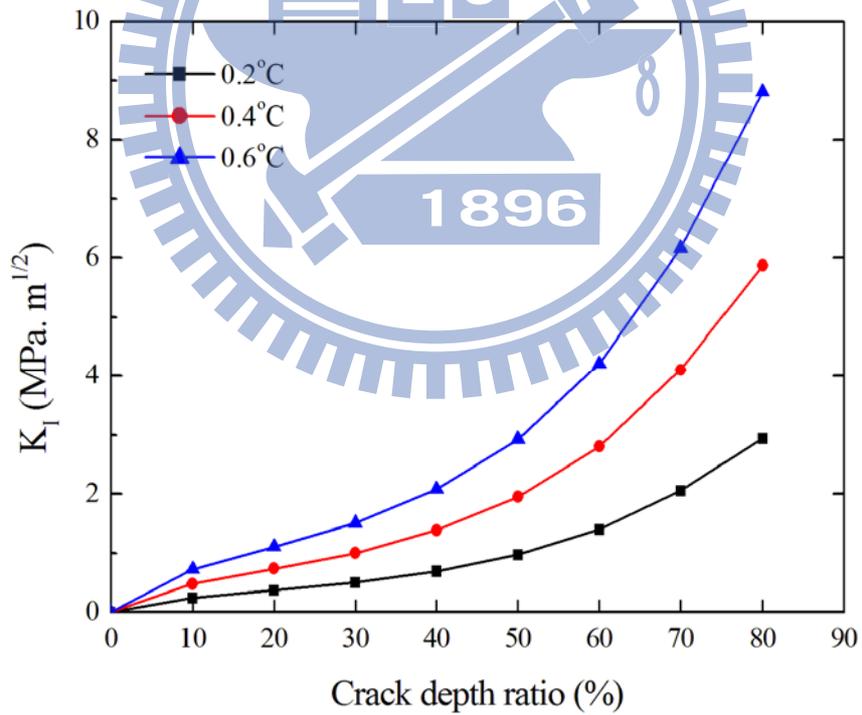


圖 3.14 二維太陽能電池中的表面裂縫模型



(a)



(b)

圖 3.15 太陽能電池中的表面裂縫於不同溫度間格下，深度與應力強度因子關係圖。裂縫位於模型(a)中央、(b)四分之一處。

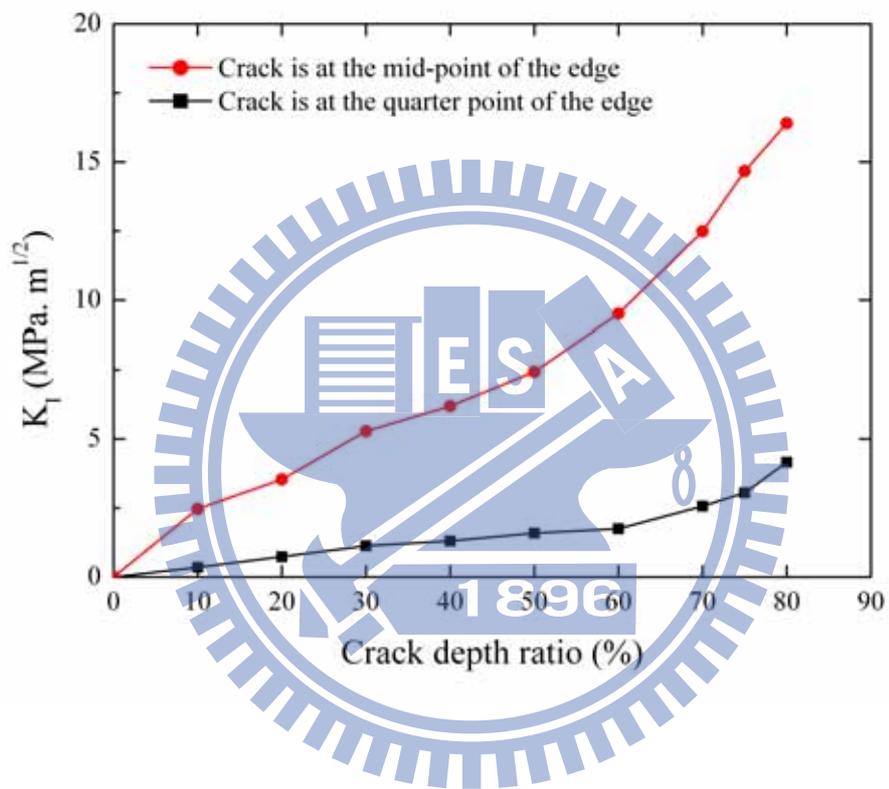


圖 3.16 太陽能電池中的表面裂縫於 12.7g 自重負載下，裂縫深度與應力強度因子關係圖，裂縫位於模型(a)中央、(b)四分之一處。

第四章 實驗技術基本理論及架設

入射光在粗糙表面會產生漫射(diffusion)現象，造成光學系統無法有效地量測該物體表面的變形量。相對的，本研究所使用的光斑干涉術則是利用漫射的光斑變化，適合量測粗糙平面的變形量。

本章將介紹本研究開發量測太陽能電池熱變形的電子光斑干涉術，包括基本理論及如何應用至太陽能電池的檢測，詳述建立檢測系統的方法及步驟，最後說明實驗中太陽能電池之人工裂縫的製作方式。

4.1 電子光斑干涉術基本原理

當具高同調性的光源照射於物體表面，物體被照射的表面粗糙度或表面高低起伏變化與入射同調光之波長相當或更大時，光就會產生散射，並在空間互相干涉形成複雜的光強分布，形成顆粒狀之外觀，此即為光斑效應(speckle effect)。若物體表面產生變形或位移，則光斑的密度或強度也會隨著改變，利用 CCD 相機將光斑的強度相對於參考值之變化紀錄下來，再以傅立葉光學(Fourier optics)理論進行影像處理程序，獲得光斑干涉條紋。電子光斑干涉術可依光路的架設區分為面外與面內位移量測兩種，面外干涉術量測與待測物體表面垂直方向的變形分量；面內干涉術則量測與待測物體表面平行的變形量，面內量測還可藉著轉動試片，分為互相垂直的兩個變形分量。

4.1.1 光斑干涉術原理

第一章已提及電子光斑干涉術最早由 Butters 與 Leendertz [20] 提

出，光斑為一同調光經過粗糙面或無規則性折射率的媒介散射(scattering)而成顆粒狀的斑點，如圖 4.1 所示，斑點的大小取決於光波長及光學系統中觀測面的透鏡焦距與光圈。當被照射物受負載而表面變形，使反射光產生光程差，造成光斑強度分佈的改變，若相位(phase)改變量超過 2π 以上，將造成光斑的初始相位無規律的於空間中自我干涉(self-interference)形成光斑圖像(speckle pattern)。

若在光學系統中的成像面增加另一參考光源，使被照射物表面的光斑重新組合成新的圖像，此現象即為光斑干涉(speckle interferometry) [81]。光為電磁波，以下以電場強度表示。在物體變形前，照射於物體的光及參考光之電場向量 U_o 及 U_r 表示成為

$$U_o = a_o e^{i\phi_o} \quad (4-1a)$$

$$U_r = a_r e^{i\phi_r} \quad (4-1b)$$

其中， a_r 及 a_o 為上述兩道光的振幅， ϕ_o 及 ϕ_r 為初始相位。物光及參考光照射在變形物體前的干涉光強度 I_1 可表示為

$$\begin{aligned} I &= |U_o + U_r|^2 = a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi_o - \phi_r) \\ &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos \phi \end{aligned} \quad (4-2)$$

其中， $\phi = \phi_o - \phi_r$ ，當物體受外力作用產生變形時，物光的相位發生一改變量 $\Delta\phi$ ，電場強度 U'_o 改寫成

$$U'_o = a_o e^{i(\phi_o + \delta)} \quad (4-3)$$

干涉光強度因為物光的相位改變，產生相位差 δ ，改變後的光強度 I' 改

寫成

$$I' = a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi + \delta) \quad (4-4)$$

(4-2)與(4-4)各代表被照射物體變形前後的干涉光強度，實驗上可利用 CCD 相機拍下被照射物變形前後的光斑照片，透過影像相減(subtract)，獲得光斑干涉條紋，其分佈及數量可反應出物體表面的位移量。若需獲得不同方向的位移，可藉由調整光路達到完整的變形量測。電子光斑干涉術除不需拍全像(holographic)底片且不需在暗房中操作，比傳統的全像技術在時間及空間上皆便利許多，所以被廣泛運用到量測物體受負載後的靜態(static)及動態的變形量、面內及面外位移、三維外觀形狀、及物體表面粗糙度及振動(vibration)的共振模態 [82]。

4.1.2 面內位移的量測

以光斑干涉術量測物體面內方向的變形，基本光路架構圖示如圖 4.2(a)。當兩道光源同時照射到一待測物表面， U_1 及 U_2 分別表示照射於待測物變形前之兩道物光的電場振幅向量，

$$U_1 = a_1 e^{i\phi_1}, \quad \phi_1 = \frac{2\pi R_1}{\lambda} \quad (4-5)$$

$$U_2 = a_2 e^{i\phi_2}, \quad \phi_2 = \frac{2\pi R_2}{\lambda} \quad (4-6)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (4-7)$$

其中， a_1 及 a_2 為兩道光的振幅大小， ϕ_1 及 ϕ_2 為因光程不同產生的初始相

位， R_1 及 R_2 分別為兩道光到待測試片表面的光程距離， λ 為入射光波長。物體變形前成像平面的干涉光強度 I_1 為

$$\begin{aligned} I_1 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos\phi \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中， $\phi = \phi_1 - \phi_2$ ，當物體發生變形後，變形量 $\mathbf{d} = d_x \mathbf{i} + d_y \mathbf{j} + d_z \mathbf{k}$ ，干涉光強度因物體的面內位移在兩道光前進方向產生一相位差 δ ， I_2 表示為

$$I_2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi + \delta) \quad (4-9)$$

(4-8)及(4-9)式顯示，當 $\delta = 2n\pi$ ，則 $I_1 = I_2$ 。以 CCD 相機拍下兩次干涉的光強度照片，在物體變形前後是一樣的。若 $\delta = (2n+1)\pi$ ，則光強度在變形前後無關連性。兩種基本的相位變化可反映出光斑條紋變化情形，其中， $\delta = 2kd_x \sin\theta$ 是由面內位移中 d_x 所造成的相位差 δ ，

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = (\mathbf{k}'_1 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{d} - (\mathbf{k}'_2 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{d} = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{d} \quad (4-10)$$

詳細推導如圖 4.2(a)所示， \mathbf{k}_1 及 \mathbf{k}_2 為入射光的波傳向量，可表示為

$$\mathbf{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (-\sin\theta \bar{\mathbf{i}} - \cos\theta \bar{\mathbf{k}}) \quad (4-11a)$$

$$\mathbf{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta \bar{\mathbf{i}} - \cos\theta \bar{\mathbf{k}}) \quad (4-11b)$$

將(4-11a)及(4-11b)式代入(4-10)式中，

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{d} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} 2 \sin\theta \mathbf{i} \right) \cdot (d_x \mathbf{i} + d_y \mathbf{j} + d_z \mathbf{k}) = \frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \quad (4-12)$$

令波數 $k = 2\pi/\lambda$ ，則(4-9)式可改寫為

$$I_2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi + 2k d_x \sin\theta) \quad (4-13)$$

利用疊加原理(superposition principle)將變化前後的強度相加，即(4-8)與(4-9)等號兩端相加，則光總強度為

$$I_{total} = I_1 + I_2 = (a_1^2 + a_2^2) + 4a_1 a_2 \cos\left(\phi + \frac{\delta}{2}\right) \cos \frac{\delta}{2} \quad (4-14)$$

當干涉亮紋產生時，相位差為

$$\frac{4\pi}{\lambda} d_x \sin\theta = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-15)$$

整理(4-15)式可得面內位移，

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (4-16)$$

(4-16)式代表光斑干涉於物體面內位移量測的基本單位，每增加一干涉條紋，面內位移量在 d_x 方向即增加 $\lambda/(2\sin\theta)$ ，其中 λ 為入射光的波長。此干涉條紋與位移的關係同樣適用於另一面內方向位移 d_y ，實際量測上只要將試片旋轉 90° 即可。

電子光斑面內位移量測實驗裝置示意如圖 4.2(b)所示，以分光鏡 (beam splitter) 將雷射光源分成兩道光，分別透過空間濾波器 (spatial

filter)擴束成球面波，以相同的入射角度照射於物體表面上，然後以 CCD 相機擷取待測物表面變形前後之光斑圖形，最後應用影像處理技術將兩者的強度相加，即可獲得代表表面內位移的光斑干涉條紋。

4.1.3 面外位移的量測

ESPI 面外位移量測示意圖如 4.3(a) 所示，光路架構與麥克森干涉儀的光路相同，同樣利用(4-1)式可得物光與參考光的電場振幅向量分別表示為

$$\mathbf{U}_o = a_o e^{i\phi_o}, \quad \mathbf{U}_r = a_r e^{i\phi_r}$$

待測試片變形前，物光及參考光干涉的強度以 I_1 表示，

$$\begin{aligned} I_1 &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi_o - \phi_r) \\ &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi) \end{aligned} \quad (4-17)$$

待測試片變形後，相位部分產生相位差 δ ，干涉的強度以 I_2 表示，

$$I_2 = a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi + \delta) \quad (4-18)$$

其中，變形產生的相位變化 δ 可表示為

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{d} = \frac{2\pi}{\lambda} 2d_z \quad (4-19)$$

將前後光的光強度相減，獲得 I_{total} ，

$$\begin{aligned}
I_{total} &= I_2 - I_1 = 2a_o a_r [\cos(\phi) - \cos(\phi + \delta)] \\
&= 4a_o a_r \sin\left(\phi + \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)
\end{aligned} \tag{4-20}$$

其中 $4a_o a_r$ 為常數項，不直接影響光強度的變化，當 δ 開始改變， $\sin(\delta/2)$ 的範圍落在 -1 至 1 之間，負數的部分將造成所拍下的照片呈現黑色情形，導致無法獲得所需的訊號，此情形可藉由整流(rectifying)的方式得到解決，若以數學方式表達，則(4-19)式將改寫如下：

$$I_{total} = 4a_o a_r \left| \sin\left(\phi + \frac{\delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right| \tag{4-21}$$

其中， $\sin(\phi + \delta/2)$ 代表快速變化的高頻項，為光斑雜訊； $\sin(\delta/2)$ 為低頻變化項，為物體變形引起的電子光斑干涉術主要條紋。前者需要以傅立葉光學方法配合影像處理技術，將高頻雜訊濾除，避免前後兩次拍攝的光強度相減後只呈現光斑強度圖形，而沒有干涉條紋出現。在(4-21)式的低頻變化項中，所得影像灰度值的最大、最小值分別為

$$\begin{aligned}
\delta &= 2n\pi & n &= 0, 1, 2, \dots & \text{最小值} \\
\delta &= \frac{(2n+1)\pi}{2} & n &= 0, 1, 2, \dots & \text{最大值}
\end{aligned}$$

將(4-10)式改寫成面外位移中 d_z 所造成的相位差 δ ，其中

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d_z = 2n\pi$$

故光斑干涉的暗紋代表之面外位移 d_z 為

$$d_z = \frac{n\lambda}{2} \quad (4-22)$$

由(4-22)式可知，面外位移量測基本單位為 $\lambda/2$ 。實驗上，面外位移量測系統的架構如圖 4.3(b)所示，雷射光經過分光鏡分為物光及參考光，物光通過空間濾波器後，由待測試體反射回 CCD 相機。參考光通過空間濾波器後，在參考平面漫射產生參考光斑，物光及參考光均沿 CCD 相機的法線進入相機的感測元件。以 CCD 相機擷取太陽能電池加熱變形前後之光斑圖形，將兩者的光強度相減再利用影像處理濾掉(4-21)式中高頻的雜訊，即獲得光斑干涉條紋。接著根據 ESPI 影像中光斑干涉條紋輪廓及數量，可得知待測物表面位移的分佈及改變量。

4.2 太陽能電池檢測系統

4.2.1 ESPI 量測系統

第三章提及之檢測系統的開發程序中，首要工作即是確認研究方法的可行性，其中包括實驗架構的確認及數值模擬太陽能電池的熱變形。本研究提出一有效檢測太陽能電池裂縫瑕疵的方法，利用太陽能電池受熱時產生熱變形，裂縫瑕疵會造成熱變形的不連續，有裂縫瑕疵與無缺陷的電池，在裂縫區域的位移變化應會有所不同。運用 ESPI 量測系統拍攝電池背面的光斑影像，預期由光斑干涉條紋分佈的變化，分辨出有無裂縫瑕疵電池的差異。圖 4.4 為紅外線熱像儀拍攝有缺陷太陽能電池於加熱過程的照片，太陽能電池置於加熱板上加熱，圖中可清楚看出，缺陷處的溫度與其他區域不同，代表缺陷會導致溫

度傳遞不均勻。然而紅外線熱像儀的解析度不高，不易辨識微細裂縫造成的差異。

為了確認量測系統的正確性，先以蜂鳴片代替太陽能電池做為量測試片。蜂鳴片受到外加的電壓負載時會產生變形，若 ESPI 量測系統可正常使用時，應可拍下蜂鳴片因變形所產生的干涉條紋，藉此判斷干涉系統的架設是否正確。步驟開始先在蜂鳴片上製造裂縫缺陷如圖 4.5(a)所示，ESPI 量測系統於蜂鳴片承受外加電壓 25 及 30V 時，各拍攝光斑照片並進行影像處理，圖 4.5(b)為 ESPI 量測系統拍攝面外位移之干涉條紋，圖中顯示干涉條紋於缺陷處呈現不連續狀態，此為蜂鳴片的缺陷處造成變形局部不連續情形。上述的結果可確認 ESPI 量測系統的正確性。經過驗證後，將臨時性的裝置及試片改換成檢測系統所需的設備。

本研究中採用的電子光斑干涉實驗設備如下：

1. 波長 532 nm 之綠光半導體雷射，同調長度約 3 cm，可供干涉成像，實體相片如圖 4.6 所示。
2. 60X 物鏡及 10X 針孔(pin hole)組成的空間濾波器(spatial filter)，將平行光轉換成球面光及擴束，使光源覆蓋整個太陽能電池。
3. 45°分光鏡將雷射光源一分為二，直接通過分光鏡的雷射光照射參考物，反射的部分則照射待測物。
4. 500 萬像素(2452×2056) CCD 相機擷取太陽能電池背面的光斑強度。
5. J-type 熱電偶(thermocouple)與 NI-9213 溫度擷取模組提供即時溫度的量測，前者的實物如圖 4.7 所示。
6. LabVIEW 程式監控溫度及操作 CCD 相機。
7. 電腦執行檢測系統軟硬體的整合控制與監控。

8. 加熱模組提供待測太陽能電池加熱。

實驗所使用的 CCD 相機感應器之廠牌為 Sony，對於綠光波段較為敏感，故實驗採用波長 532 nm 綠光雷射作為量測系統的光源。空間濾波器使用高倍率 60X 物鏡，將光源擴束至覆蓋整個太陽能電池。加熱器使用 PID (P、I 及 D 分別代表比例、積分微分) 控制器，準確地控制溫度。

ESPI 面外位移檢測系統的實驗架構如圖 4.8 所示，雷射光經過空間濾波器，自平行光轉變成球面光，經由分光鏡分為物光及參考光，物光照射在待測物上，於表面產生散射光斑。參考光照射於參考物，同時產生散射光斑，待測物光斑及參考光斑兩者產生干涉後，透過相機的物鏡進入相機的感測元件。檢測系統使用 J-type 熱電偶偵測加熱板的溫度，以 NI-9213 溫度擷取模組傳回電腦，可於人機介面上監控加熱器的即時溫度，設定 CCD 相機擷取太陽能電池受熱變形前、後之光斑圖形，最後以影像處理程式將兩者的光強度相減並濾掉高頻的雜訊，即可獲得光斑干涉條紋。太陽能電池的正面有抗反射層的結構，會造成入射光有較高的反射性及較低的漫射效果，因此實驗採用背面作為量測面。

確認檢測系統架構之正確性後，接著討論加熱太陽能電池的方式，在加熱太陽能電池過程中，必須調整並控制加熱器的升溫速度，使加熱板的熱能在最短時間內均勻傳導至試片上。由於電池的厚度只有約 200 μm ，能量在電池的厚度方向傳遞非常快速，所以將熱電偶偵測加熱板的溫度視作被加熱的試片溫度，假設系統中所監控的溫度為試片的即時溫度。為確認試片的每個區域受到均勻加熱，於加熱前將試片劃分為九個區域，四角以膠帶固定於加熱裝置上，如圖 4.9 所示，接著利用接觸式測溫器記錄各區域溫度與時間關係，升溫過程中的初

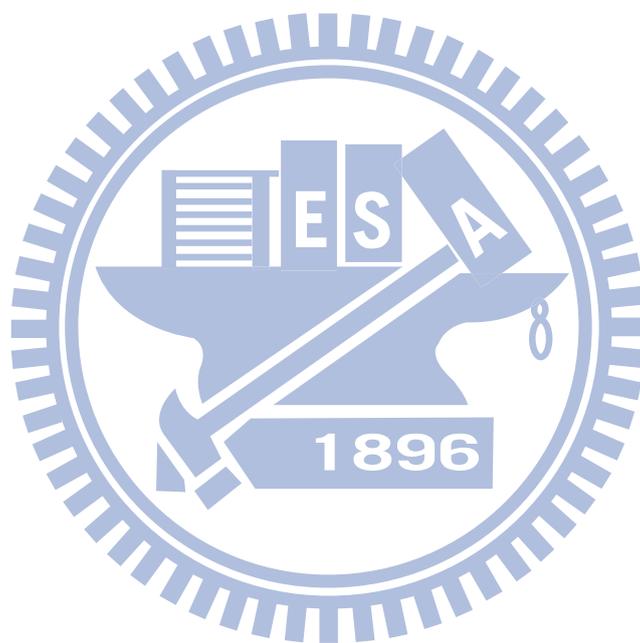
始溫度為室溫(約 28°C)，設定停止加熱的溫度為 60°C，圖 4.10 顯示太陽能電池九個區域的升溫過程無特別的差異，確認試片為均勻受熱。

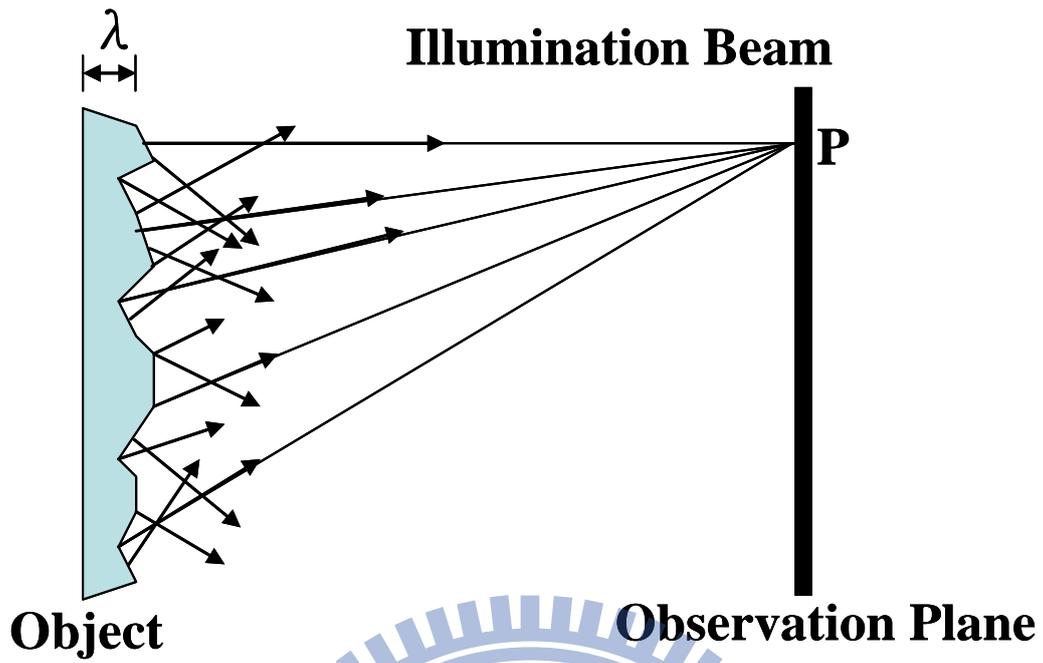
圖 4.11 為電子光斑量測系統在不同溫度間隔，拍攝代表太陽能電池三方向位移的光斑干涉圖形。圖中顯示在相同負載(升溫間隔)下，面外方向所產生的電子光斑條紋數目比面內方向多很多，代表太陽能電池在面外方向的位移變化明顯大於面內方向，支持上述推導中只考慮單一方向的假設，此結果亦可說明面外方向檢測較面內方向適合。圖 4.11 所示之三張不同溫度間隔拍攝的面外位移光斑干涉條紋照片中，在太陽能電池邊緣至金屬接觸為 39 mm 的範圍內，起始溫度為 32°C，升溫 0.2°C、0.4°C 與 0.6°C 條紋數分別為 6、10、16，若考慮檢測的解析度，條紋數越多解析度會越高，但在 0.6°C 圖片中，試片邊緣的條紋已經幾乎模糊了，所以實驗的加熱溫度以 0.4°C 較佳。

4.2.2 量測試片準備

本研究初期使用的太陽能電池試片由台灣久元電子股份有限公司 (Young Tek Electronics Corp.) 贊助提供，後續則向台灣新日光公司 (Neo Solar Power Corp.) 購買。在實驗階段的每片太陽能電池試片皆先拍攝 EL 影像，確認試片上原有缺陷的位置及大小，並與 ESPI 檢測系統所拍攝之光斑干涉條紋圖形作比對。有效的控制裂縫的位置及大小將有助於未來找出檢測系統量測的極限。本研究在維克式 (Vickers) 及洛克式 (Rockwell) 硬度測試機 (hardness test) 裝上自製的金字塔狀工業鑽石壓頭，控制硬度機的荷重，於太陽能電池上壓出十字形裂縫，如圖 4.12 所示。試片上製作出裂縫後，再次拍下 EL 的影像並紀錄裂縫的位置及大小。將破壞後的試片置於 ESPI 檢測系統中，拍下光斑干涉條紋

圖後，與無破壞缺陷試片之 ESPI 影像比較，確認其特徵，最後與 EL 影像做比較，即完成檢測程序。





(b)

圖 4.1 (a)光斑的形成，(b)以波長 532 的綠光雷射照射太陽能電表面所形成的光斑圖形。

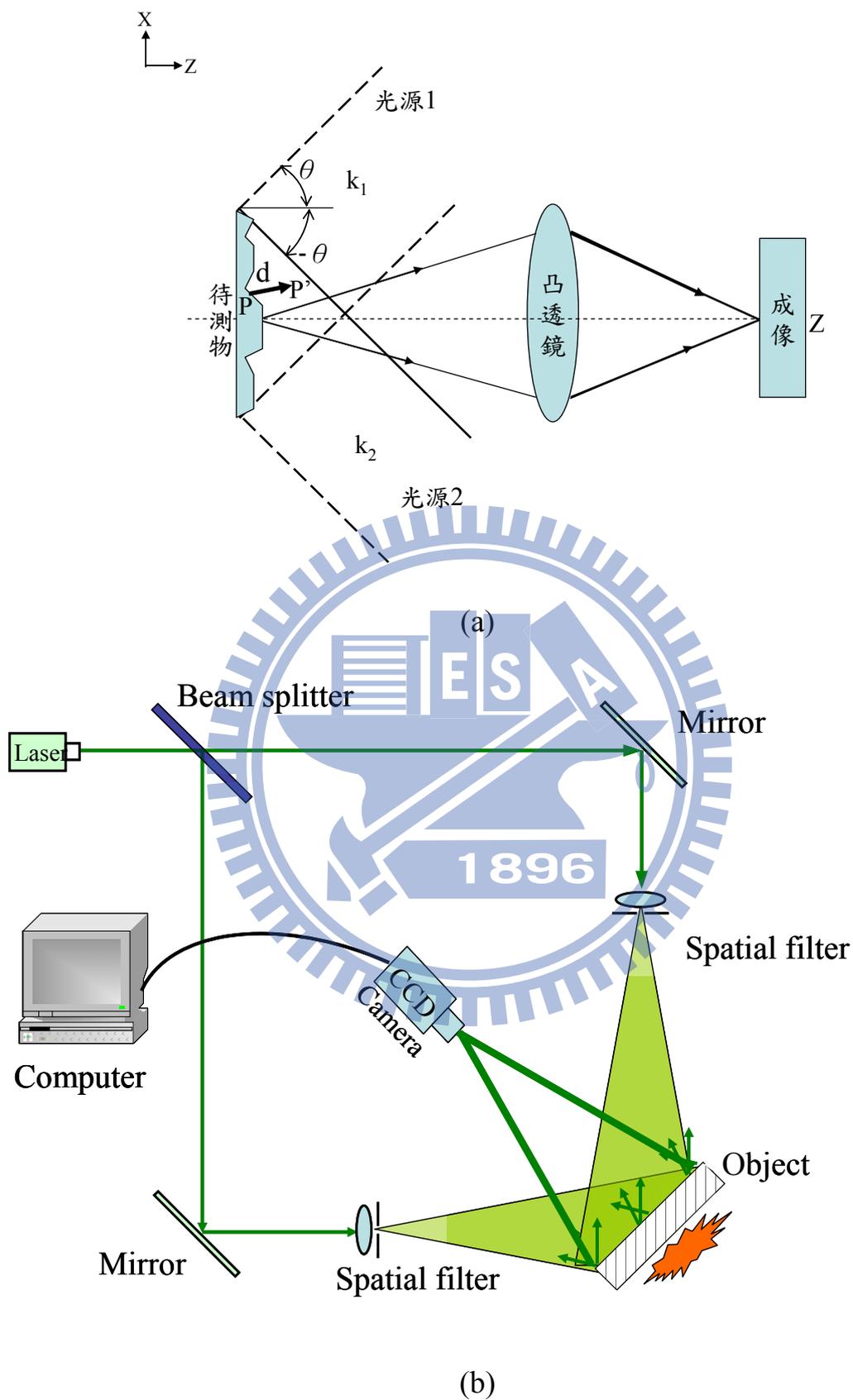


圖4.2 ESPI面內位移量測：(a)基本光路圖、(b)實驗架構圖

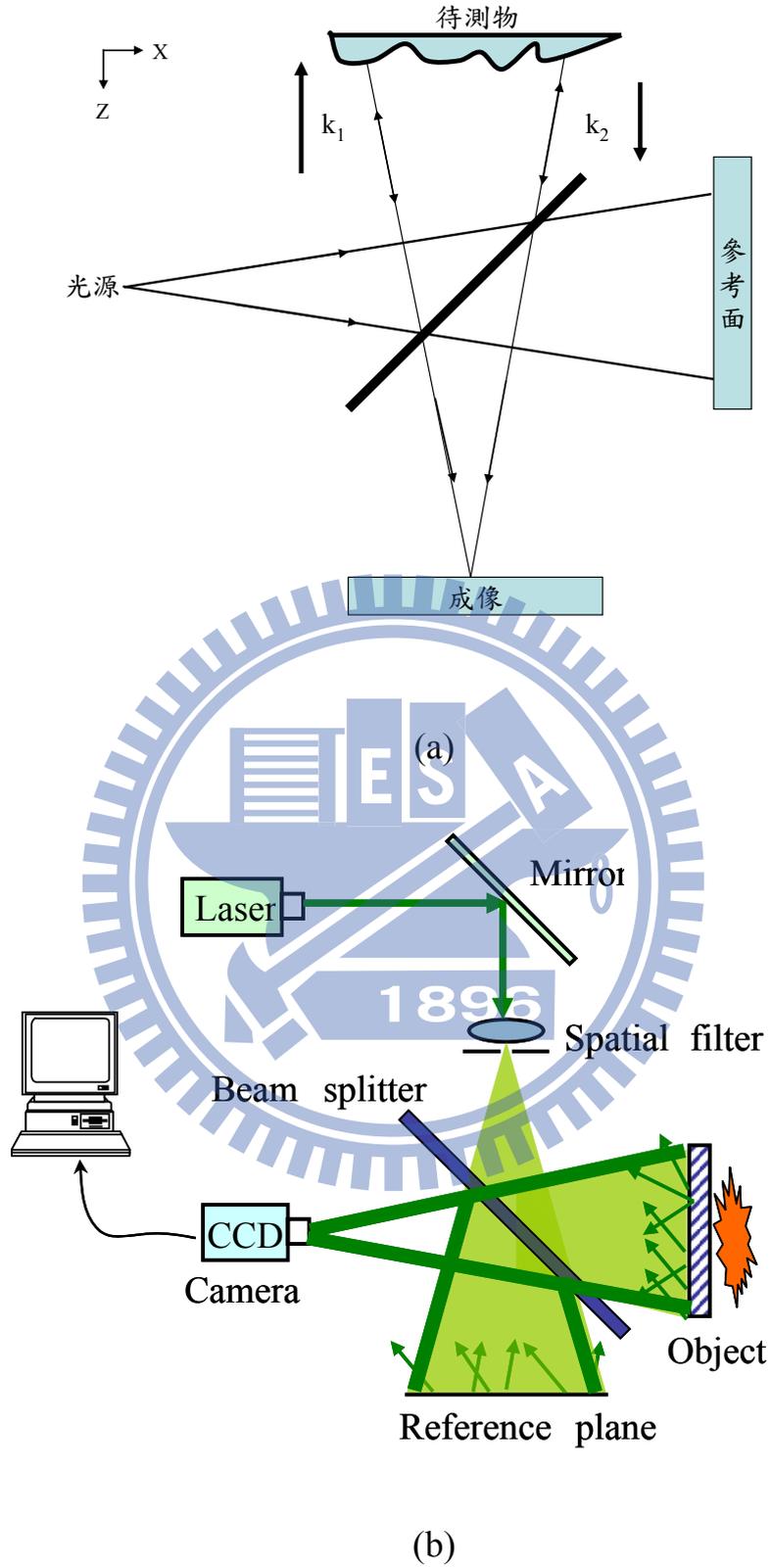
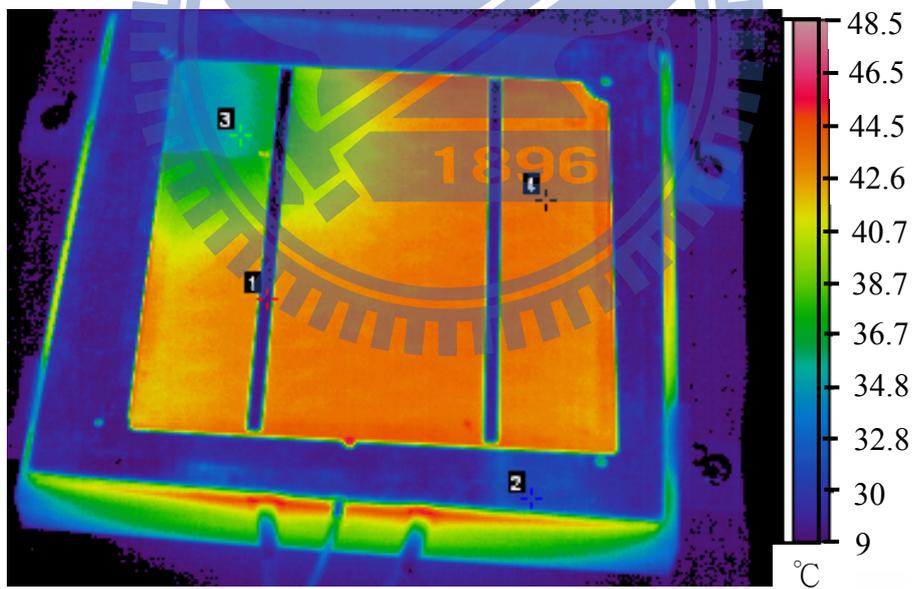
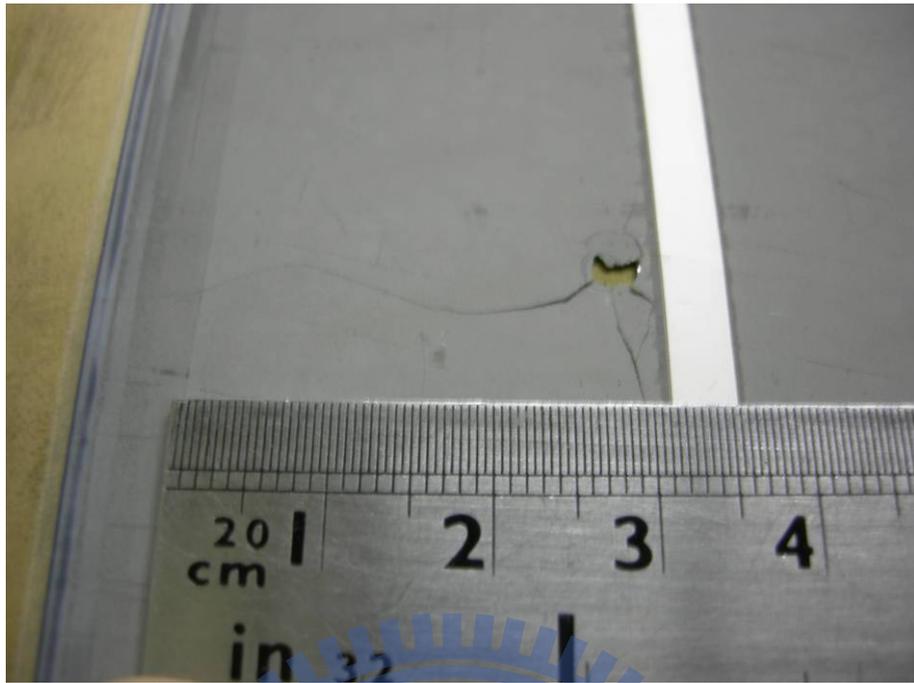
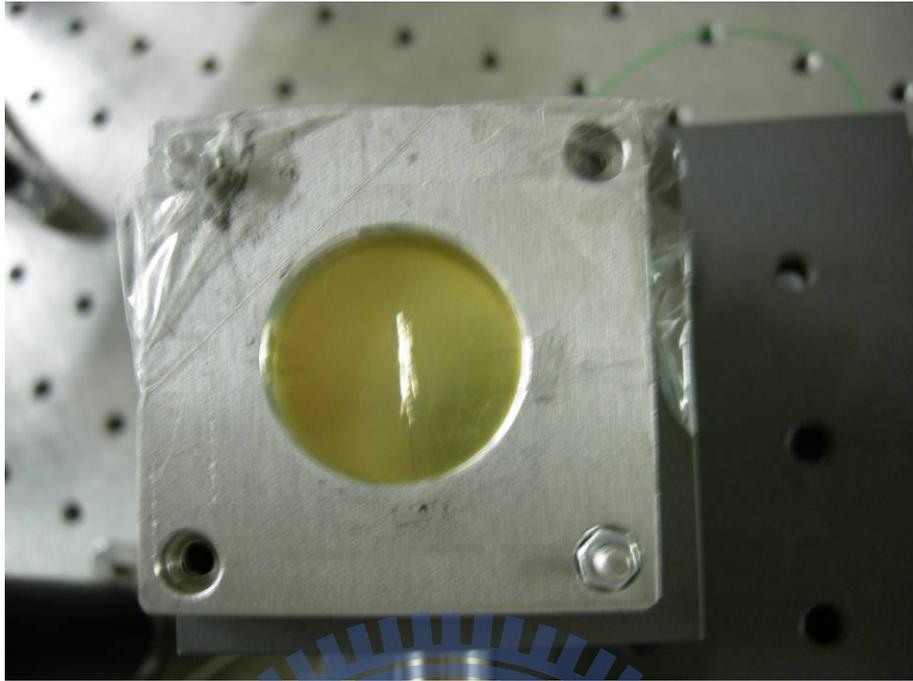


圖4.3 ESPI面外位移量測：(a)基本光路圖、(b)實驗架構圖

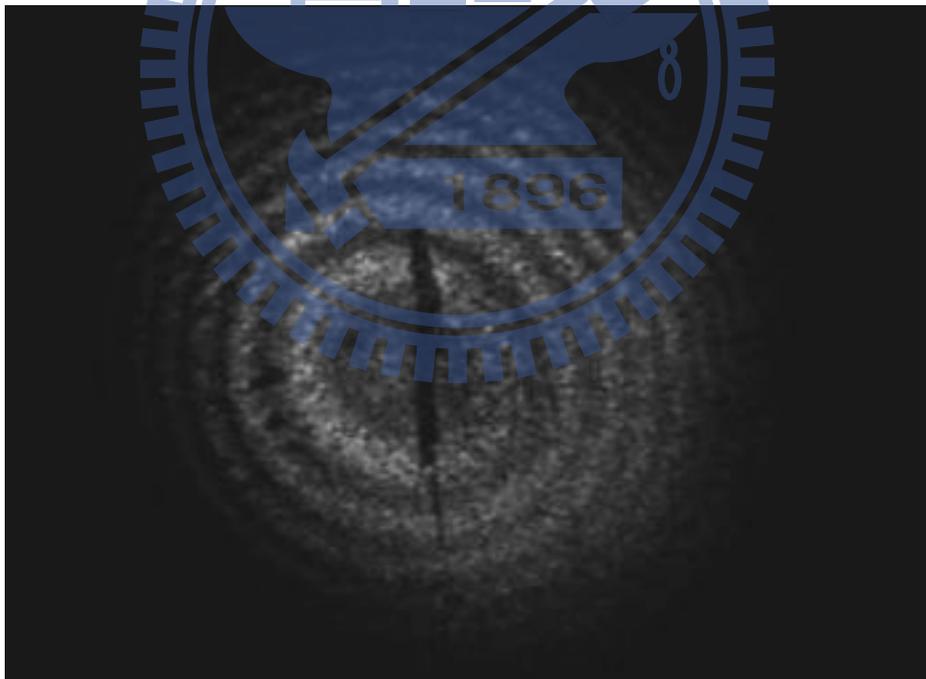


(b)

圖 4.4 NEC TH9100MR 紅外線熱象儀拍攝的溫度分佈圖(a)約 2 mm^2 面積的破裂於太陽能電池左上角、(b)以加熱板將電池加熱，缺陷處溫度傳遞不均勻。



(a)



(b)

圖 4.5 於蜂鳴片上製作長度約 9 mm 未貫穿之缺陷：(a)裝置示意圖、(b)ESPI 拍攝出蜂鳴片面外位移的干涉條紋。



圖 4.6 波長 532 nm 綠光半導體雷射光源照片

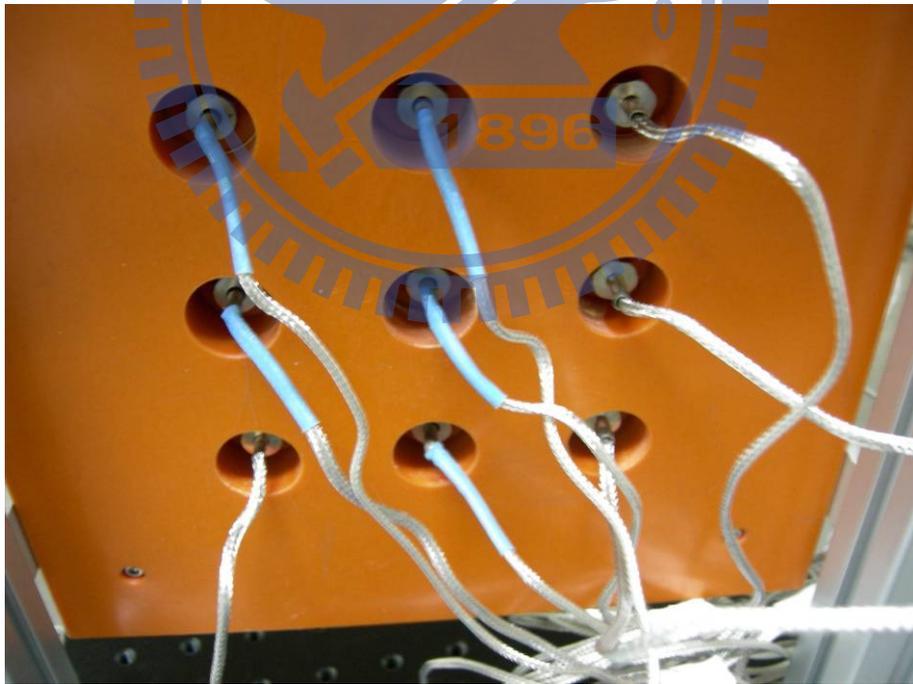


圖 4.7 裝置於加熱板背面的 J-type 熱電偶

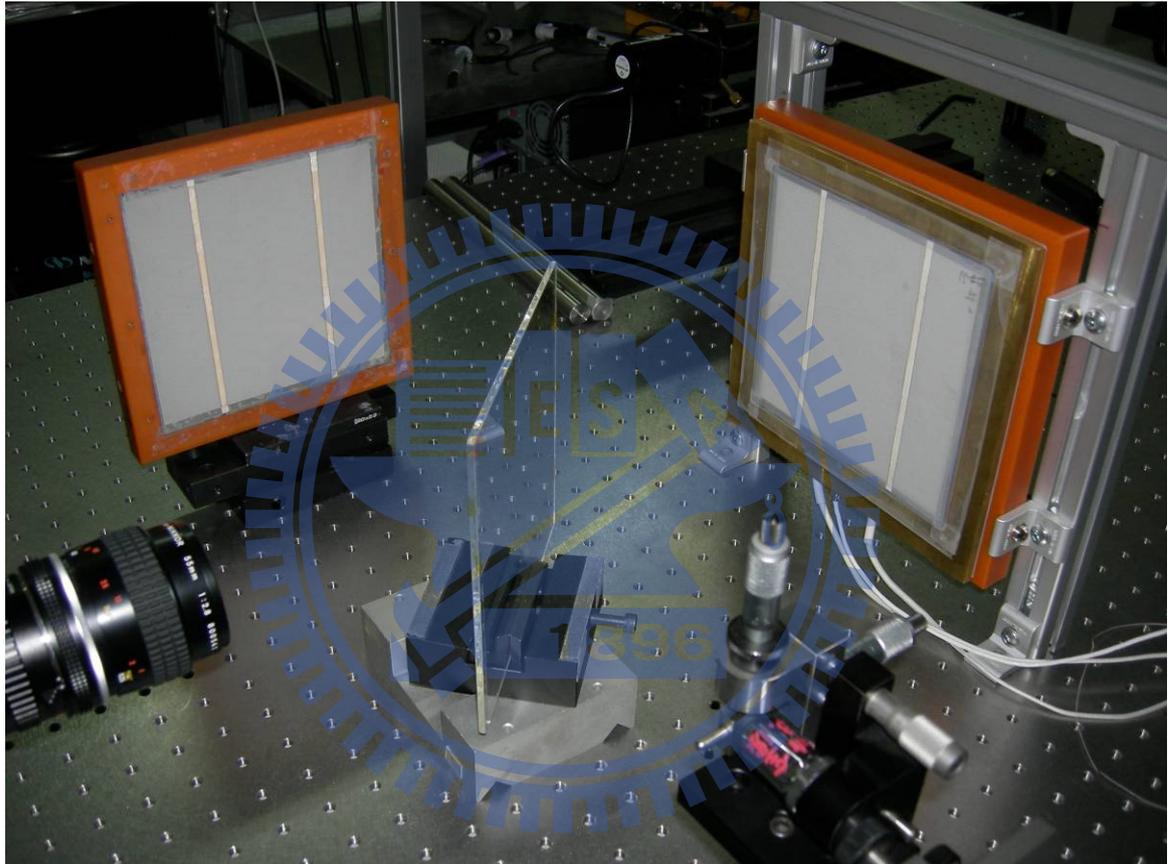


圖 4.8 ESPI 量測系統實體照片

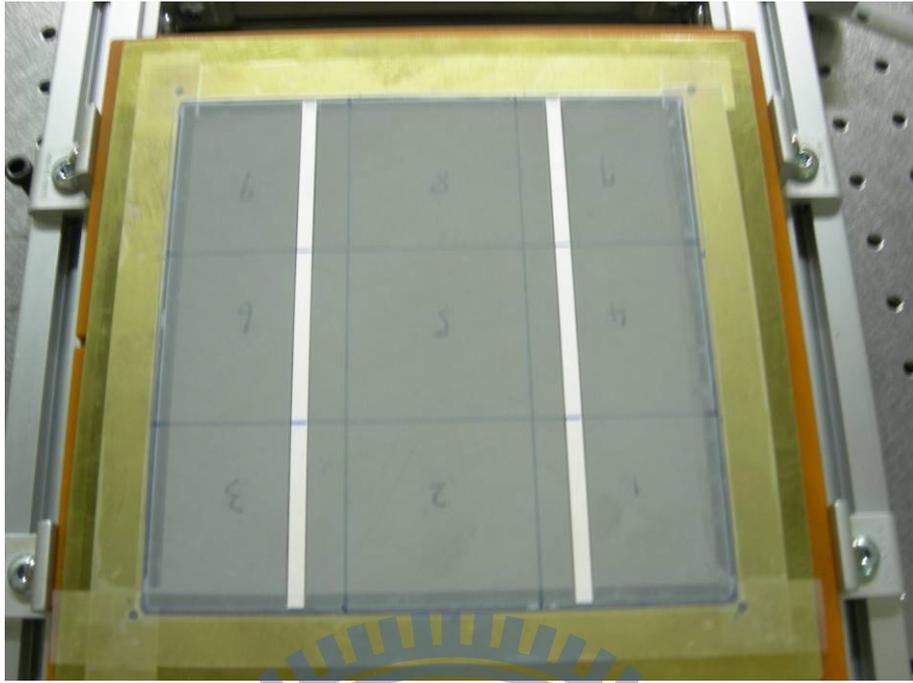


圖 4.9 太陽能電池固定於加熱裝置

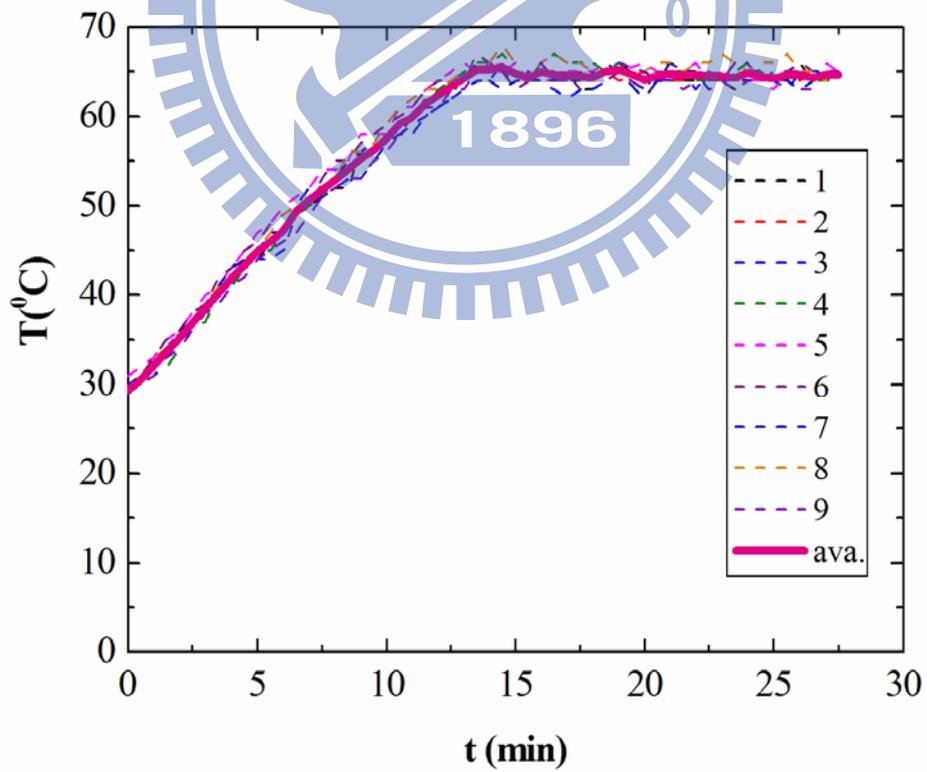


圖 4.10 太陽能電池等距離九宮格之升溫在時曲線

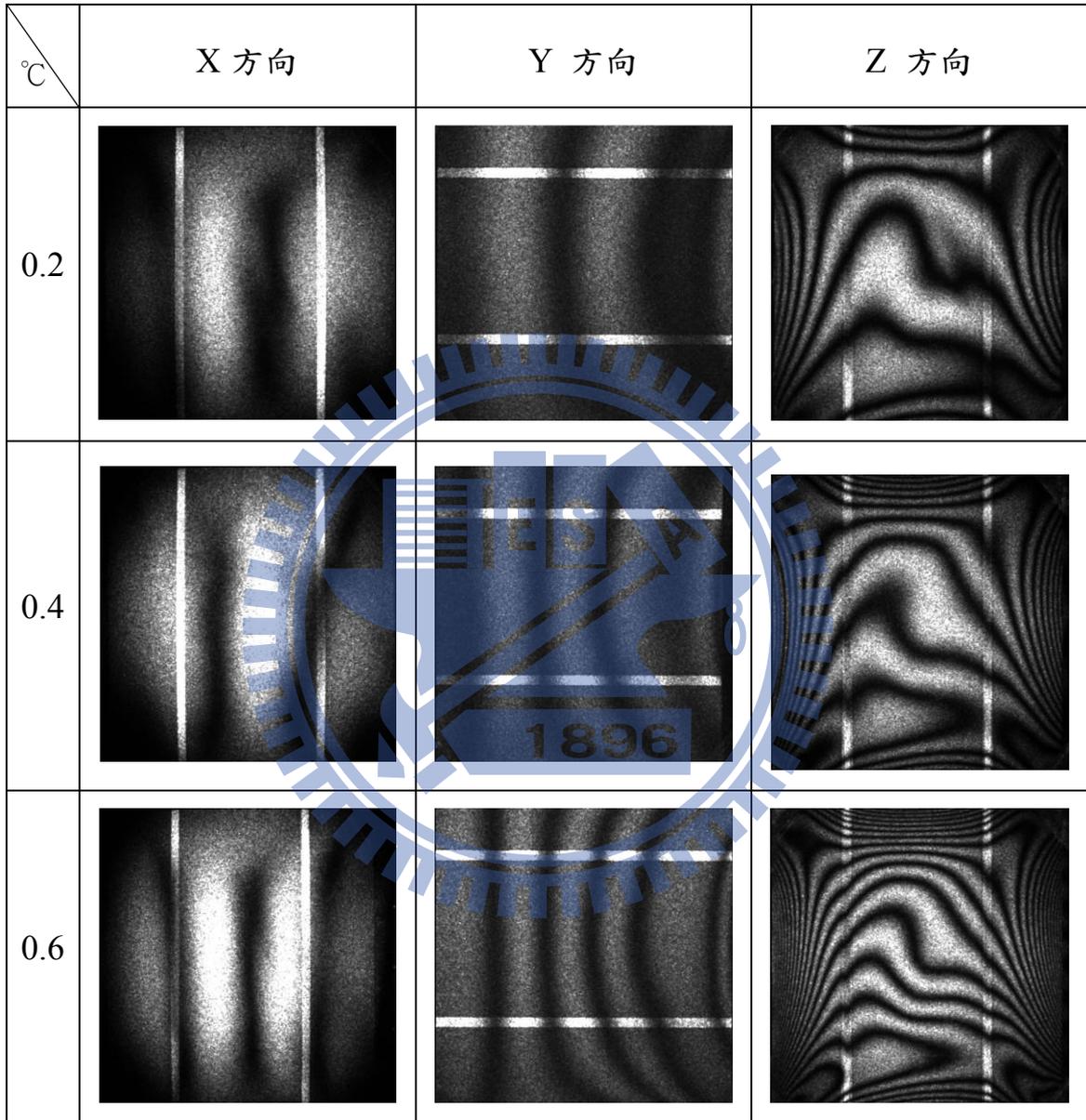
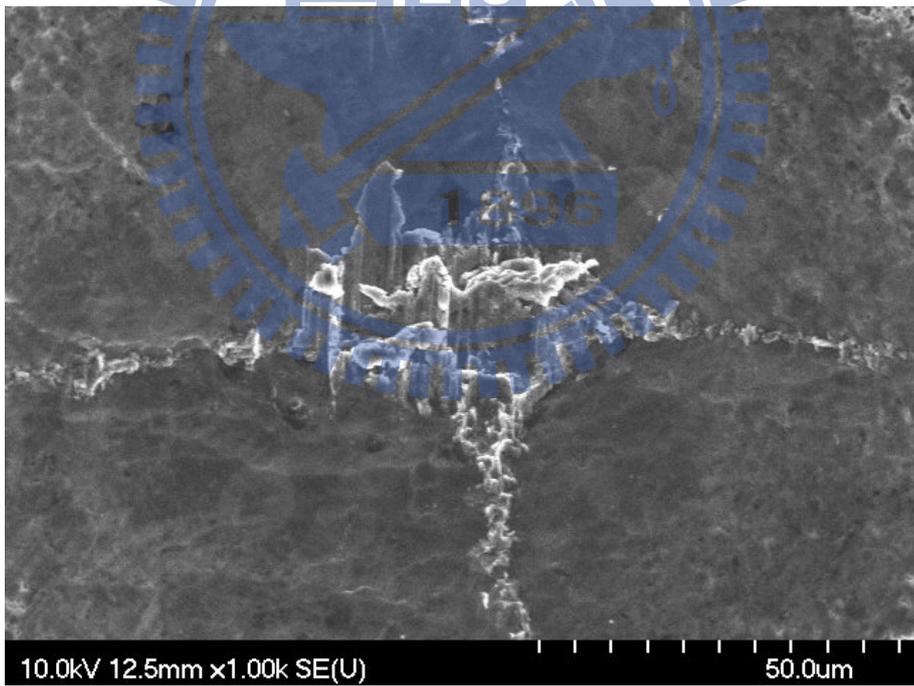


圖 4.11 ESPI 量測系統在不同溫度間隔下，拍攝三個應變方向的光斑干涉條紋。



(a)



(b)

圖 4.12 維克氏硬度計施加 20kg 負荷於太陽能電池上造成的十字形裂縫：(a)光學顯微鏡照片、(b)SEM 照片。

第五章 結果與討論

本章呈現太陽能電池裂縫檢測的實驗結果，包含位於太陽能電池邊緣及中央的表面裂縫、貫穿裂縫，並對結果作討論。有、無裂縫之太陽能電池試片的光斑干涉條紋圖形有很大的差異，可作為判斷太陽能電池是否有裂縫的依據。相較於作為本研究對照的 EL 法，能更直接的確認裂縫是否存在，並辨識裂縫種類。

5.1 實驗結果

太陽能電池經過多道製程後，已具有初始的彎曲變形。圖 5.1 所示為 ESPI 檢測系統擷取無裂縫太陽能電池的光斑干涉圖形，其干涉條紋分佈將被視為與後續有裂縫試片之比較標準。ESPI 影像的干涉條紋分佈與圖 3.8(a)所示中以有限元素法模擬的結果非常相似，顯示實驗的條件與模擬接近。在試片邊緣有較密集的干涉條紋，代表試片邊緣有較大的面外位移梯度，預期本研究方法在邊緣裂縫的檢測結果比內部裂縫好。本實驗拍攝的太陽能電池光斑干涉圖形，是擷取試片溫度 32°C 及 32.4°C 作為變形前後的兩張照片，經由影像處理方式而獲得，此試片溫度僅代表本研究方法在實驗環境中可拍出重現性較高的較 ESPI 影像。然而，實際上應用此檢測法並不侷限在此溫度，僅需要將待測試片預熱一小段時間，使試片的溫度均勻分佈，即可獲得高辨識度的干涉條紋。在接近室溫(25°C)條件下所拍攝的光斑影像，受到太陽能電池的初始彎曲變形影響，光斑干涉條紋的辨識度並不明顯，如圖 5.2(a)所示。但經過一小段升溫的過程到達 32°C 後，試片的變形的分佈趨於平坦，在此溫度下所拍攝的光斑影像，重現性非常

好，圖 5.1 所示的 ESPI 影像的拍攝條件即是如此。倘若升溫過高，熱膨脹係數會隨著溫度上升而有所改變，高溫造成太陽能電池翹曲的情形越來越明顯，材料本質上的缺陷及翹曲將逐漸影響由溫度差所產生的變形，導致在相同的溫度間隔下所呈現干涉情形較不穩定，ESPI 影像中的重現性亦不佳，如圖 5.2(b)所示。相較於圖 5.1 所示，圖 5.2(b) 右側之光斑干涉條紋有類似鋸齒狀的情形發生。此情形除上述因素之外，亦有可能是附著試片與加熱板上的膠帶，受高溫影響其附著力，導致變形分佈有些改變。

5.1.1 貫穿裂縫

圖 5.3(a)顯示有裂縫缺陷的多晶矽太陽能電池 EL 影像，圖中被標註的區域中有一長度為 38 mm 的黑線，此缺陷已損害電池中的 P-N 接點功能，並阻礙發出近紅外光，所以在 EL 影像中呈現黑色線條。以實驗量測系統加熱此試片後，所拍出的光斑干涉圖形如圖 5.3(b)所示，在相對於前述 EL 影像中的黑線位置，光斑干涉條紋發生斷裂情形，且兩側的條紋數目不相等，此特徵與貫穿裂縫的數值模擬結果相符。另外，圖 5.3(b)顯示缺陷處的干涉條紋數目亦多於圖 5.1 之無裂縫試片。圖 5.3(c)所示為以有限元素法數值模擬相同位置處之貫穿裂縫的面外位移等高線。面外位移等高線的間隔設為 266 nm，與干涉條紋相同，相似於圖 5.3(b)所示的光斑干涉圖形。綜合上述的結果，本研究將能夠判斷圖 5.3 中的缺陷及其特徵屬於貫穿裂縫。

圖 5.4 比較有、無裂縫之太陽能電池於裂縫位置各點的熱變形位移變化，其中，縱座標為位移變化，橫座標代表裂縫尖端(座標原點)至裂縫初始的距離。圖 5.4(a)所示為擷取圖 5.3(c)中，裂縫面兩側節

點的位移變化，圖中可清楚看出裂縫面兩側除裂縫尖端外，每一位置皆有兩個面外位移值，越接近裂縫初始位置越明顯，意謂裂縫面兩側的變形不連續。圖 5.4(b)所示為擷取圖 5.3(b)之 ESPI 影像結果，裂縫面上每 5 mm 長度取一點，根據光斑干涉條紋的數量變化，每增加一條亮紋即換算為 266 nm 的位移增量，繪成位移變化量測曲線。圖中的裂縫尖端熱變形設為零，裂縫面兩側熱變形的面外位移不連續。與圖 5.4(a)中模擬分析結果有些微差異，圖 5.4(b)中的裂縫面兩側在距離裂縫尖端約 15 mm 後，出現兩條面外位移值曲線交會後分開，熱變形面外位移的差值比數值模擬結果小。此及數值模擬中，除設定邊界條件的區域外，其他位置會發生正向或負向的面外位移。然而，實驗中太陽能電池是貼附在加熱板上加熱，只有單方向的面外位移，位移量相對於數值模擬的結果會小一些。

5.1.2 表面裂縫

圖 5.5(a)為多晶矽太陽能電池的 EL 影像，圖中圓形標註的區域內有一與圖 5.3(a)相似的黑線但長度為 22 mm，同樣都是實驗中的人工為裂縫。此試片置於本研究的 ESPI 檢測系統中，於昇溫間隔 0.4 所拍攝的光斑干涉圖形如圖 5.5(b)所示，圖中顯示電子光斑干涉條紋的斜率不連續處連線恰巧落在 EL 影像的黑線位置，如同圖 3.8 (b)所示出現的 V 形輪廓，且條紋數目比圖 5.1 所示的相同區域內多。藉由上述的特徵可推測此缺陷為表面裂縫。圖 5.5(c)所示為以有限元素法模擬此一長 22 mm 的表面裂縫試片的面外位移等高線分佈圖，與圖 5.5(b)比較，等高線與光斑干涉條紋在裂縫處都會產生斜率不連續及數目增加的情形。圖 5.6(b)顯示在長度 22 mm 的裂縫面區域內，有裂

縫的影像比無裂縫的多出 2 條干涉條紋，即面外位移相差 532 nm。於相同條件下的模擬結果亦顯示位移變化的差異比實驗更明顯，如圖 5.6(a)所示。

本研究方法也可以應用於檢測單晶矽太陽能電池。單晶矽電池的晶格排列為[111]或[100]，裂縫在 EL 影像中呈現 45°走勢，所以表面裂縫於多晶矽試片中所出現 V 形輪廓特徵，在單晶矽太陽能電池中會沿著裂縫成長方向延伸。本實驗以金字塔狀壓頭製造人工裂縫的方式，在單晶矽試片上經常會留下兩道裂縫，兩裂縫延伸的長度並不一定相等，在 EL 影像中會呈現兩互相垂直的線段。圖 5.7(a)所示為單晶矽太陽能電池邊緣存在一長 18 mm 之裂縫的 EL 影像，圖 5.7(b)顯示此單晶矽太陽能電池在 ESPI 量測系統下所拍出的影像，標註區域內的干涉條紋出現 V 輪廓，並且與裂縫呈 45°夾角排列。圖 5.7(c)所示則為有限元素法於相同條件下模擬的結果。

5.1.3 內部裂縫

除了以上討論發生於太陽能電池邊緣的裂縫之外，實驗中另一檢測項目是為發生於試片中央的裂縫。以前述人工裂縫的製造方式，在太陽能電池的中央製作裂縫，必然會造成內部裂縫呈十字狀延伸，圖 5.8(a)及圖 5.9(a)分別為多晶矽及單晶矽太陽能電池之 EL 影像，於試片中央分別有一直徑 33 及 30 mm 的十字型裂縫位於中央，其中多晶矽試片除主裂縫以外還有一些分支，單晶矽試片中的裂縫會如上述以 $\langle 111 \rangle$ 方向呈現。圖 5.8(b)與 5.9(b)所示為 ESPI 量測系統分別拍下的光斑條紋影像，圖中可觀察到不論是多晶或單晶試片，其干涉條紋在裂縫處的特徵皆呈現多邊型輪廓，對角線即為十字裂縫的位置。此類

型的裂縫發生於試片中央，遭受邊界的束縛比邊緣裂縫大，施予熱負載後，裂縫周圍產生的熱變形將會小於邊緣裂縫，尤其是位置越接近試片中央的裂縫，位移變化量越小，甚至在其他方向的位移變化也不易觀察。單晶矽試片在受熱之後整體變形量雖比多晶矽小，但由於裂縫走勢為 45° 方向，在裂縫周圍的熱變形造成位移不連續的情形相對比較明顯。在試片中央裂縫的模擬中，裂縫的深度與表面裂縫一樣。都假設延伸至矽鋁界面，故產生如 ESPI 影像中的多邊型輪廓，負載及邊界條件則與邊緣裂縫皆相同。圖 5.8(c)及 5.9(c)所示分別為多晶矽及單晶矽太陽能電池中央裂縫受到熱變形的模擬結果。

5.2 檢測能力評估

綜合上述的實驗及模擬分析結果，本研究方法可充分辨識太陽能電池中的裂縫。當有裂縫的太陽能電池經過加熱後，裂縫會造成 ESPI 影像中的干涉條紋產生可作為檢測依據的特殊輪廓，因為是裂縫會造成附近區域的熱變形面外位移不連續，且位移量大於無裂縫的試片。貫穿型裂縫的光斑條紋會產生斷裂情形，且裂縫面兩側的條紋數不同，而表面裂縫在裂縫面區域產生 V 形輪廓。試片中央的十字裂縫則會產生多邊型的光斑干涉條紋，且對角線對應十字裂縫的位置。實驗結果與第三章模擬結果有些微差異的原因，推究可能是矽晶片在完成後續的電池製程後，表面平整度會變得不好，每批次的試片亦有差異，導致相同負載所造成的熱變形分佈與數值模擬的結果些許差異。

相較於目前業界使用最多的 EL 檢測法，上述這些特徵除可判斷太陽能電池是否有裂縫存在之外，更可清楚的辨識裂縫種類，尤其在多晶矽太陽能電池上，矽材料本身有許多摻雜物擴散的缺陷，使 EL

影像中有許多不規則的黑色區域，這些不發光的區域亦有可能是 P 型或 N 型半導體的表面刮傷所造成，這類型缺陷或許會造成太陽能電池在電性上的損失，但不會造成整體性的破壞。透過本研究方法，不僅可以對太陽能電池做全域非破壞的檢測，並且可以對缺陷種類作分類篩選。

本章最後將探討太陽能電池裂縫周圍產生的變形與裂縫深度及長度之間的關係。圖 5.10 所示為陽能電池表面刮傷與表面裂縫的實體照片，矽晶太陽能電池的表面裂縫深度未貫穿整個試片，無法藉著打光方式突顯裂縫，以致於目測或機器視覺檢測方式漏檢此類型裂縫的機率相當高。欲知裂縫是否貫穿整體厚度，只需觀察裂縫長度在試片的正反面是否一致而獲得答案，但若想進一步瞭解裂縫在試片上的深度，則必須以顯微鏡或者其他量測儀器觀察裂縫的截面。然而，市售太陽能電池材料薄(厚度約 $200\ \mu\text{m}$)且脆，無法以試片切割而獲得裂縫面的深度，亦無法從量測儀器直接觀察太陽能電池上裂縫的深度。透過本研究中加熱的方式，太陽能電池的熱變形會因為裂縫而造成整體的位移分佈改變，出現 V 形輪廓，輪廓的彎曲角度會隨著裂縫的深度增加而改變。圖 5.11 所示為長 $25\ \text{mm}$ 裂縫深度與彎曲角度的模擬結果，圖中顯示當表面裂縫深度超越整體厚度的 50% 時，開始出現 V 形輪廓。意謂本研究方法可以檢測出裂縫深度超過太陽能電池厚度 50% 的表面裂縫。然而，根據 3.4 節的裂縫成長穩定性分析結果，矽材料中的表面裂縫在深度方向成長處於非穩定狀態，會一直成長至矽-鋁共晶結構才停止，故幾乎不會有小於矽材料厚度的裂縫存在。所以，本研究方法對於太陽能電池中未貫穿整體厚度的表面裂縫，沒有檢測上的限制。

除裂縫深度之外，裂縫的長度是造成整體性破壞的關鍵，一套有

效檢測裂縫的方法對裂縫長度必須有一定靈敏度。在本實驗製作人工裂縫的方法中，在裂縫初始處會發生直徑 1-2 mm 大小的表面壓損，之後再以鉛筆末端的橡皮擦輕輕碰撞使之延伸，裂縫的長度最短可控制在 5-10 mm 之內。裂縫面上除壓損區域外，皆為未貫穿試片的表面裂縫。本研究方法對於裂縫長度的靈敏度測試中，同樣先以 EL 法確認裂縫長度，再觀察 ESPI 影像中是否出現 V 輪廓作為判斷裂縫存在的依據。圖 5.12 所示分別為 ESPI 量測系統拍攝太陽能電池上小於 20、15 及 10 mm 的裂縫照片，圖中顯示在長度 10 mm 內的裂縫，依然能利用光斑干涉條紋的特徵做辨識，說明本研究方法對於裂縫長度的檢測極限約在 5-10 mm。在裂縫寬度方面，圖 2.11 的 SEM 照片顯示出本研究的人工裂縫寬度皆小於 $5\mu\text{m}$ ，本研究方法對於裂縫寬度的檢測能力並無限制。



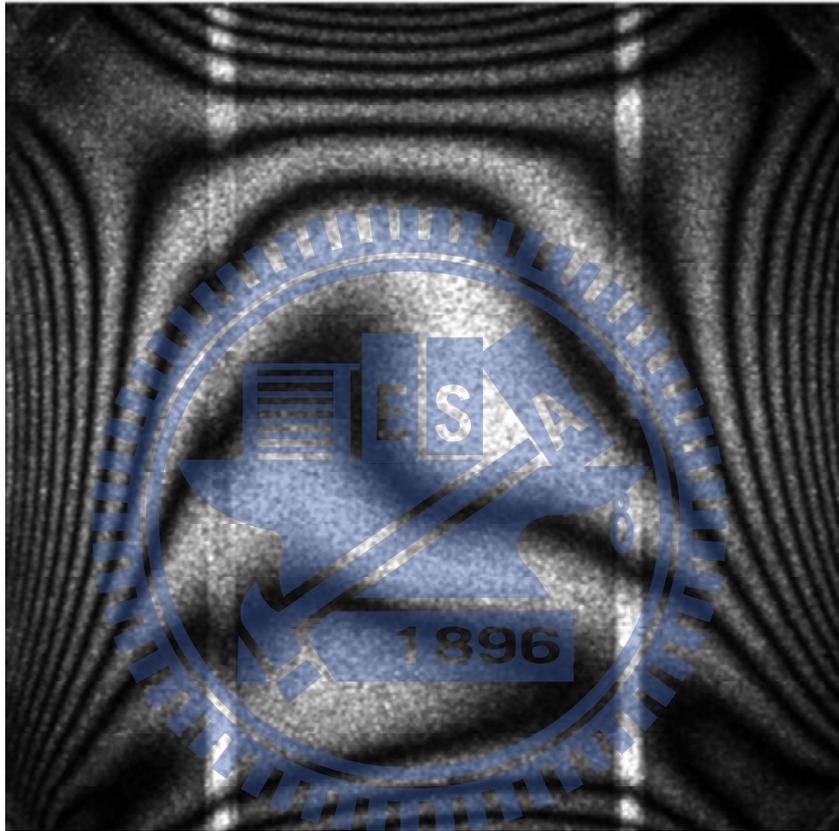
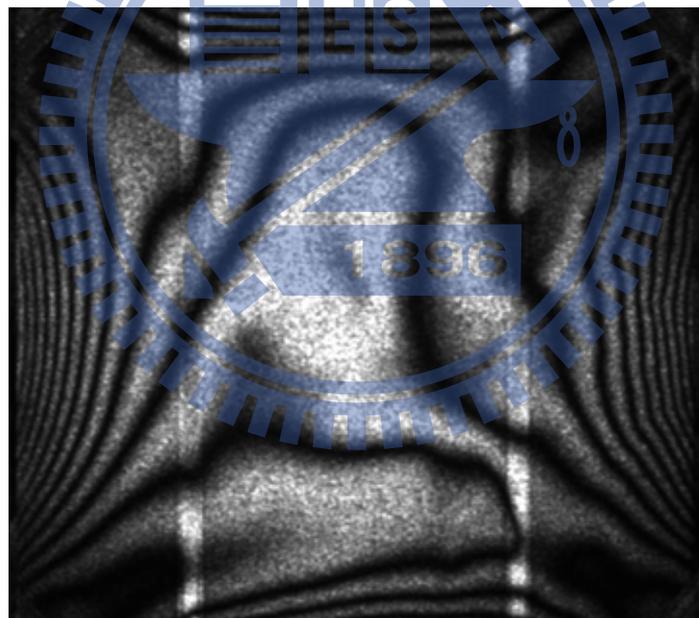


圖 5.1 無裂縫的太陽能電池在 ESPI 量測系統中所拍下的電子光斑干涉圖形，升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)。



(a)



(b)

圖 5.2 與圖 5.1 相同之無裂縫試片，在不同起始溫度下，所拍攝出辨識度較差的電子光斑干涉圖形，(a) 25 到 25.4 、(b)49.6 到 50 。

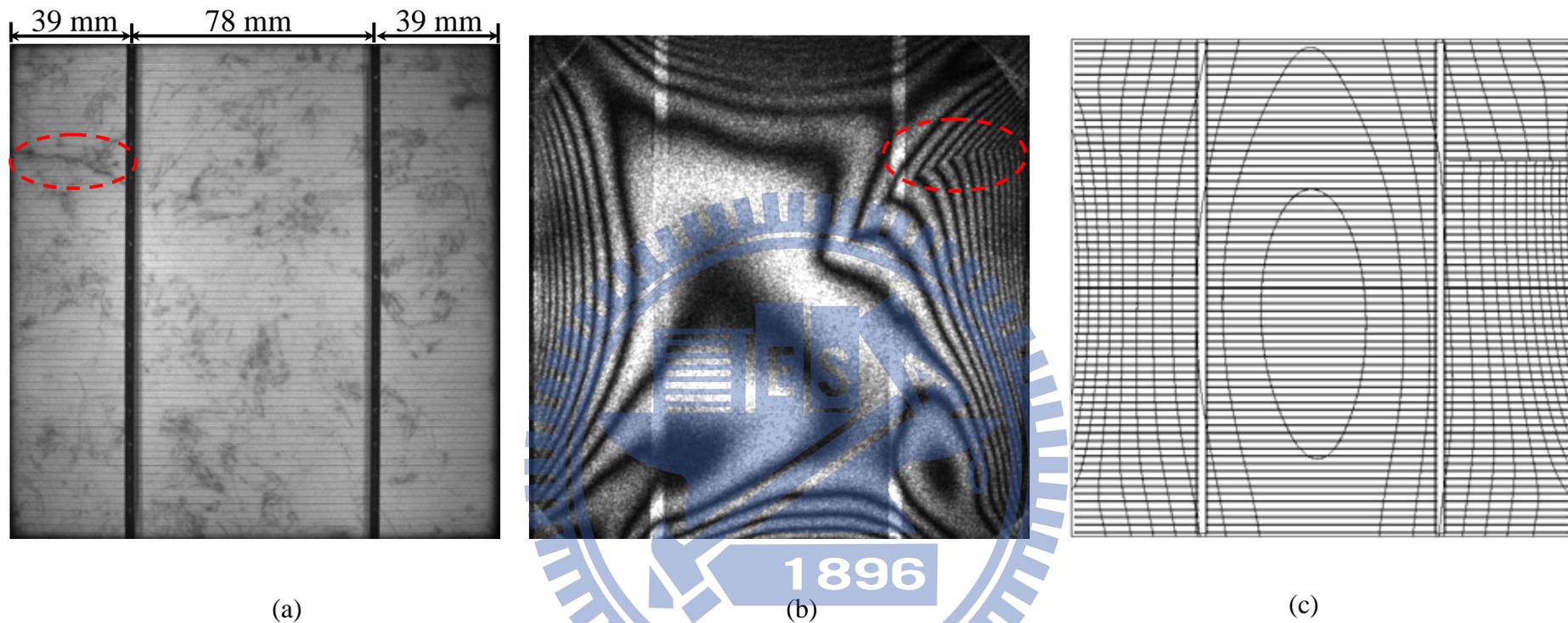
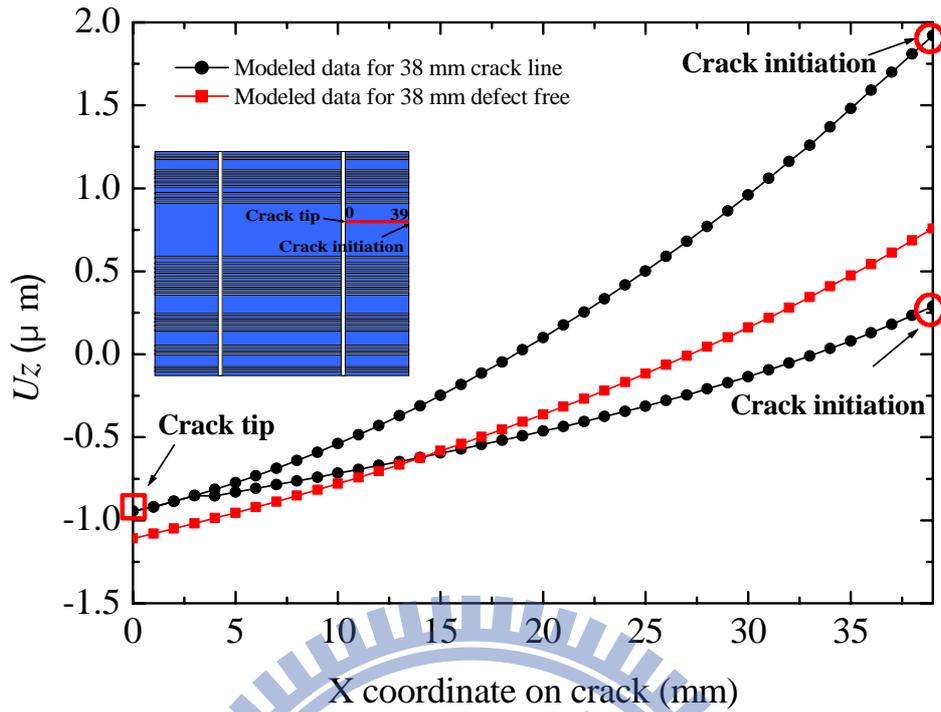
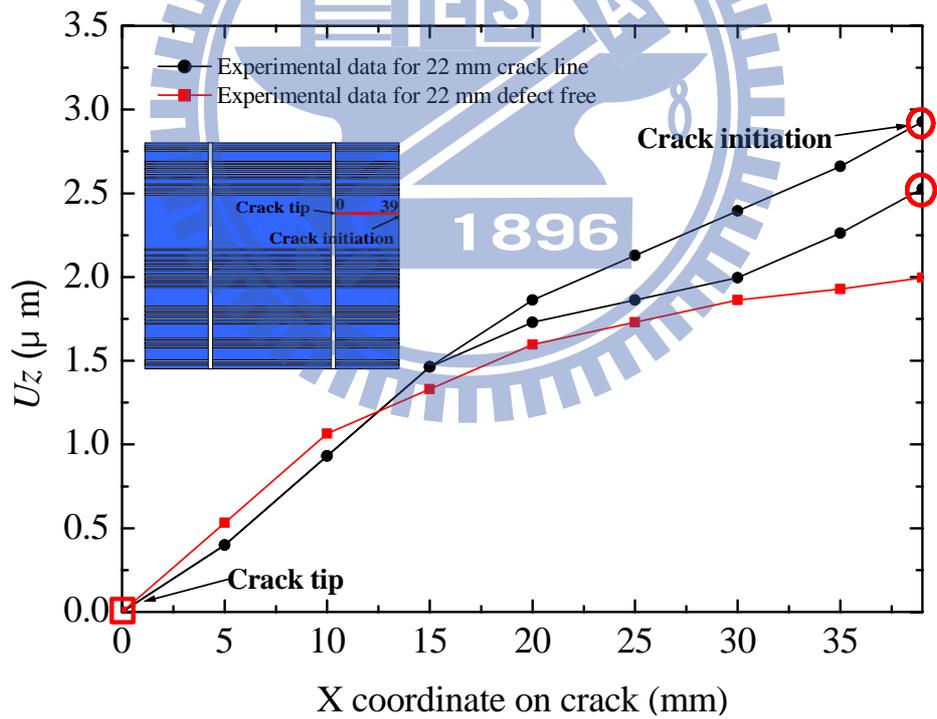


圖 5.3 長 38 mm 的貫穿裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a) EL 影像(正面)，(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)，(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖，位移範圍從 -2.1 至 2 mm，間隔為 0.266 μm 。



(a)



(b)

圖 5.4 長度 38 mm 的貫穿裂縫升溫 0.4 (32.4-32)，裂縫面上的位
移變化：(a) 模擬數據、(b) 實驗數據。

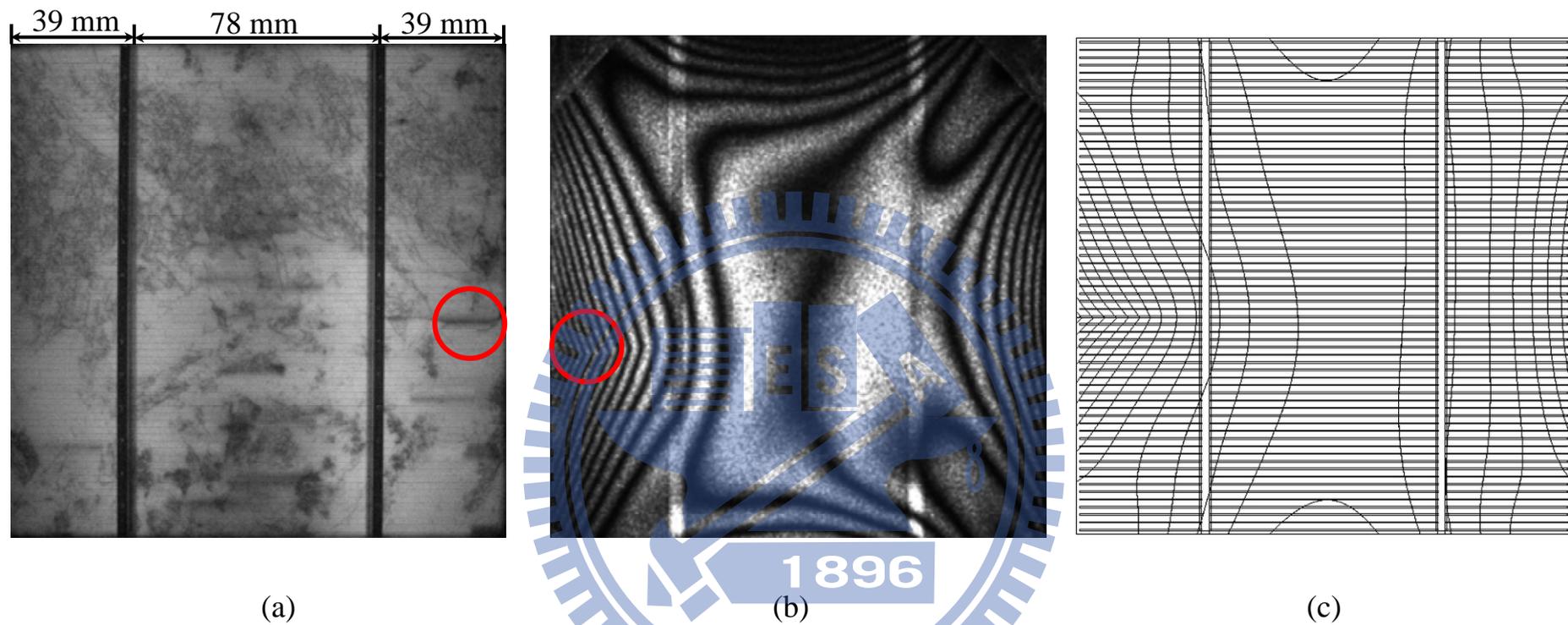
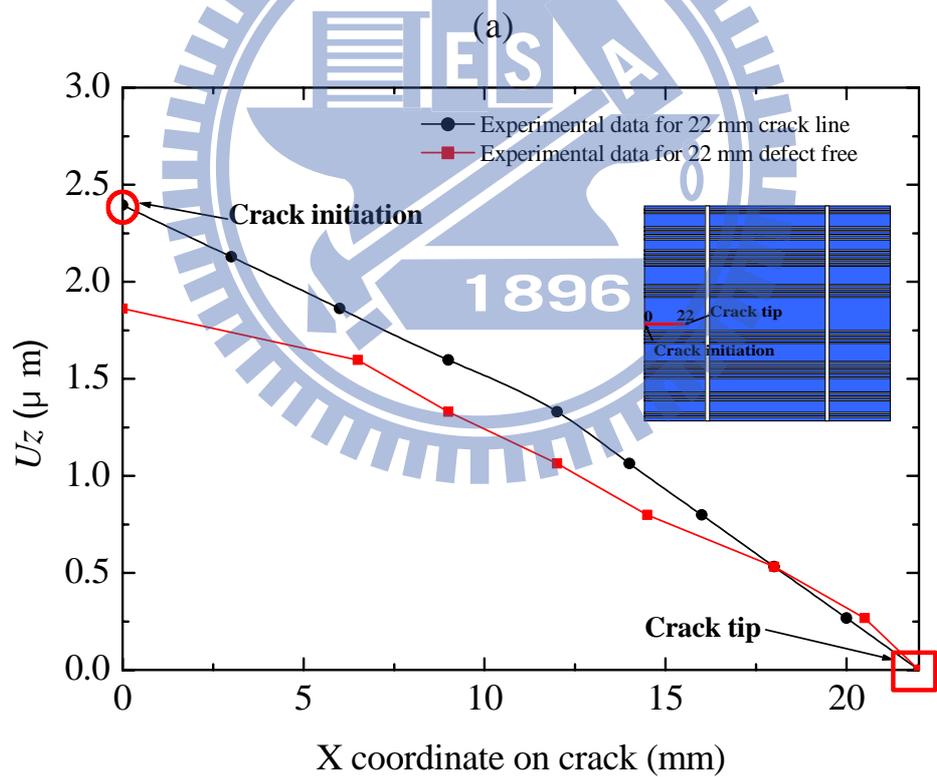
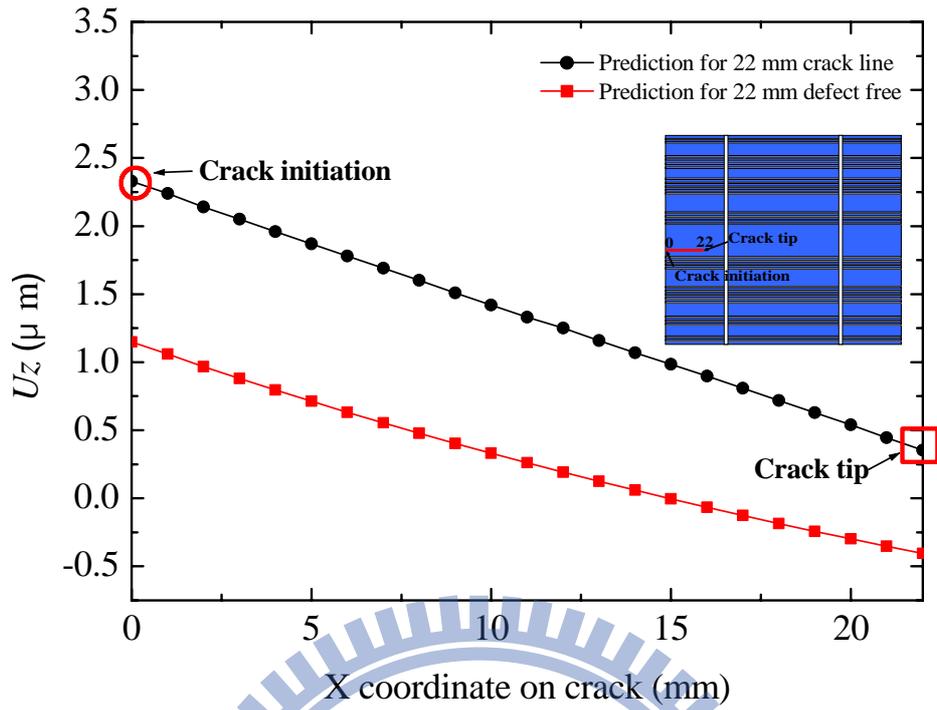


圖 5.5 長 22 mm 的表面裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從-1.8 至 2.1 mm，間隔為 0.266 μm 。



(b)

圖 5.6 長度 22 mm 的表面裂縫升溫 0.4 (32.4-32)，裂縫面上的位移變化：(a) 模擬數據、(b) 實驗數據。

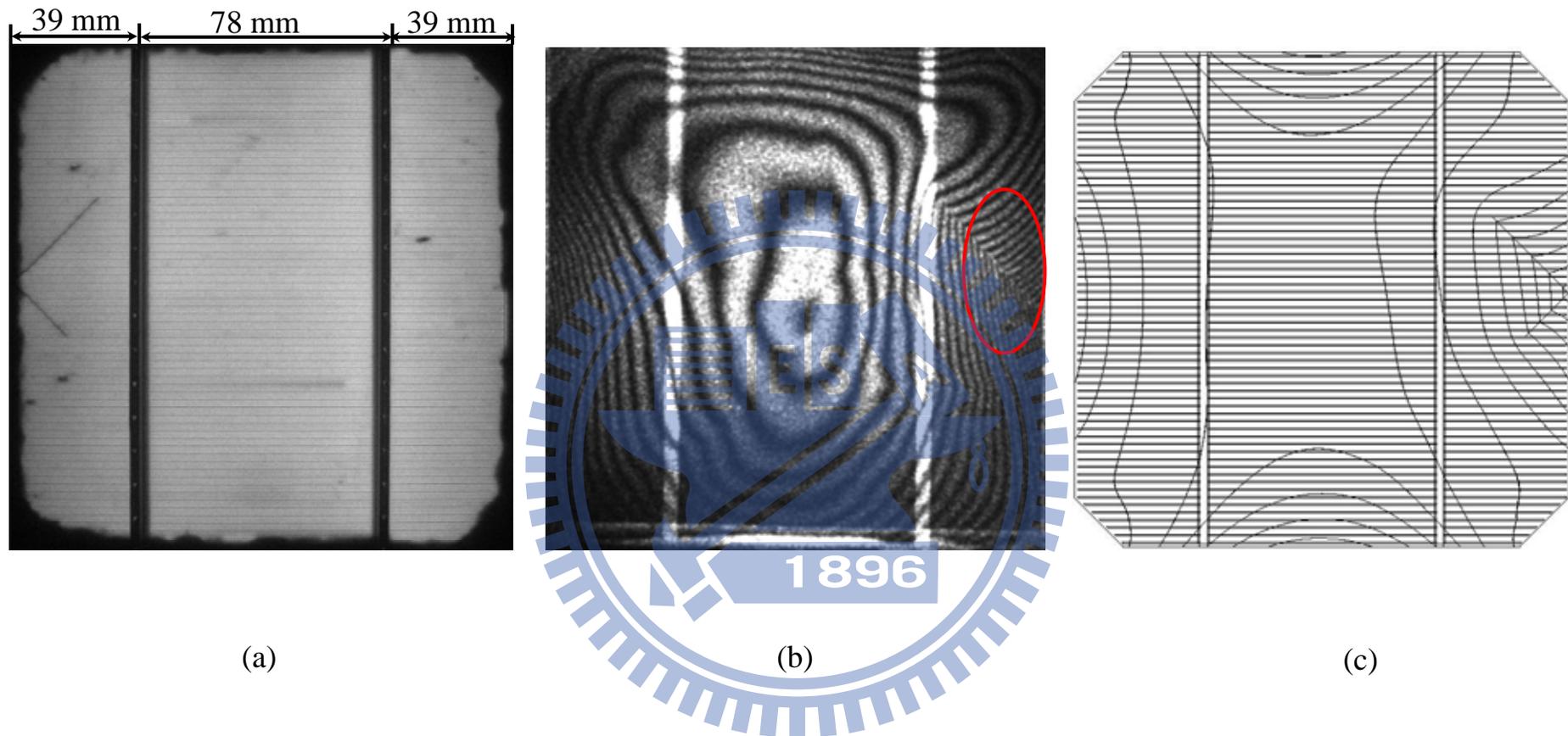


圖 5.7 長 18 mm 的表面裂縫在單晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從-1.3 至 1.2 μm ，間隔為 0.266 μm 。

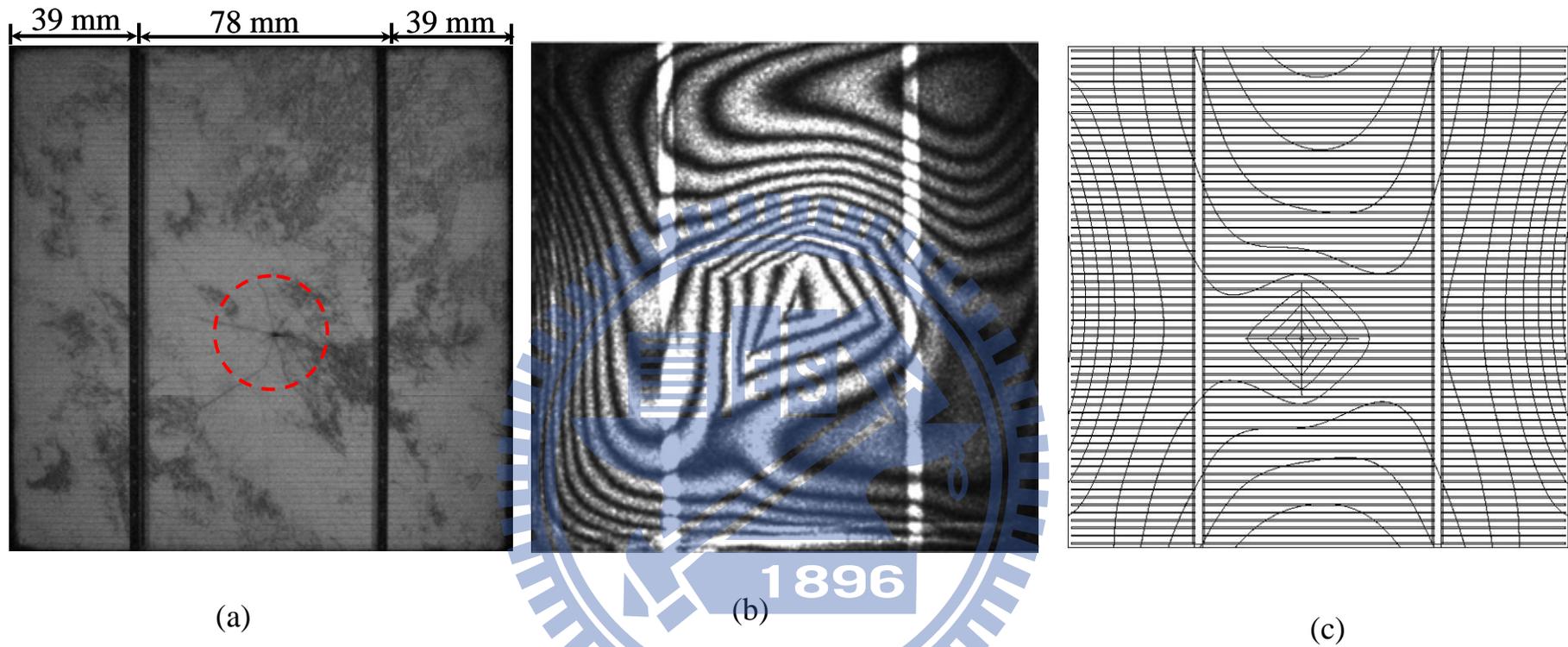


圖 5.8 直徑 33 mm 的內部裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從-1.6 至 1.2 μm ，間隔為 0.266 μm 。

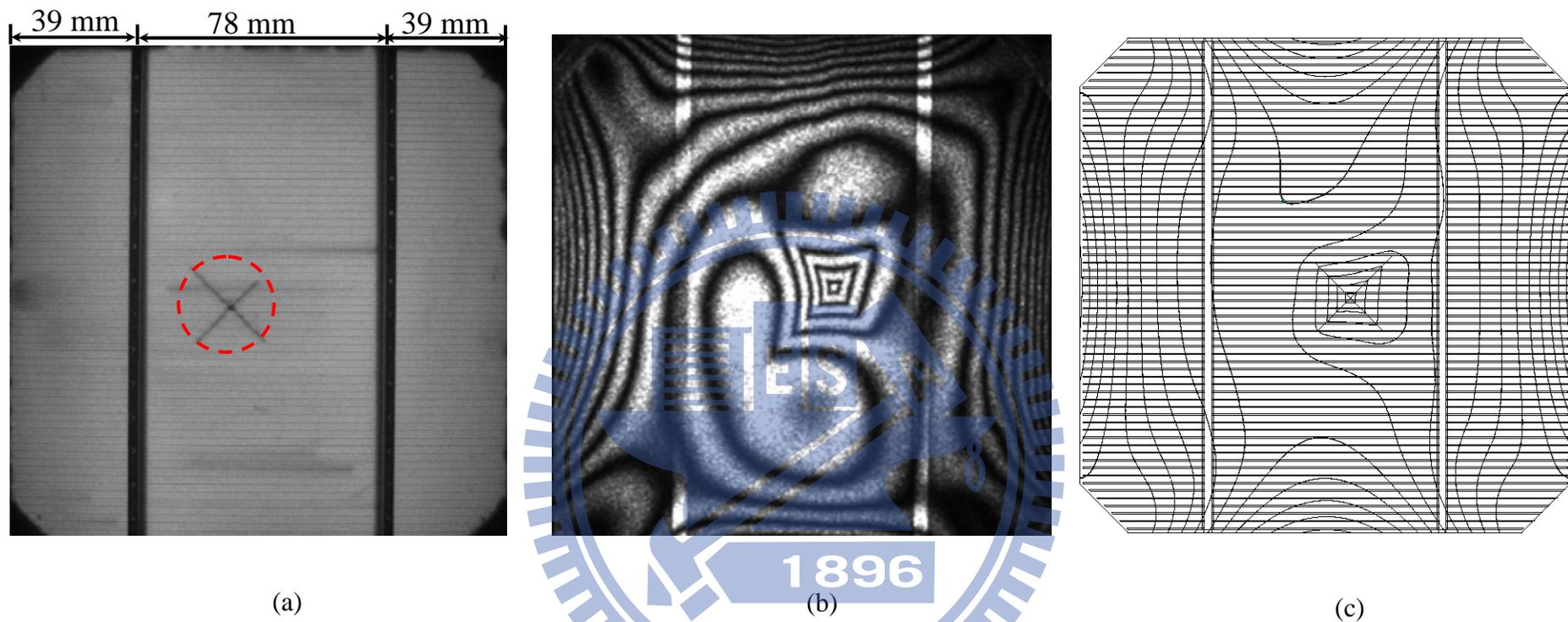
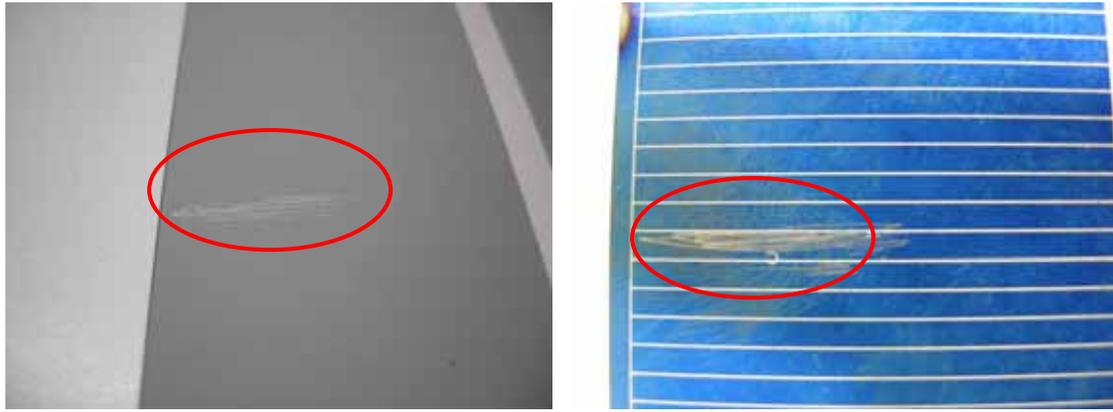


圖 5.9 直徑 30 mm 的內部裂縫在多晶矽太陽能電池邊緣上，(a)EL 影像(正面)、(b)在 ESPI 量測系統中以升溫間隔 0.4 (32 至 32.4)拍下的光斑干涉條紋影像(反面)、(c)以 FEM 模擬分析所呈現的面外位移等高線分佈圖。位移範圍從-0.6 至 1.1 μm ，間隔為 0.266 μm 。



(a)



(b)

圖 5.10 太陽能電池表面缺陷示意圖；(a)表面刮傷、(b)表面裂縫。

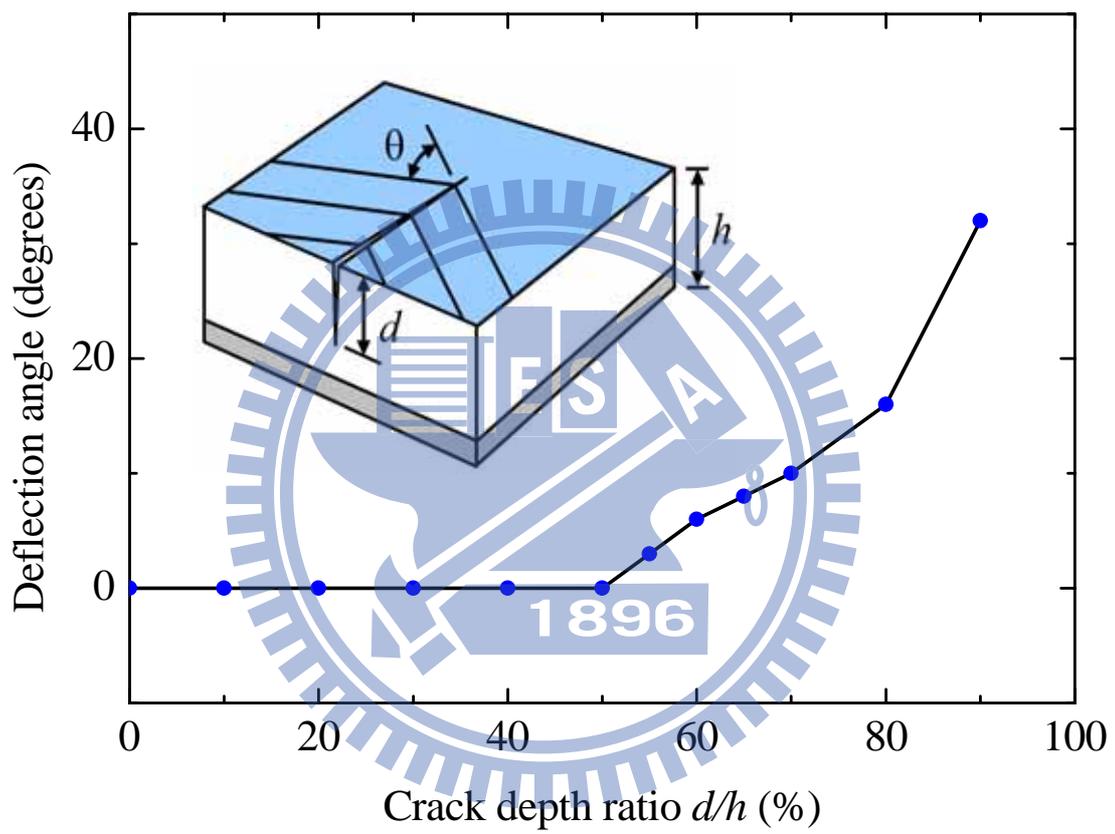


圖 5.11 模擬長 25 mm 的裂縫受熱後所產生的等高線，偏斜角度為表面裂縫的深度比例的函數。

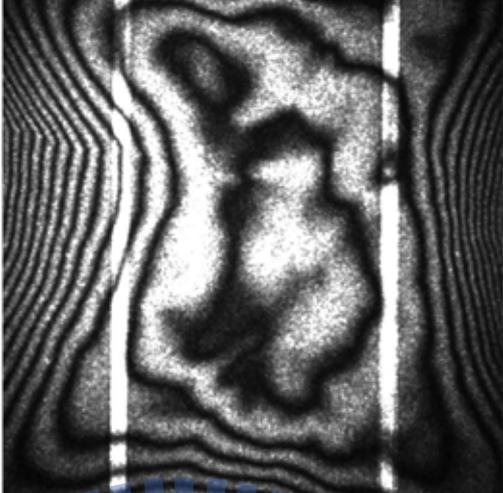
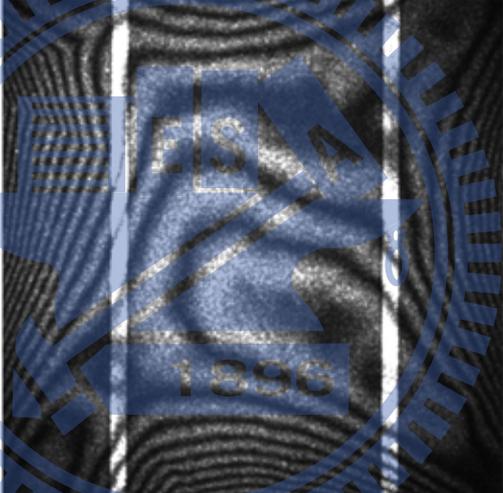
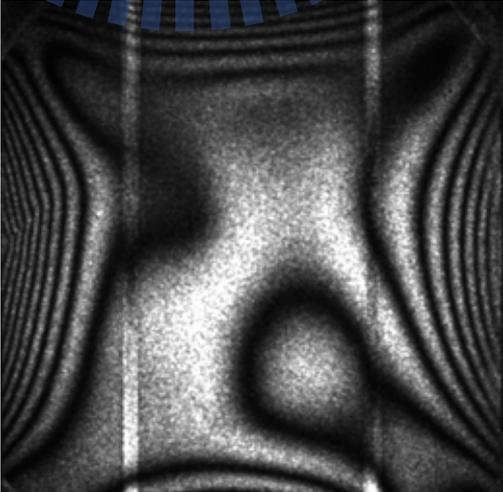
(mm)	ESPI image
<20	
<15	
<10	

圖 5.12 不同裂縫長度的 ESPI 影像

第六章 結論與展望

6.1 結論

本研究應用電子光斑干涉術(ESPI)，成功地開發出一種檢測太陽能電池裂縫瑕疵的有效方法，具有快速、全域及非破壞性檢測等優點。研究方法以 ESPI 影像中代表面外位移的光斑干涉條紋，作為判斷太陽能電池上是否有裂縫的依據，在模擬分析及實驗上都獲得充分的驗證。以下針對本研究結果歸納出幾點結論：

1. 由於矽晶與背面鋁層之間的矽鋁共晶結構具有較高的破壞韌性，太陽能電池上的裂縫大都屬於非貫穿型的表面裂縫。
2. 有缺陷的試片經過均勻加熱所產生的熱變形，會在裂縫區域產生特殊的特徵。表面裂縫為不連續且呈 V 形狀，類似 chevron 標誌的輪廓；貫穿型裂縫的干涉條紋則在裂縫面上斷裂，且裂縫兩側的數目不相等。
3. 表面裂縫的深度必須達到整體 60% 以上，才能被辨識，裂縫長度最短則需 5-10 mm，裂縫寬度沒有特別的限制，所製作的太陽能電池試片之人工裂縫寬度都小於 5 μm 。
4. 矽晶太陽能電池的表面裂縫屬於不穩定成長的裂縫，受到微小溫度擾動或自身重量，即會沿厚度方向成長。SEM 觀察顯示表面裂縫在厚度方向延伸，至矽鋁共晶結構層會發生停頓或彎折。
5. 本研究方法不會檢出不影響機械性質的表面刮傷及其他本質的缺陷，可與裂縫缺陷區隔。
6. 本研究方法中加熱太陽能電池的時間不超過 1 秒，可適用於快速的線上檢測。

6.2 未來展望

本研究方法已經在數值模擬及實驗結果上得到驗證，未來工作方向是將此檢測系統模組化，更能符合商業效益。除此之外，可以改進太陽能電池的加熱方式，以紅外線或高能量的強度調制光照射太陽能電池[11]。當太陽能電池被高強度調制光照射而產生熱變形，ESPI 量測裝置同時拍下其干涉條紋，並進行即時的判別，實驗架構的示意圖如圖 6.1 所示。此方法的優點在於檢測太陽能電池時，電池能沿著輸送線一直前進，不必因為檢測程序而停滯。

另一方面，還可對太陽能電池上的裂縫做破壞理論的研究。裂縫在基材上形成時，裂縫尖端的應力強度因子及裂縫長度皆為造成整體性破壞的關鍵，未來可針對這些因素作分析及歸納，進一步討論太陽能電池的破壞強度，制訂結晶矽太陽能電池上容許裂縫尺寸的規範。

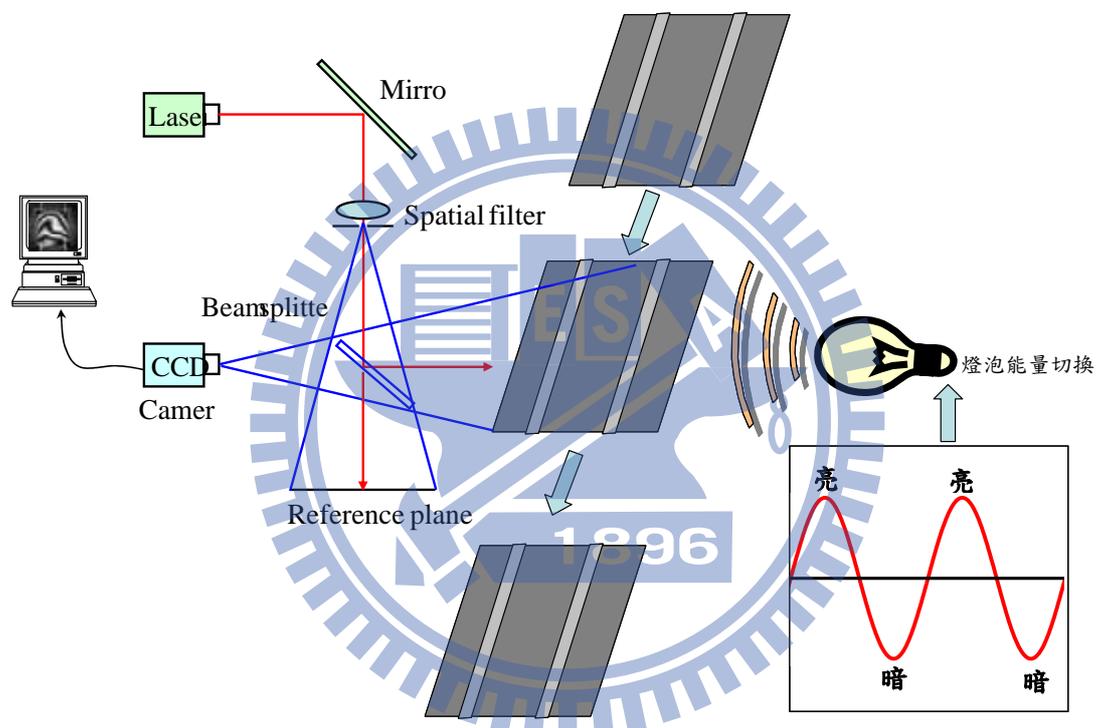


圖 6.1 以脈衝方式加熱太陽能電池示意圖

參考文獻

- [1] 益通光能科技股份有限公司, <http://www.e-tonsolar.com/>.
- [2] 茂迪股份有限公司, <http://www.motech.com.tw/>.
- [3] Z. Fu, Y. Zhao, Y. Liu, Q. Cao, M. Chen, J. Zhang, and J. Lee ,
“Solar cell crack inspection by image processing,” *Proc. Int. IEEE Conf. Business of Electronic Product Reliability and Liability, Shanghai, China*, pp. 77-80, 2004.
- [4] 陳心怡，太陽能電池板表面瑕疵檢測，國立中央大學資訊工程研究所碩士論文，桃園縣，台灣，2006。
- [5] 蔡欣儒，太陽能電池板的尺寸量測與線路瑕疵檢測，國立中央大學資訊工程研究所碩士論文，桃園縣，台灣，2006。
- [6] M. Kasai, H. Shimizu, T. Sawada, and Y. Gonhshi,
“Non-destructive observation of stacking faults of silicon-wafer by means of photoacoustic microscopy,” *Analytical Sciences*, Vol. 1, pp. 107-109, 1985.
- [7] L. Berquez, D. Marty-Dessus, and J. L. Franceschi, “Defect detection in silicon wafer by photoacoustic imaging,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42, pp. 1198-1200, 2003.
- [8] O. Breitenstein, M. Langenkamp, O. Lang, and A. Schirmacher,
“Shunt due to laser scribing of solar cell evaluated by highly sensitive lock-in thermography,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 65, pp. 55-62, 2001.
- [9] O. Breitenstein and M. Langenkamp, “Lock-in thermography -basics and use for functional diagnostics of electronic

- components,” *Springer Series Advanced Microelectronics*, Vol. 10 Springer, Berlin, 2003.
- [10] O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina, M. H. Al Rifai and M. Werner, “Shunt types in crystalline silicon solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 12, pp. 529-538, 2004.
- [11] E. D. Dunlop and D. Halton, “Radiometric pulse and thermal imaging methods for the detection of physical defects in solar cells and Si wafer in a production environment,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 82, pp. 467-480, 2004.
- [12] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, and Y. Uraoka , “Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon cells by electroluminescence,” *Applied Physics Letters*, Vol. 86, 262108, 2005.
- [13] P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schaffer, W. Warta, and S. W. Glunz, “Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, 123110, 2007.
- [14] M. Kasemann, D. Grote, B. Walter, W. Kwapil, T. Trupke, Y. Augarten, R. A. Bardos, E. Pink, M. D. Abbott, and W. Warta, “Luminescence imaging for the detection of shunts on silicon solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research & Applications*, Vol. 16, pp. 297-305, 2008.
- [15] T. Trupke, E. A. Bardos, M. C. Schubert, and W. Warta, “Photoluminescence imaging of silicon wafers,” *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 044107, 2006.
- [16] M. Kasemann, M. C. Schubert, M. The, M. Köber, M. Hermie, and

- W. Warta, "Comparison of luminescence imaging and illuminated lock-in thermography on silicon solar," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 224102, 2006.
- [17] K. Ramspeck, K. Bothe, D. Hinken, B. Fischer, J. Schomidt, and R. Brendel, "Recombination current and series resistance imaging of solar cells by combined luminescence and lock-in thermography," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, 153502, 2007.
- [18] A. Belyaev, O. Polupan, W. Dallas, S. Ostapenko, D. Hess, and J. Wohlgemuth, "Crack detection using resonance ultrasonic vibrations in full-Size crystalline silicon wafers," *Applied Physics Letters*, Vol. 88, 111907, 2006.
- [19] W. Dallas, O. Polupan, and S. Ostapenko, "Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers," *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, pp. 852-858, 2007.
- [20] J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Holographic and video techniques applied to engineering measurements," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 4, pp. 349-354, 1971.
- [21] C. Wykes, "Use of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) in the measurement of static and dynamic surface displacement," *Optical Engineering*, Vol. 21(3), pp. 400-406, 1982.
- [22] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry*, 2nd ed. Chap. 2, Cambridge: Cambridge University Press 1989.
- [23] A. Martínez, R. Rodríguez-Vera, J. A. Rayas, and H. J. Puga, "Fracture detection by grating moiré and in-plane ESPI techniques," *Optical and Lasers Engineering*, Vol. 39, pp. 525-536,

1982.

- [24] R. R. Cordero and F. Labbé, “Measuring out-of-plane displacements by electronic speckle-pattern interferometry (ESPI) and whole-field subtractive moiré,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 825-830, 2006.
- [25] R. Spooren, “Standard charge-coupled device cameras for video speckle interferometry,” *Optical Engineering*, Vol. 33(3), pp. 889-896, 1994.
- [26] G. Gülker, K. Hinsch, C. Hölscher, A. Kramer, and H. Neunaber, “Electronic speckle pattern interferometry system for in situ deformation monitoring on building,” *Optical Engineering*, Vol. 29(7), pp. 816-820, 1990.
- [27] P. Aswondt, C. D. Schmidt, D. Zielke, and S. Schubert, “ESPI solution for non-contacting MEMS-on-wafer testing,” *Optics and lasers in Engineering*, Vol. 40, pp. 501-515, 2003.
- [28] O. J. Løberg and K. Høgmoen, “Use of modulated reference in electronic speckle pattern interferometry,” *Journal of physics E: Scientific Instruments*, Vol. 9, pp. 847-851, 1976.
- [29] O. J. Løberg and K. Høgmoen, “Vibration phase mapping using electronic speckle pattern interferometry,” *Applied Optics*, Vol. 15, pp. 2701-2704, 1976.
- [30] K. Høgmoen and O. J. Løberg, “Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry,” *Applied Optics*, Vol. 16, pp. 1869-1875, 1977.
- [31] S. Nakadate, “Vibrations measurement using phase-shifting speckle-pattern interferometry,” *Applied Optics*, Vol. 25, pp.

4162-4167, 1986.

- [32] W.-C. Wang, C.-H. Hwang, and S. Y. Lin, "Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods," *Applied Optics*, Vol. 35, pp. 4502-4509, 1996.
- [33] R. Jones, "The design and application of speckle pattern interferometer for total plane strain field measurement," *Applied Optics*, Vol. 8(5), pp. 215-219, 1976.
- [34] C. C. Ma, C. H. Huang, "The Investigation of Three-Dimensional Vibration for Piezoelectric Rectangular Parallelepipeds by Using the AF-ESPI Method," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 48, pp. 142-153, 2001.
- [35] J. A. Leemdertz and J. N. Butters, "An image-shearing speckle pattern interferometer for measuring bending moments," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 6, pp. 132-135, 1973.
- [36] Y. Y. Hung and C.Y. Liang, "Image-shearing camera for direct measurement of surface strains," *Applied Optics*, Vol. 18(7), pp. 1046-1051, 1979.
- [37] S. Winther, "3D strain measurement using ESPI," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 8, pp.45-57, 1988.
- [38] K. Nassim, L. Jorannes, A. Corent, S. Dilhaire, E. Schaub, and W. Claeys, "Thermomechanical deformation imaging of power devices by electronic speckle pattern interferometry," *Microelectronics Reliability*, Vol. 38, pp. 1341-1345, 1998.
- [39] E. Hack and R. Bronnimann, "Electronic speckle pattern Interferometry deformation measurement on lightweight structures under thermal load," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, pp.

213-222, 1999.

- [40] K. S. Kim, K. S. Kang, Y. J. Kang, and S. K. Cheong, "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 35, pp. 639-643, 2003.
- [41] R. Wang and M. Kido, "High temperature fatigue deformation behaviors of thermally sprayed steel measured with electronic speckle pattern interferometry method," *Materials Research Bulletin*, Vol. 38, pp. 1401-1411, 2003.
- [42] R. Wang and M. Kido, "Using ESPI system to measure high temperature fatigue deformation of ceramics thermally sprayed SUS304 steel," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp.1389-1395, 2004.
- [43] E. A. Zarate, E. G. Custodio, G. Carlos, T. Palacios, R. Rodriguez-Vera, J. Hector, and Palacios-Soberanes, "Defect detection in metals using electronic speckle pattern interferometry," *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 88, pp. 217-225, 2005.
- [44] R. Williams, "Becquerel photovoltaic effect in binary compounds," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 32(5), pp. 1505-1514, 1960.
- [45] 太陽能電池發展歷史，http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Fritts
- [46] D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson, "A new silicon $p-n$ junction photocell for converting solar radiation into electrical power," *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, pp. 676, 1954.
- [47] J. Nelson, *The physics of solar cells*, Imperial College Press 2003.
- [48] 黃惠良，蕭錫鍊，周明奇，林堅楊，江雨龍，曾百亨，李威儀，

- 李世昌，林唯芳，太陽電池 solar cells，五南圖書出版公司，2008。
- [49] 林明獻，太陽能電池技術入門(修訂版)，全華圖書股份有限公司，2009。
- [50] 林明獻，矽晶圓半導體材料技術(修訂版)，全華圖書股份有限公司，2007。
- [51] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, and T. W. Kenny, “What is the Young’s modulus of silicon,” *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 19(2), pp. 229-238, 2010.
- [52] J. A. Hauch, D. Holland, M. P. Marder, and Harry L. Swinney, “Dynamic fracture in single crystal silicon,” *Physical Review Letters*, Vol. 82(19), pp. 3823-3826, 1999.
- [53] B. Wong and R. Holbrook, “Microindentation for fracture and stress-corrosion cracking studies in single-crystal silicon,” *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 134, pp. 2254-2256, 1987.
- [54] G. K. Teal and J. B. Little, “Growth of germanium single crystals,” *Physical Review Letters*, Vol. 78, pp. 647, 1950.
- [55] I. Chasiotis, S. W. Cho, and K. Jonnalagadda, “Fracture toughness and subcritical crack growth in polycrystalline silicon,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, pp. 714-722, 2006.
- [56] P. W. Bridgman, “Certain Physical Properties of Single Crystals of Tungsten, Antimony, Bismuth, Tellurium, Cadmium, Zinc, and Tin,” *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* Vol. 60, No. 6 pp. 305-383, 1925.
- [57] D. C. Stockbarger, “The production of large single crystals of

- lithium fluoride,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 7, pp. 133, 1936.
- [58] J. Szlufcik, S. Sivoththamna, J. F. Nijs, R. P. Mertens, and Roger Van Overstraeten, “Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85(5), pp. 711-730, 1997.
- [59] J. Lee, N. Lakshminarayan, S. Dhungel, K. Kim, and J. Yi, “Optimization of fabrication process of high-efficiency and low-cost crystalline silicon solar cell for industrial applications,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 256-261, 2009.
- [60] J. Szlufcik, F. Duerinckx, J. Horzel, E. Van Kerschaver, H. Dekkers, S. De Wolf, P. Choulat, C. Allebe, and J. Nijs, “High-efficiency low-cost integral screen-printing multicrystalline silicon solar cells,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 74, pp. 155-163, 2002.
- [61] A. Parretta, A. Sarno, P. Tortora, H. Yakubu, P. Maddalena, J. Zhao, and A. Wang, “Angle-dependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells,” *Optics Communications*, vol. 172, pp. 139-151, 1999.
- [62] C. Leguijt, P. Lolgen, J. A. Eikelboom, A. W. Weber, F. M. Schuurmann, W. C. Sinke, P. F. A. Alkemade, P. M. Sarro, C. H. M. Marée, and L. A. Verhoef, “Low temperature surface passivation for silicon solar cells,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 40, pp. 297-345, 1996.
- [63] A. Luque and S. H. Wiley, “Handbook of photovoltaic science and engineering,” *West Sussex*, pp. 268, 2003.

- [64] B. Merle and M. Göken, "Fracture toughness of silicon nitride thin films of different thicknesses," *Acta Materialia* Vol. 59, pp. 1772-1779, 2011.
- [65] Y. Ren and D. C. C. Lam, "Characterizations of elastic behaviors of silicon nitride thin films with varying thicknesses," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 467, pp. 93-96, 2007.
- [66] P. H. Wu, I. K. Lin, H. Y. Yan, K. S. Ou, K. S. Chen, and X. Zhang, "Mechanical property characterization of sputtered and plasma enhanced chemical deposition (PECVD) silicon nitride films after rapid thermal annealing," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 168, pp. 117-126, 2011.
- [67] K. Matoy, H. Schönherr, T. Detzel, T. Schöberl, R. Poppan, C. Motz, and G. Dehm, "A comparative micro-cantilever study of the mechanical behavior of silicon based passivation films," *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 247-256, 2009.
- [68] K. Matoy, H. Schönherr, T. Detzel, T. Schöberl, R. Poppan, C. Motz, and G. Dehm, "A comparative micro-cantilever study of the mechanical behavior of silicon based passivation films," *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 247-256, 2009.
- [69] H. Huang, K. J. Winchester, A. Suvorova, B. R. Lawn, Y. Liu, X. Z. Hu, J. M. Dell, and L. Faraone, "Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 435-436, pp. 453-459, 2006.
- [70] M. P. Hughey and R. F. Cook, "Massive stress changes in plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon nitride films on

thermal cycling,” *Thin Solid Films*, Vol. 460, pp. 7-16, 2004.

- [71] 林正文，商用型多晶矽太陽能電池之正面電極型態最佳化研究，國立成功大學光電科學與工程研究所，台南市，台灣，2007。
- [72] P. Doshi, J. Mejia, K. Tate and A. Rohatgi, “Integration of screen-printed and rapid thermal processing technologies for silicon solar cell fabrication,” *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 17(8), pp. 404-409, 1996.
- [73] J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green, “High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 65, pp. 429-435, 2001.
- [74] A. V. Mazur and M. M. Gasik, “Thermal expansion of silicon at temperatures up to 1100°C,” *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 723-727, 2009.
- [75] V. A. Popovich, M. Janssen, I. M. Richardson T. van Amstel and J. Bennett, “Microstructure and mechanical properties of aluminum back contact layers,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 95, pp. 93-96, 2011.
- [76] M. M. Hilali, J. M. Gee, and P. Hacke, “Bow in screen-printed back-contact industrial silicon solar cells,” *Solar Energy Material & Solar Cells*, Vol. 91, pp.1228-1233, 2007.
- [77] M. F. Hafiz and T. Kobayashi, “Fracture toughness of eutectic Al-Si casting alloy with different microstructural features,” *Journal of Materials Science*, Vol. 31, pp. 6195-6200, 1996.
- [78] T. H. Cheng, P. S. Kuo, C. Y. Ko, C. Y. Chen and C. W. Liu, “Electroluminescence from monocrystalline silicon solar cell,”

Journal of Applied Physics, Vol. 105, 106107, 2009.

- [79] A. T. Zehnder and M. J. Viz, “Fracture mechanics of thin plates cracked and shells under combined membrane, bending and twisting loading,” *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 88, pp. 37-48, 2005.
- [80] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and applications*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
- [81] K. Pramod, *Optical measurement techniques and applications*, Artech House Inc., 1997.
- [82] P. Meinlschmidt, K. D. Hinsch, R. S. Sirohi, and B. J. Thompson, “Electronic speckle pattern interferometry principle and practice,” *SPIE Optical Engineering Press*, 1996.

