

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果報告

Wavelength, polarization, and angle
dependence of solar-panel efficiency

光波長、偏振、入射角對於太陽能板效率的
影響

專題領域：光電領域

組 別：A531

指導教授：黃衍介

組員姓名：黃睿宇、丁書鵬

研究期間：113年9月2日至114年5月3日止，共8個月

Abstract

This study aims to investigate the effects of light wavelength, polarization state, and angle of incidence on the photovoltaic conversion efficiency of a solar panel. The experiment utilized green (532 nm) and red (632.8 nm) laser sources, with systematic variation of their polarization directions and incident angles. To ensure measurement accuracy, the beam spot size and laser power were controlled so the solar panel operates within its linear response region. Experimental results indicate that, under the same power conditions, red light generates a higher photocurrent than green light, suggesting superior conversion efficiency. Additionally, TM-polarized light exhibited a notable increase in photocurrent near the Brewster angle, consistent with theoretical predictions. On the other hand, variations in polarization orientation had minimal influence on the performance of the PIN-structured solar panel used in this study. Based on these findings, the most efficient combination of wavelength, polarization, and incident angle can be determined to maximize photocurrent generation.

摘要

本研究旨在探討光波長、偏振狀態與入射角對太陽能板光電轉換效率的影響。實驗使用綠光（532 nm）與紅光（632.8 nm）雷射作為光源，並分別調變其偏振方向與入射角度，觀察在不同條件下太陽能板所產生的光電流變化。為確認量測的準確性，實驗先透過光斑面積與功率控制，確保太陽能板在線性響應範圍內運作。實驗結果顯示，紅光在相同功率下具有較高的光電流輸出，顯示其轉換效率優於綠光；而 TM 偏振光在接近布魯斯特角時，產生電流亦顯著上升，符合理論預期；至於偏振方向的改變，對本實驗所使用之 PIN 結構太陽能板影響極小。最後綜合以上結論，找出最有效率產生光電流的方式。

章節目錄

1.研究動機	1
2.研究方法	1
3.研究成果	1
3.1 光斑面積對光電流的影響	1
3.2 入射角對光電流的影響	3
3.3 入射功率與光電流應關係	4
3.4 偏振狀態對光電流的影響	8
4.總結&未來展望	9
5.參考文獻	10
6.心得感想	10

1. 研究動機

隨著無人機技術的迅速發展，其在各行業中的應用逐漸增多。然而無人機的飛行時間通常受限於其電池容量，這使得充電問題成為無人機運行的瓶頸。本研究提出利用雷射為無人機上裝設之太陽能板進行遠程充電，並探索光波長、偏振、入射角對充電效率的影響，嘗試找出有效率充電的方式。

2. 研究方法

本研究旨在探討光波長、偏振狀態與入射角對太陽能板效率的影響。實驗使用兩種不同波長的雷射光源(綠光：532 nm，紅光：632.8 nm)，並分別調變其偏振狀態與入射角度，觀察太陽能板所產生的光電流變化，並分析哪一組波長、偏振與入射角的組合可使太陽能板達到最佳光電轉換效率。

3. 研究成果

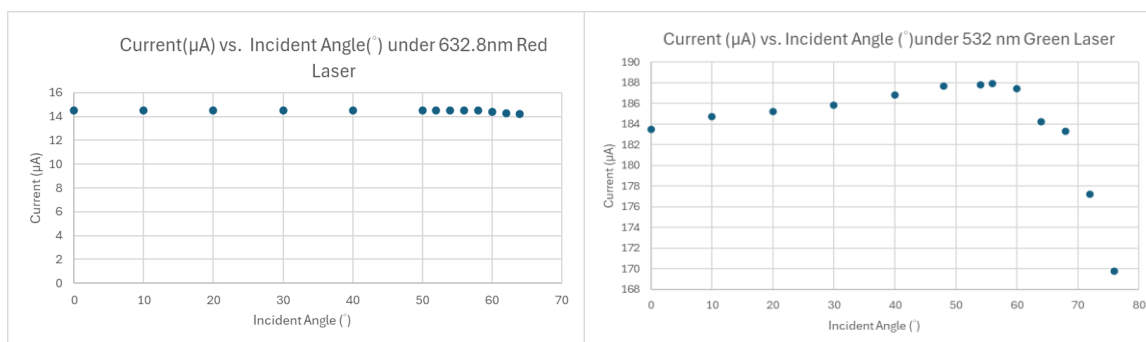
3.1 光斑面積對光電流的影響

在本實驗中，首先針對不同光斑照射面積進行測試，以確認太陽能板的響應是否處於線性區域。主要目的是確保後續在變更入射角時，光斑面積的變化不會對光電流造成顯著影響，以確保只有一個變因。在本實驗中，我們以固定功率的雷射垂直照射太陽能板，藉由改變凹透鏡與太陽能板之間的距離，進而改變光斑的面積，觀察太陽能板輸出的光電流變化。結果顯示電流皆未隨光斑面積變化而改變，顯示這兩組實驗範圍內，太陽能板所接收到的總入射能量保持不變，且尚未進入飽和區域。因此，本實驗結果說明太陽能板在此兩種雷射功率下尚未飽和，其電流輸出反映的是固定總能量下的線性響應，不受光斑面積影響。由於我們所有實驗皆是使用同一塊太陽能板，因此有了這個結論後，我們在後續作改變入射角實驗時便能忽略因旋轉造成光斑面積不同造成的影響。

3.2 入射角對光電流的影響

本段實驗旨在探討光線入射角度對太陽能板所產生光電流的影響。由於光入射角度會影響有效照射面積與反射率，因此可能導致太陽能板接收光能量的變化。由於入射角影響光在太陽能板表面的反射與吸收效率，特別是當光為 TM 偏振時，會在特定角度（布魯斯特角）產生最小反射、最大透射的現象，因此本實驗特別關注此現象對光電流的影響。為此，實驗前先確認兩種光源的偏振態：綠光（532 nm）為 TM 偏振光，紅光（632.8 nm）為 TE 偏振光，以利後續針對布魯斯特角效應進行分析。

實驗中分別以紅光與綠光雷射照射太陽能板，從 0° (垂直入射)開始調整入射角，並量測光電流，在3.1光斑面積對光電流的影響實驗中，已確認太陽能板在線性區工作，因此因入射角改變的光斑面積不會影響光電流。



光電流 vs. 入射角(紅光)

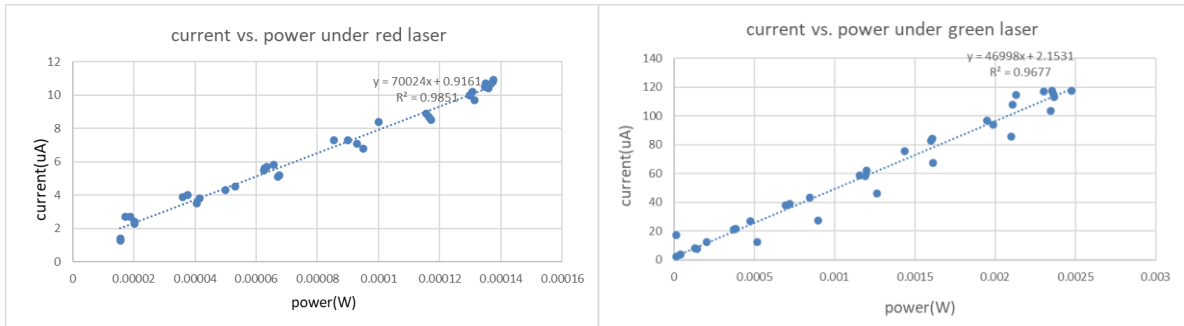
光電流 vs. 入射角(綠光)

實驗結果顯示，TE(紅光)偏振光的光電流隨入射角增加而下降，主要因為反射率升高，符合TE偏振光反射率隨角度增加而變大的情況。而TM(綠光)偏振光的光電流則在接近 56° 時出現局部最大值，即為布魯斯特角。此時TM光的反射率降至最小，幾乎全部入射能量進入太陽能板，導致光電流上升。

此結果證實了布魯斯特角效應對太陽能板吸收效率的影響，並顯示當TM偏振光以布魯斯特角入射時，太陽能板的光電轉換效率可達到最大。若光源為TE偏振光，則在垂直入射下時，太陽能板的光電轉換效率可達到最大。

3.3 入射功率與光電流之對應關係

本實驗為不同波長光源(532 nm 綠光與632.8 nm 紅光)在相同功率下對太陽能板光電流效率的比較。以偏振調整功率，在同樣的偏振角度下，即可比較功率和電流。DET36A 安裝於光路最末端，用以準確評估不同波長雷射的實際輸出功率。在量測過程中，無論是紅光或綠光的資料組皆採用 $10\text{ k}\Omega$ 電阻作為負載電阻，透過量測 DET36A 兩端電壓，再除以電阻與該波長的響應度 (responsivity) 來計算雷射功率。根據 DET36A 的 spec sheet，其在532 nm 綠光的響應度為約 0.2 A/W ，在632.8 nm 紅光時則為 0.35 A/W ，對應的功率可計算為： $\text{功率} = \text{電壓} \div \text{電阻} \div \text{響應度}$ 。



電流對功率作圖(紅光)

電流對功率作圖(綠光)

由圖三與圖四，得其線性相關係數 R^2 ，皆大於0.96，顯示在目前的功率範圍下，太陽能板尚未進入飽和區域，仍呈現良好的線性響應。接著觀察回歸直線的斜率，可發現紅光資料組的斜率約為0.07A/W，而綠光資料組的斜率約為0.047A/W，代表在相同的輸入功率條件下，紅光可產生的光電流大約是綠光的1.49倍，顯示紅光對本實驗所使用太陽能板的轉換效率更高。這個結果乍看之下與直覺相反，因為綠光的波長較短、能量較高，理應更容易激發電子產生光電效應。

為釐清背後物理原因，需從量子觀點及太陽能板內部結構兩方面來探討。首先從光子能量出發，可使用愛因斯坦光電效應公式 $E=hc/\lambda$ 進行計算。以 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ， $c=3.00 \times 10^8 \text{m/s}$ 為定值，532 nm 綠光光子能量約為 2.33 eV，而 632.8 nm 紅光光子能量約為1.96 eV。兩者皆高於矽太陽能板的能隙約 1.1 eV，故都具備足夠能量激發電子。然而，在總功率固定的情況下，光子能量越低，單位功率下可含更多光子數量。我們可將總能量 E 寫成 $E=Nhc/\lambda$ ，其中 N 為光子總數， h 與 c 為常數，因此 N 與波長 λ 成正比，也就是紅光能帶來較多光子數，若這些光子都能有效產生電子電洞對並被收集，則光電流反而會較大。

另一個值得關注的點是本實驗光電流數據隨功率增加呈現穩定線性，說明目前雷射強度尚未造成太陽能板的飽和。在飽和情況下，即使入射光功率增加，由於載子飽和或內建電場無法再有效收集額外產生的光生電子，導致光電流增幅趨緩，但目前未觀察到這種現象。綜合上述分析，我們可以理解本實驗結果之所以呈現紅光效率高於綠光的現象，是因為在相同功率下，紅光能激發出更多的游離電子與電洞。

3.4 偏振狀態對光電流的影響

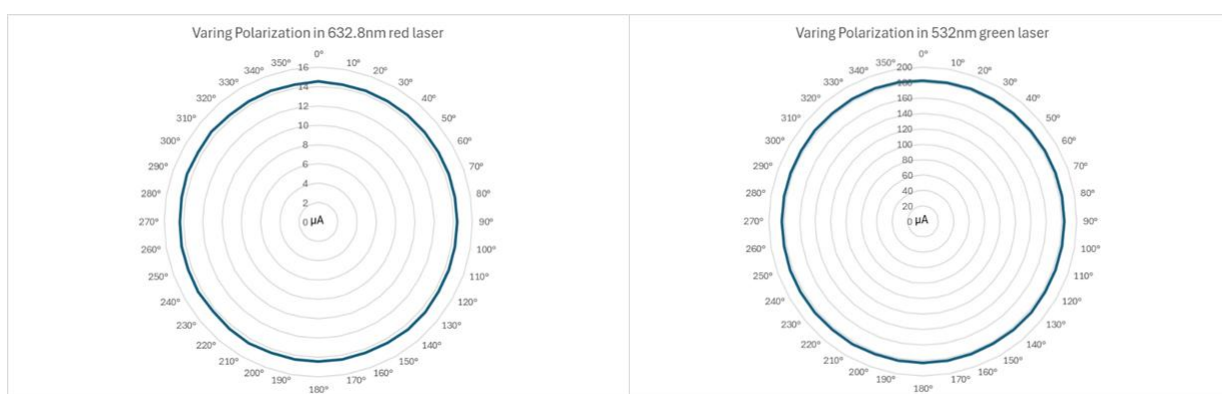
本段實驗旨在探討偏振方向與太陽能板表面結構的相對關係對光電流的影響。線偏振光的電場方向可能影響其在太陽能板表面的反射與吸收效率，因此本實驗透過改變偏振角度以驗證其是否影響太陽能板的輸出表現。

實驗中分別使用綠光與紅光雷射直接照射太陽能板，並透過繞法線軸垂直旋轉太陽能板的方式改變偏振方向相對於表面結構的角度。旋轉角度從 0° 至 360° ，每隔 10°

記錄光電流，代表不同偏振角下的光電響應。

實驗結果顯示，無論紅光或綠光，在不同偏振角下所產生的光電流變化極小，整體幾乎維持穩定，沒有明顯週期性變化或極值出現。此現象顯示本實驗使用的太陽能板對入射光的偏振方向不具顯著敏感性，推測其表面結構或材料性質對偏振無選擇性反應。此結果說明，在實際應用中，該型太陽能板在接受光源（包含各種偏振方向）時能保持穩定輸出，具有良好的偏振容忍度。

其對偏振不敏感之原因為此太陽能板是 PIN 結構，PIN 太陽能電池的基本結構是從上到下：P 型半導體、I (intrinsic) 層、N 型半導體，屬於垂直堆疊、結構對稱性強的設計。因此，對於線偏振光（特別是法向入射或近法向入射情況），其吸收率與電場方向的關聯性不大。



光電流在不同偏振角下的變化(紅光)

光電流在不同偏振角下的變化(綠光)

4. 總結&未來展望

實驗結果顯示，在確認太陽能板於本實驗條件下具有良好線性響應的前提下，在波長方面，紅光在相同功率下產生的光電流略高於綠光，顯示其在本太陽能板中的轉換效率較佳，因波長較長，光子數量較多，能激發較多電子產生更大光電流；入射角方面，TM 偏振（綠光）在接近布魯斯特角時有效率上升的趨勢，而 TE 偏振（紅光）則微微下降，兩者皆與理論預期相符；偏振方向方面，在旋轉太陽能板改變偏振相對角度時，觀察到光電流變化極小，顯示本實驗所使用之 PIN 結構太陽能板對偏振方向不具顯著敏感性。

為在任何情況下皆能找出產生最大光電流的方法，需綜合考慮光源之偏振態（TE 或 TM）、入射角與波長等因素，並根據太陽能板的結構特性（如是否為 PIN 或具各向異性吸收）調整實驗條件，以達到最佳光電轉換效率。未來將進一步量測不同波長下太陽能板的轉換效率曲線，繪製完整的光譜響應圖，以更全面評估波長對太陽能轉換性能的影響。

5. 參考文獻

[1] 黃衍介 (2011)。近代實驗光學 (第二版)。東華書局。

6. 心得感想

在上個學期，我們參與了實驗室的每週 meeting，並進行由老師設計的光學實驗，以學習基本的光學知識。到了本學期第四週，老師指派我們一項新題目：測量不同波長雷射對太陽能板充電效率的影響。確定實驗設計後，我們與老師討論並獲得同意，便開始著手進行實驗並蒐集數據。從第六週到第八週，我們專注於實驗器材的架設，期間曾面臨找不到合適器材的情況，幸好在詢問實驗室的學長後皆順利解決。第九週到第十一週期間，我們完成了所有數據的量測，對於出現異常的結果，我們也會積極與學長和教授討論，釐清可能的問題來源。

我們兩人在實驗分工上基本上是一起討論設計、共同動手操作，每週大約有三至四個下午在實驗室進行實驗工作，過程中密切合作、共同解決各種挑戰。在這次的專題中，我們遇到了許多困難，例如器材難以尋找，以及實驗設計與實際操作之間的落差，也有因實驗設計不精確，導致需要完全重做的情況。很多在規劃階段未曾預料到的問題，都是在實際執行時才浮現出來。非常感謝教授在這一年來的指導，讓我們在專題中培養了動手實作的能力，也建立了光學實驗的基礎知識。無論是學會利用3D列印改進實驗，還是進行實驗設計，對我們來說都是寶貴的經驗。

同時，我們也非常感謝實驗室學長們的協助，特別是紹偉學長與宥翰學長，在器材尋找與實驗 debug 過程中給予我們很多幫助。專題報告目前只完成了紅光與綠光的實驗部分，但在學期結束前，我們仍會持續嘗試進行其他波長雷射的實驗，完成太陽能板效率隨波長變化的關係圖，進一步分析最佳工作波段。