

超快雷射時間解析激發探測量測系統 訊噪比之提升

SNR Improvement of Ultrafast Laser Based Time-Resolved Pump-Probe System

翁俊仁、王太伸、張鮮文、白世璽

Chun-Jen Weng, Tai-Shen Wang, Shian-Wen Chang, Shyh-Shii Pai

本研究著重於提升時間解析激發－探測量測系統的訊噪比，透過超快雷射之鎖模狀態觀測、即時影像監控激發探測光束之重合狀態、光偵測器參數最佳化，以及調整正交之偏振狀態等，期望找出適當最佳化參數，以獲得時間解析激發－探測反射率量測的最佳訊號。以 GaAs 晶片做為最佳化的實驗樣品，激發光與探測光強度分別僅需要 50 mW 及 1 mW 之低功率操作，目前已可將訊噪比提升至 50 左右。

SNR is an important indicator for time-resolved pump-probe system. We focus on improvement of SNR in this study. After optimization, the SNR of time-resolved pump-probe system for GaAs sample is about 50 in this system. The optical power for pump and probe beam is only 50 mW and 1 mW, respectively.

一、時間解析激發探測量測技術

透過超快雷射時間解析之激發－探測 (time resolved pump-probe) 技術，可量測樣本受到超快雷射激發後之反射率或穿透率變化，經過模型分析可計算載子的動態行為 (carrier dynamics) 與載子的分布 (carrier distribution)。時間解析激發－探測實驗的必要條件為激發光波長所對應的光子能量必須大於樣品的能隙 (band gap)。時間解析激發－探測技術原理係利用固定脈衝寬度及重複產生之超快雷射光束做為雷射源，雷射光束經由分光鏡分成兩道光，一道稱為激發光束 (pump beam)，另一道為探測光束 (probe beam)，激發光與探測光具有相同的

脈衝寬度與重複率，一般激發光強度大於探測光。當激發光的脈衝到達樣品，開始對樣品激發，在價帶的電子會被激發到導帶以上的能階，再陸續從激發態掉回價帶，一般被激發的過程時間相當短，鬆弛震盪時間 (relaxation time，從激發態掉回價帶的時間) 較長。這些載子的動態行為特徵會直接反應在樣品的反射率與穿透率 (考量基板的影響，本篇研究是量取反射率)，所以只要能量取反射率隨時間的變化就能瞭解載子的動態行為，實驗上利用精密移動平台控制激發光和探測光脈衝在時間上的差距，即可做不同時間點的掃描。

實驗過程中量測樣品受到激發脈衝影響前到影響後的一段時間內探測脈衝感受到樣品反射率的變

化，即為時間解析的反射率變化，而此現象的復原程序(鬆弛震盪時間)必須在下一個激發光到達前結束，以避免訊號干擾。在此要特別注意的是，載子的鬆弛時間不能大於超快雷射連續兩個脈衝的時間間隔(重複頻率的倒數)，否則會形成部分被激發的載子仍停留在導帶，又有新的載子被激發，使得載子迅速累積，造成反射率的變化不具有與雷射脈衝相同週期。激發-探測的量測目的為觀察樣本受到超快雷射激發隨時間變化之情形，探測光束經過移動平台做時間延遲掃描，可使得改變探測光束和激發光束相對的光程差，即可調整激發光束和探測光束到達樣本的相對時間，而改變的時間就是光程差除以光速。藉著調整激發光束和探測光束的時間差，來觀察每個不同時間點上的反射訊號強度，進而完整地觀測到激發光束所引起的物理特性在時間上的分布(通常為~ps 範圍)。

激發-探測光束之重合通常使用肉眼判斷(明視距離下人眼辨別解析度約為 100 μm 的光斑間隙)，因此不但訊號品質不佳，也常造成操作之複雜度。有些研究團隊透過樣本對準標記(alignment key)之協助，進一步改善了訊號品質，然而仍是以間接方式對準激發與探測光束之重合，其再現性仍然受限，因此本研究將透過架設高解析度觀測系統，即時監控激發與探測光束之重合，提升訊號品質及降低操作複雜度，並透過量測系統最佳化將訊噪比提升，增加系統穩定度與量測可靠度。

二、系統架設

本研究之時間解析激發-探測量測系統示意圖如圖 1 所示，使用超快雷射系統作為激發-探測之光源，雷射光源為 Spectra-Physics 公司之鈦：藍寶石鎖模雷射系統(型號為 Tsunami)，由 5 W 的二極體雷射 Millennia 作為幫浦雷射(pump laser)。此一超快雷射系統之中心波長為 785 nm，脈衝寬度 130 fs，平均功率 600 mW，經換算瞬間峰值功率可達 75 kW，重複頻率(repetition rate)則為 80 MHz。為了即時監控超快雷射光源的波長與頻寬，我們架設了一組監控系統，包含 Ocean Optics 光譜儀及光柵分光搭配 CCD，觀察超快雷射光譜之變化，並由

LCD 螢幕即時顯現。一般若超快雷射源穩定，則超快雷射會呈現鎖模狀態(mode-locking)，透過光柵將雷射橫向分布(transverse)作空間分光，則取向 CCD 將呈現一整區均勻之光分布，如圖 2(a) 所示。若雷射行進過程遇到散射或反射物質，造成反射光打回雷射腔體，此時雷射將無法鎖模，而回到長脈衝之運作，此時的光場分布將呈現數區分開之光點分布，如圖 2(b) 所示，此時則必須重新微調腔體，使得雷射回到鎖模狀態。另外，透過光譜儀的量測，則可量其中心波長及光譜分布，透過光譜之分布亦可以判別超快雷射鎖模與否，圖 3(a) 顯示光譜分布區線較為和緩(smooth)，顯示雷射處於鎖模狀態圖，圖 3(b) 則顯示是非鎖模狀態，其光譜分布曲線較為斷續，目前此一超快雷射系統運轉在中心波長與半高頻寬(FWHM)各為 785 nm 與 7 nm。

超快雷射的脈衝寬度太窄及重複率太高，偵測器的靈敏度及速度都無法相匹配，所以需要搭配鎖相放大器(lock-in amplifier)與光遮斷器(optical chopper)來擷取訊號。雷射光束經過薄膜分光鏡(pellicle beam splitter)，分成激發光束(約為 500 mW)、探測光束(約為 100 mW)，激發光束經步進平台上之反射鏡組作為時間延遲(delay line)之用，並且以偏振片(polarizer)控制其偏振狀態後，透過 75 mm 焦距透鏡聚焦後以幾近垂直之角度入射於待測樣本上，作為激發樣本之用。然而此道光束不可完全垂直入射於樣本，否則，所造成的散射光或反射光將打回至超快雷射腔體造成無法鎖模。值得注意的是，反射光若打回腔體，則雷射在跳開鎖模狀態時，其瞬間功率之轉變甚大，容易將樣本燒毀(若為 GaAs 等解離有毒樣本時，必須特別小心謹慎)。本激發光束之入射角度約為 -5° (以入射平面之法線做定義)，選此小角度除了避開反射光打回雷射腔體外，同時是為避免其反射光打至探測光束之路徑反射至雷射腔體造成無法鎖模，以及避免激發光束入射於檢光二極體造成雜訊增加(真實訊號將載於探測光束上非激發光束)。

探測光束經偏振片控制偏振方向後，透過 50 mm 焦距透鏡聚焦後以 20 角度入射於待測樣本上，作為探測樣本超快現象之用。通常樣本受到超

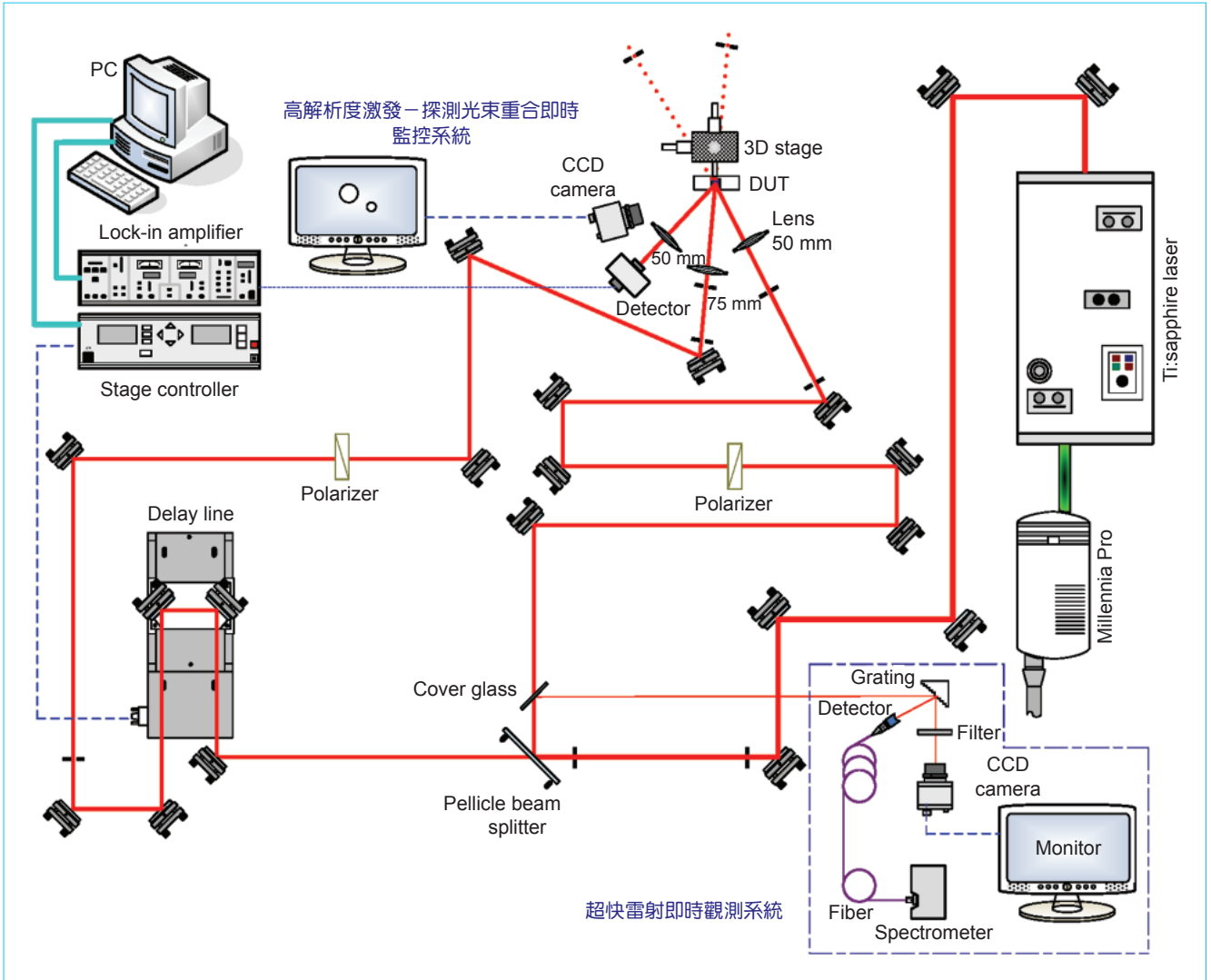


圖 1. 時間解析激發-探測量測系統之示意圖。

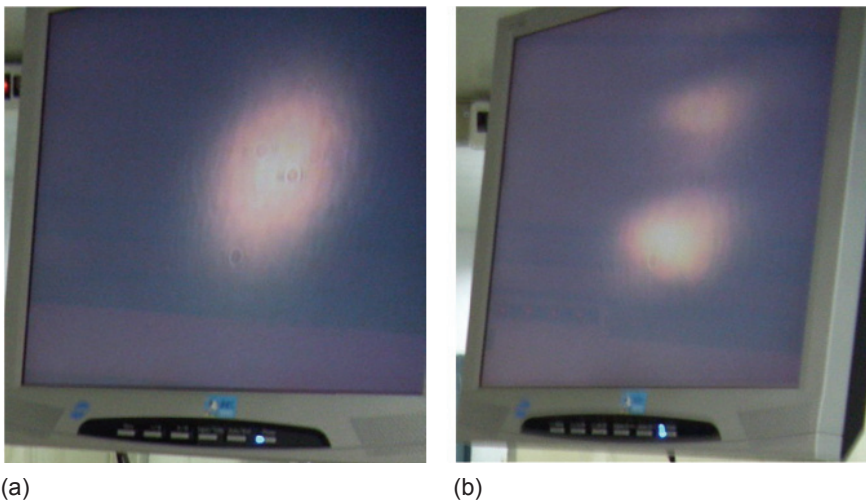
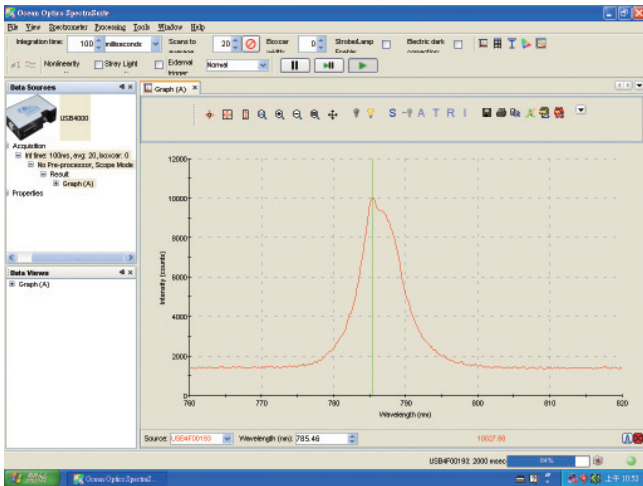
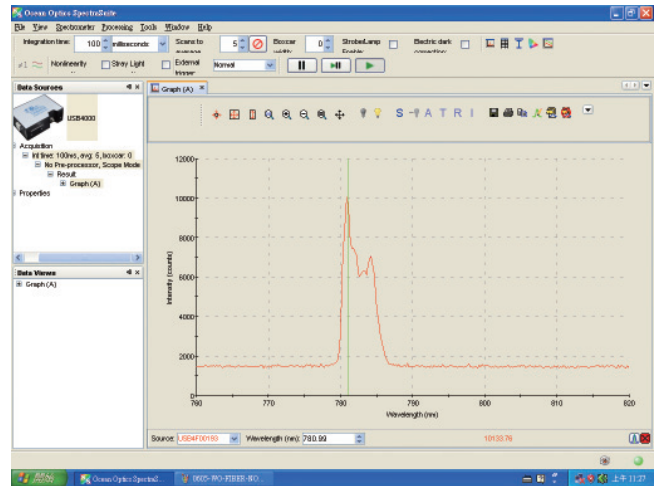


圖 2. 鎖模與否光場之空間分布，(a) 鎖模狀態，(b) 非鎖模狀態。



(a)



(b)

圖 3. 鎖模與否光譜分布，(a) 鎖模狀態，(b) 非鎖模狀態。

快雷射激發光之激發後，此時的探測光束的反射率將發生變化，透過 50 mm 焦距之透鏡收光至檢光二極體，做光電轉換後將反射光訊號轉為電訊號送至鎖相放大器 (lock-in amplifier)，然後透過電腦數據擷取卡，將數據顯示於所撰寫之 LabVIEW 程

式中，透過移動平台做時間延遲掃描，將樣本受到激發後之反射率變化記錄於程式中方便分析。激發光束與探測光束之重合部分，則是透過自行車架設之即時觀測系統協助空間重合校正，如圖 4 所示。激發光束與探測光束入射於樣本之影像即時在液晶

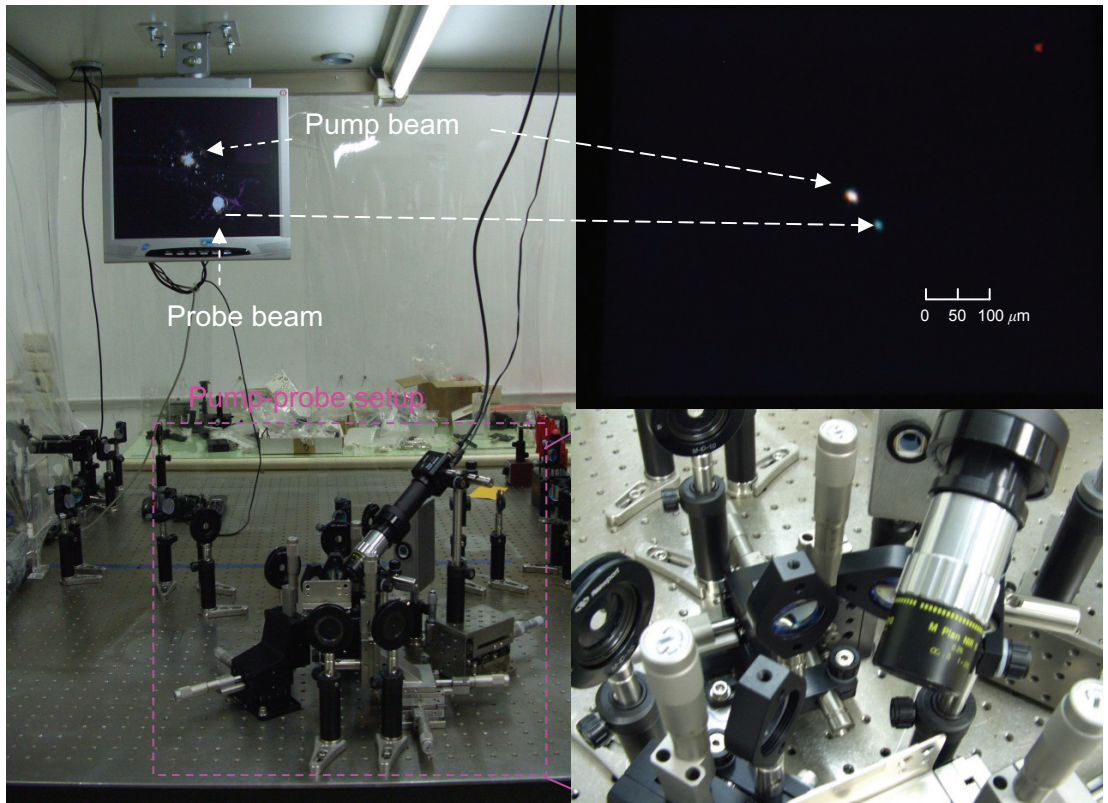


圖 4. 即時觀測系統之照片。

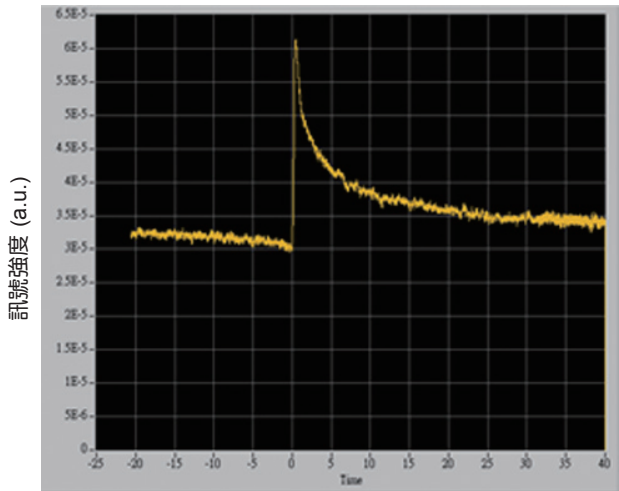


圖 5. GaAs 之時間解析激發－探測量測數據。

螢幕上顯現出來，透過移動平台調整探測光束或激發光束之聚焦鏡，使得聚焦於樣本之光束位置做相對移動，以得到較佳之激發－探測光束之重合。經量測可得到激發及探測光束大小可小於 $30\ \mu\text{m}$ (激發光束使用 $75\ \text{mm}$ 之聚焦鏡，探測光束使用 $50\ \text{mm}$ 之聚焦鏡，因此探測光束光點小於激發光束光點大小，確保探測光束皆是打在有受到激發光束激發之位置)，同時其對位誤差可控制小於 $10\ \mu\text{m}$ (受限於手動 stage 之刻度)，因此空間重合可受到精準之對準。

使用 GaAs 晶片作為超快雷射時間解析激發－探測量測系統量測之樣本，透過即時觀測系統協助空間重合校正以及光程之精準控制。

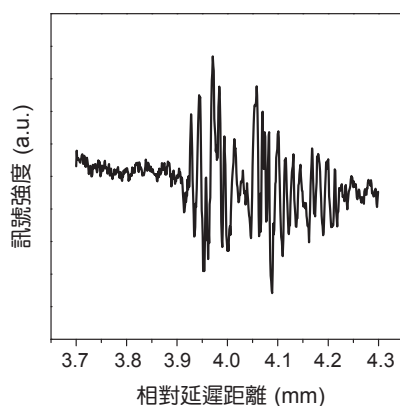


圖 6. 利用 GaN 樣品來觀察干涉效應造成的震盪訊號。

在系統完成架設後第一次測試即可量到訊號，如圖 5 所示，訊號品質訊噪比約 10 左右，激發光束與探測光束其等光程差所發生的位置，就在預設的掃描水平座標接近刻度「0」處，顯示先前所計算的光程相當精準。本套系統之總光程約為 $4\ \text{m}$ ，然而數據顯示兩道光束之光程差則可控制小於 $0.2\ \text{mm}$ ，顯示光程受到精準之控制。

三、系統最佳化提升訊噪比

由於超快雷射脈衝要在時間、空間上完全重合並不容易，然透過即時觀測系統以及精密定位之輔助，架設難度可以降低、再現性可以提升，然而訊噪比約只有 10 左右，要進一步提升訊噪比，將量測系統之各項元件操作最佳化是必要的。以下就重要元件與自行開發軟體的使用、注意事項做說明。

1. 激發與探測光束偏振狀態控制

在激發－探測的實驗中，激發光與探測光來自於同一超快雷射源，若是沒有特別去處理光的偏振方向，此兩道光之偏振方向即與超快雷射相同。在進行時間上的掃描時，當兩道光 (激發光與探測光) 的光程非常接近，形成干涉效應造成訊號的震盪。若是訊號本身的強度較小，干涉造成的震盪足以使得訊號不可分辨，如圖 6 所示；若是訊號強度夠大，干涉造成的影響就不明顯，如圖 7。可利用二分之一波長波板 (half waveplate) 使其中一道光的偏

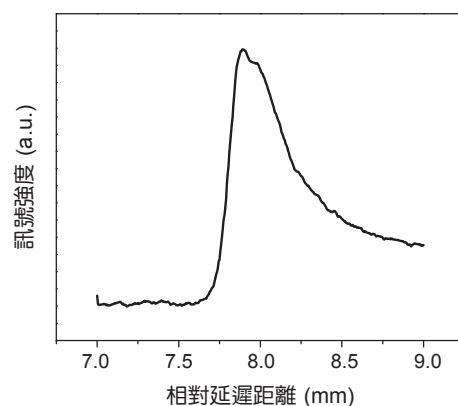


圖 7. GaAs 樣品的訊號強，干涉效應造成的震盪不明顯。

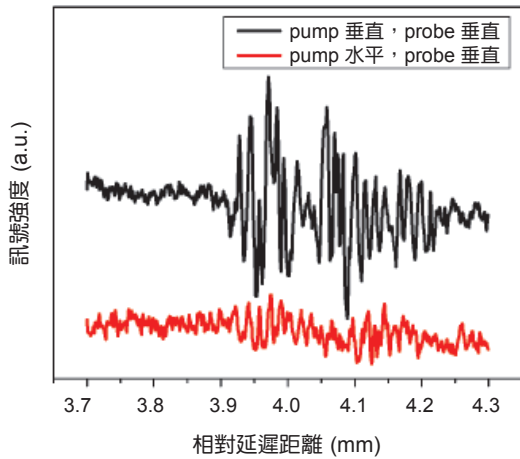


圖 8. 利用 GaN 樣品來觀察干涉效應造成的震盪訊號，當兩道光線的偏振方向為正交，可大幅地減低干涉效應的影響。

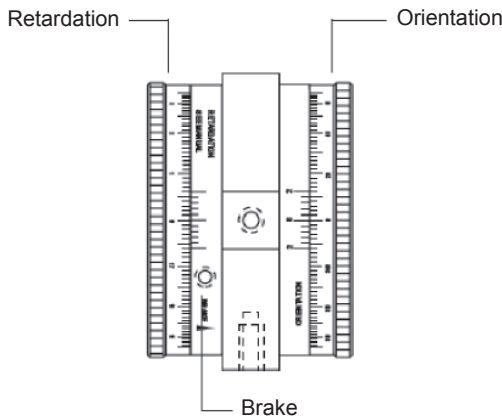


圖 9. Berek polarization compensator 可調式波板。

振方向偏轉 90° ，在兩道光線的偏振方向為正交的情況下，可大幅減低干涉效應的影響，如圖 8 所示。

考慮實驗的彈性變動，超快雷射的波長可在 800 nm 附近做些微的調整，所以實際上是使用了可調式波板 (variable wave plate, Berek polarization compensator)，示意圖如圖 9。由於其構件為可調整，所以適用於寬波段範圍，對於實驗的進行有相當大的方便性，其標準使用方法整理如下：

- (1) 利用支柱固定元件本體 (固定孔有兩個，其方向差 90° ，並不影響使用方式)。
- (2) 將 orientation 轉至 45° 。
- (3) 鎖住 break，將 orientation 固定 (當鎖住 break、

retardation 不能轉小於 0°)。

- (4) ① 二分之一波長波板 (使線偏振偏轉 90°)：轉動 retardation 使入射光通過後強度最弱 (可用光功率計量測)，些微鬆開 break，微調 orientation，使光強度更弱，再鎖住 break，即完成二分之一波長波板的調整。
- ② 四分之一波長波板 (使線偏振變成圓偏振)：轉動 retardation 使入射光通過後強度為原始的一半 (可用光功率計量測)，些微鬆開 break，微調 orientation，使光強度更接近一半，再鎖住 break，即完成四分之一波長波板的調整。
- ③ 橢圓偏振：orientation 不為 45° ，皆為橢圓偏振。

2. 光偵測器

激發－探測反射率量測系統所獲得的訊號為 $I_0\Delta R$ 隨時間的變化，其中 I_0 為探測光強度， ΔR 為反射率的變化，在理想化的條件下，也就是激發光與探測光是獨立的沒有交互作用，所以反射率只受到激發光的作用而引起變化，而且訊號強度與探測光強度成正比。不過在進行標準樣品測試時，發現使用強度較微弱的探測光卻可得到強度較強的訊號，使用強度較強的探測光訊號強度呈現非常明顯的減弱趨勢，如圖 10 所示，與前面描述的情況不同，於是推測可能是因為探測光強度太強造成光偵測器有問題。首先，確認光二極體的使用方式，利用不同的雷射強度照在光偵測器 (photo detector) 上，量取相對應的電壓，如圖 11 所示，發現照光

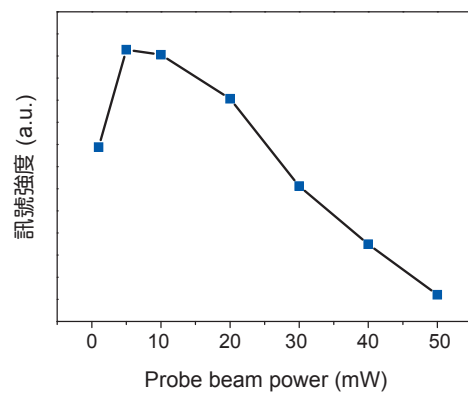


圖 10. 隨著探測光的增強，訊號強度先增強再減弱。

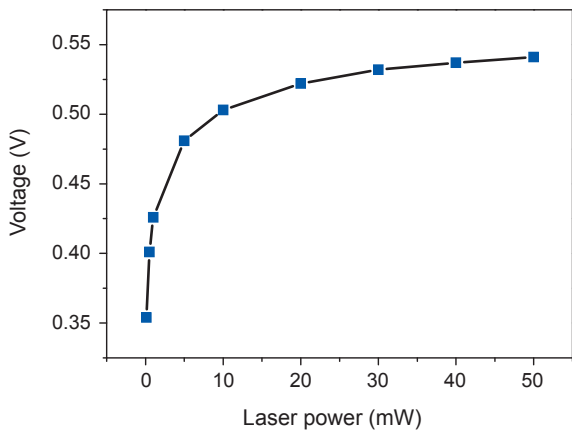


圖 11. 不同的雷射強度照在光偵測器上，量得相對應的電壓。

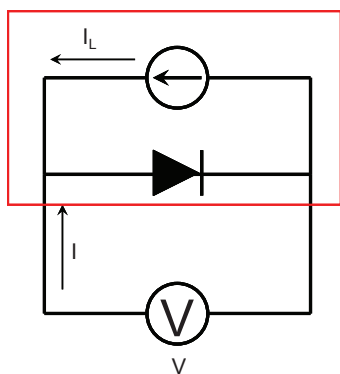


圖 12. 簡易的光二極體模型等效為反向電流源並聯二極體。

強度與電壓不為線性關係，應該是光二極體已經超出線性工作區域。簡易的光二極體模型，如圖 12 中紅色方框的部分，沒照光時相當於二極體，照光時可等效為反向電流源並聯二極體，其電壓與電流的關係為：

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) - I_L \quad (1)$$

其中， I_s 為反向飽和電流， V_T 為溫度乘上浦朗克常數除以電子電量， I_L 為光電流。電壓與電流關係模擬圖如圖 13 所示，電壓小於 0.1 V 為線性工作區域，大於 0.1 V 為非線性工作區域，在線性工作區域所對應到的電流為光電流。利用伏特計量二極體的輸出電壓，即形成開路，其電流等於零，式

(1) 將可改寫為：

$$V = V_T \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \quad (2)$$

其中，光電流與照光強度成正比可直接用實驗來證明，結果如圖 14，所以光電流可用 cP 來表示， c 為轉換效率常數， P 為照光強度。將式 (2) 中 I_L 以 cP 替換可得：

$$V = V_T \ln\left(\frac{cP}{I_s} + 1\right) \quad (3)$$

其中照光強度與電壓關係模擬圖如圖 15，與圖 11 相比較，可知過強的入射光照射在光二極體會使電壓趨於飽和。

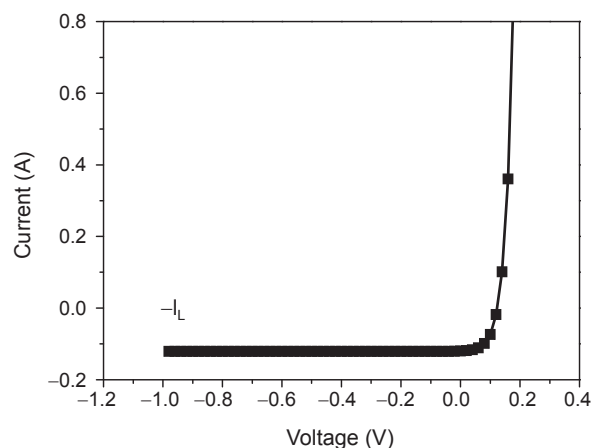


圖 13. 光二極體的電壓與電流關係模擬圖。

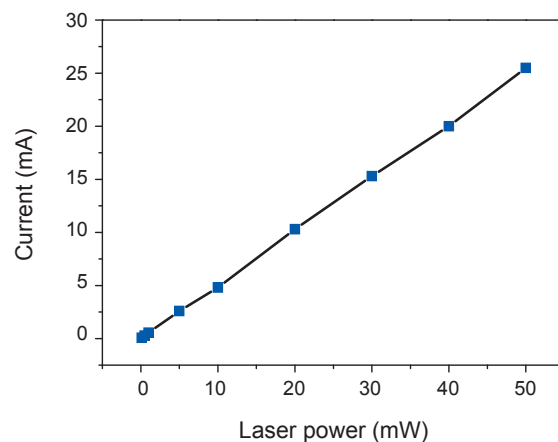


圖 14. 光二極體的光電流與照光強度成正比。

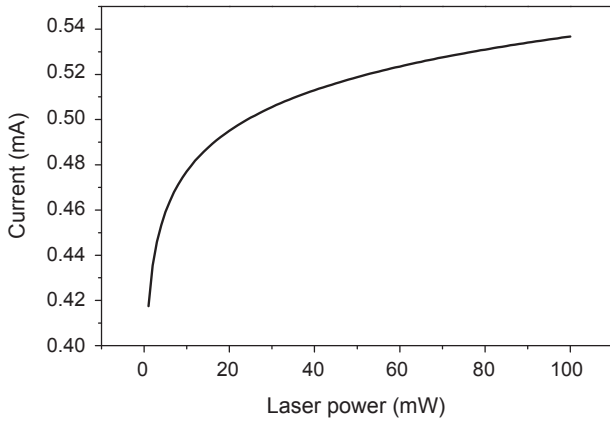


圖 15. 光二極體的照光強度與電壓關係模擬圖。

若是考慮光二極體內有接觸電阻 (R_S) 及漏電流 ($I_{leak} = V/R_{SH}$)，如圖 16 中紅色方框的部分，其電壓與電流的關係為：

$$I = I_s \left(e^{\frac{V - IR_S}{VT}} - 1 \right) + \frac{V - IR_S}{R_{SH}} - I_L \quad (4)$$

其中，可知光二極體的線性工作區域會受到這些因素影響而有所差異，所以每個光二極體在使用前需先定義出線性工作區域。對於所使用的光二極體做 I-V 曲線量測，結果如圖 17，與模擬圖 13 趨勢一致，並且確定照光會使整個曲線往下移，對於曲線沒有產生變形，所以可定義電壓小於 0.3 V 為線性工作區域。

雖然已經發現入射光太強，使光二極體工作在非線性區，但必須進一步確認是否因此造成激發—探測反射率量測系統的訊號強度會隨著探測光越強而減弱。圖 18 示意圖表示三種入射光強度皆在光二極體的線性工作區域，當電阻值固定的條件下，電壓與電流成正比，其斜率相當於電阻值。圖 19 示意圖表示探測光強度由線性工作區域跨到非線性區域，當激發光強度固定使得反射率的變化 ΔR 固定，並且隨著探測光強度增強產生的光電流越大，由圖可知 I-V 曲線的水平部分的電流差距隨著探測光變大，但是由電阻量到的電壓差會先變大再變小。理想上，若是光二極體在線性工作區域，訊號強度會與探測光強度成正比，如圖 20 中的黑色斜直線，乘上受光二極體非線性區域的影響 (紅色曲

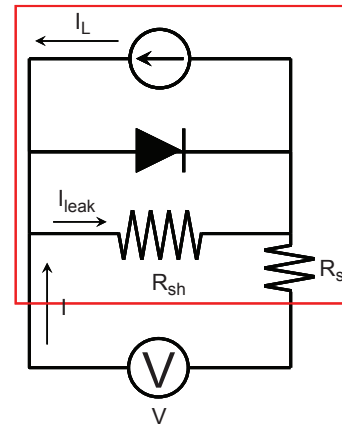


圖 16. 光二極體的模型，考慮內有接觸電阻 R_S 及漏電流 I_{leak} 。

線，由圖 11 微分獲得，因為反射率的變化即是電壓差的對應)，得到的綠色曲線為實際的訊號強度隨著探測光強度的變化，其趨勢為先變大再變小，如同實驗結果圖 10 所示，所以可確定光二極體工作在非線性區域會造成探測光強度增加而訊號強度減弱。

由以上的驗證，可知形成先前問題的原因是探測光太強，使光二極體工作在非線性區，雖然減弱探測光強度即可解決此問題，但是如此會造成實驗可調整的變因受限制。為了避免此限制，稍微調整了訊號量測方式，如圖 21，將光二極體當作電流源，由於光電流與照光強度成正比 ($I_L = cP$)，再串聯電阻 (R)，藉由量取電阻兩端的電壓 ($V = I_L R = cPR$)，可獲得照光強度的相對值。但是此電壓亦為

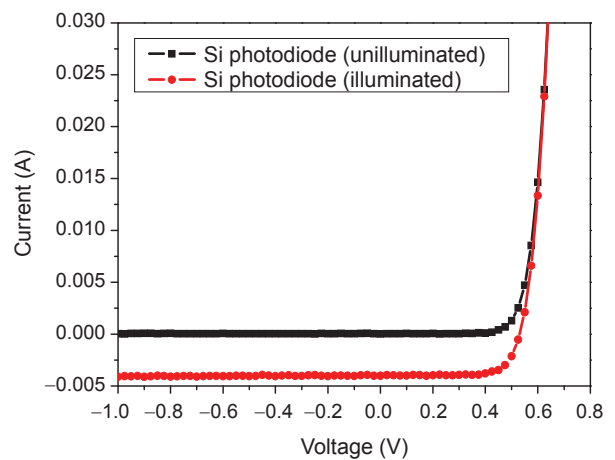


圖 17. 光二極體的 I-V 曲線。

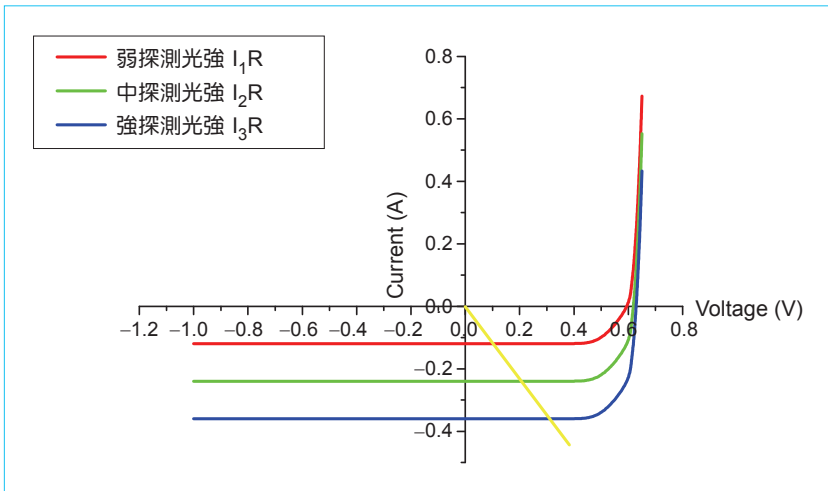


圖 18.

入射光強度在光二極體的線性工作區域，電壓與電流成正比，其斜率相當於電阻值。

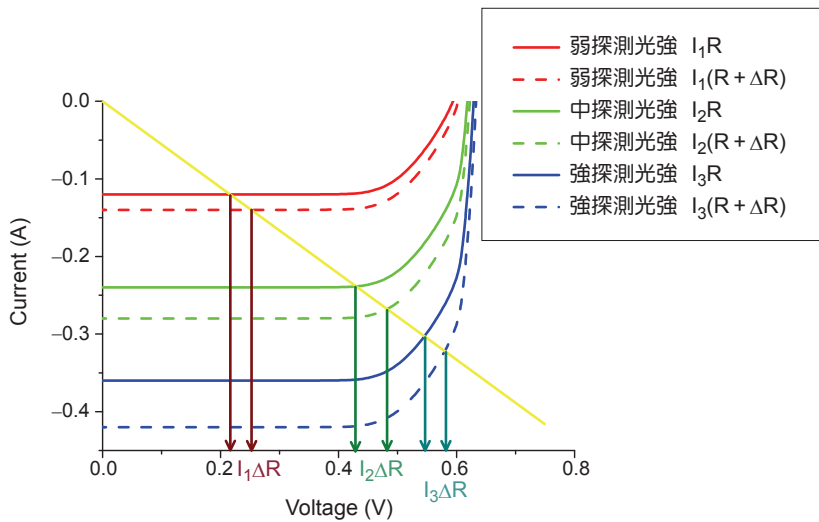


圖 19.

探測光強度由線性工作區域跨到非線性區域，隨著探測光強度增強，量到的訊號強度會先變大再變小。

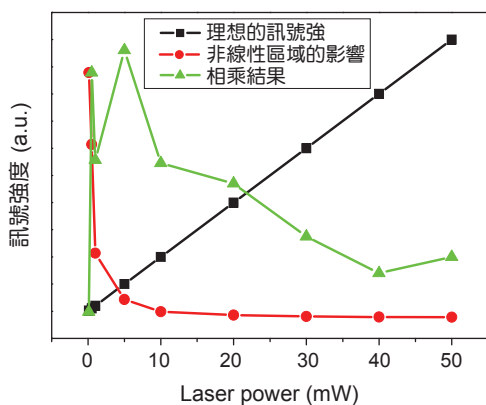


圖 20. 光二極體在線性工作區域，訊號強度會與探測光光強度成正比 (黑色斜直線)，乘上非線性區域的影響 (紅色曲線)，得到如同由實驗量得的訊號強度隨著探測光強度的變化 (綠色曲線)。

光二極體兩端的電壓，不能超過線性工作區域 (0.3 V)，所以此電阻值的選擇非常重要。當超過線性工作區域可選擇較小的電阻。當訊號強度較弱時，可選擇較大的電阻做放大的功能。我們製作了一個六段式的可變電阻，依序為 10 Ω、50 Ω、200 Ω、500 Ω、1 kΩ、2 kΩ，如圖 22 所示，大致可以符合實驗需求。

3. Pump-probe LabVIEW 軟體撰寫

團隊以 LabVIEW 自行編寫的時間解析激發一探測反射率量測系統為一複合式軟體，不僅能進行掃描參數設定、進行掃描與檢視結果，也能獨立控制精密步進馬達移動平台及鎖相放大器。以下就軟體各頁面功能做簡介。

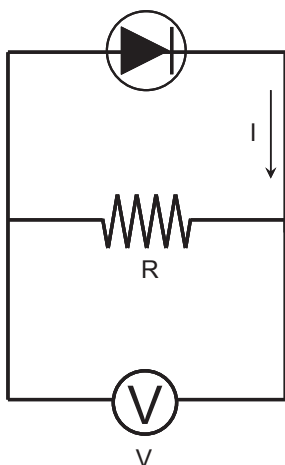


圖 21. 將光二極體當作電流源，由於光電流與照光強度成正比 ($I_L = cP$)，串聯電阻 (R)，藉由量取電阻兩端的電壓 ($V = I_L R = cPR$)，可獲得照光強度的相對值。

(1) Stage (精密步進馬達移動平台)

如圖 23 所示，此頁面中左上角為移動平台的電源，已有做保護功能，即是關電源前會自動歸零 (若直接利用最右下角的 STOP 按鈕也會自動歸零再關閉程式)。頁面中右上角可選擇單位與輸入目的位置，按 GO 按鈕就會開始移動。下方的文字方框會即時顯示目前位置與目的位置，並已做好單位換算方便使用者檢視。

(2) Lock-in Amplifier

如圖 24 所示，此頁面功能為連續即時由鎖相放大器讀出訊號，並由數值與圖表顯示，可在對光

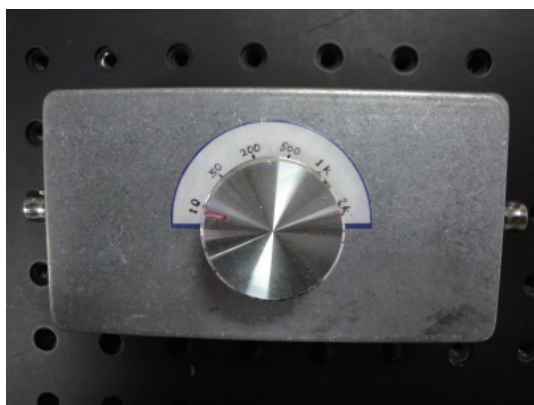


圖 22. 自製六段式可變電阻。

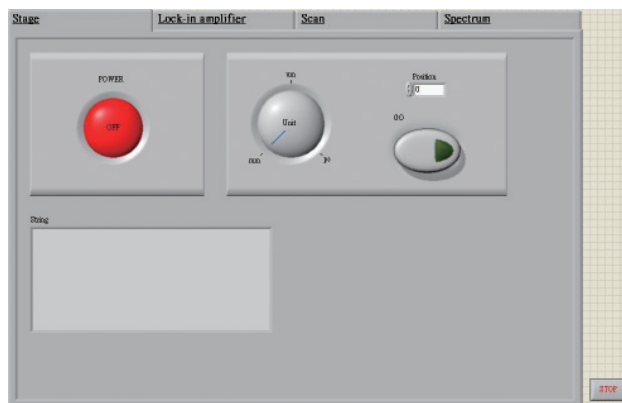


圖 23. 時間解析激發—探測反射率量測系統軟體的「Stage」頁面。

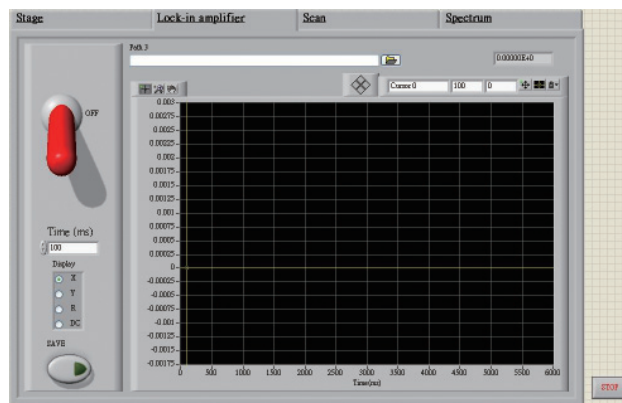


圖 24. 時間解析激發—探測反射率量測系統軟體的「Lock-in amplifier」頁面。

程序中連續取訊號使用。左邊的設定列，依序為開關、取訊號時間間隔、訊號種類與存檔，其中訊號種類包含與參考訊號同相位 (X)、差 90° 相位 (Y)、不分相位 (R) 及直流訊號 (DC)，若需要將數據儲存，可在停止後按 SAVE 按鈕。

(3) Scan

如圖 25 所示，此頁面為軟體的主要功能，可進行掃描參數設定、數據處理、存檔設定與進行掃描，並由數值與圖表即時顯示結果。左邊的設定列可分為五大區塊。第一區塊為單位與存檔路徑的設定，在掃描結束後會自動存檔。第二區塊為掃描參數設定，包含掃描範圍、掃描間隔、移動平台到位後等待時間、鎖相放大器是否自動轉至同

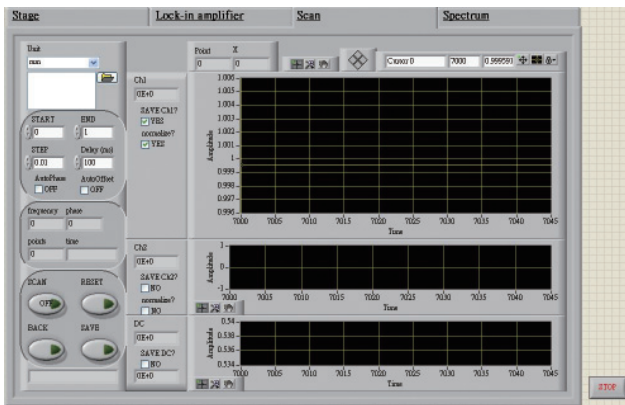


圖 25. 時間解析激發－探測反射率量測系統軟體「Scan」頁面。

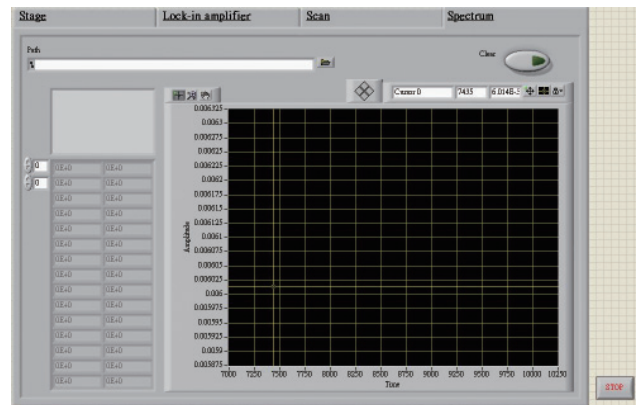


圖 26. 時間解析激發－探測反射率量測系統軟體的「Spectrum」頁面。

相位 (auto-phase) 與是否自動扣除背景強度 (auto-offset)。第三區塊為資訊顯示，包含鎖相放大器的參考頻率、取訊號相位、掃描點數、掃描時間預估，其中掃描時間預估可提供使用者在大範圍掃描時做為參考，有效充分利用時間。第四區塊為掃描動作設定，包含開關 (scan)、重設 (reset)、掃描點數後退 (back)、存檔 (save)，開關按鈕可控制開始與暫停，重設按鈕為數據及掃描動作歸零，掃描點數後退按鈕可退回上一個掃描點重新取數據 (此功能可在訊號受外界干擾而出現雜訊時使用，必須先進入暫停狀態，每按一下就會後退一個掃描點，並取消已取得的數據，回到預期的掃描點，可再接續並重新掃描)，存檔按鈕的功能即為儲存數據 (一般在掃描結束後會自動存檔，但在掃描過程中要停止並存檔就是按此按鈕)。第五區塊為狀態顯示列，會顯示各儀器的狀態。此頁面的右邊有三個圖表，分別記錄鎖相放大器的第一、第二通道與直流訊號，一般會將鎖相放大器的第一與第二通道分別設成參考訊號同相位 (X) 與差 90° 相位 (Y)，在圖表的左邊會即時以數值顯示，並設定存檔所要包含的數據，而歸一化的選項可決定是否要將數據除以直流訊號 (此功能可用在比較不同樣品時，排除反射率強度對訊號強度的影響)。Spectrum 如圖 26，此頁面為瀏覽數據功能，可比較不同樣品的數據。左上角路徑的按鈕可選擇檔案，右上角清除 (clear) 按鈕可清除所顯示的數據圖表。

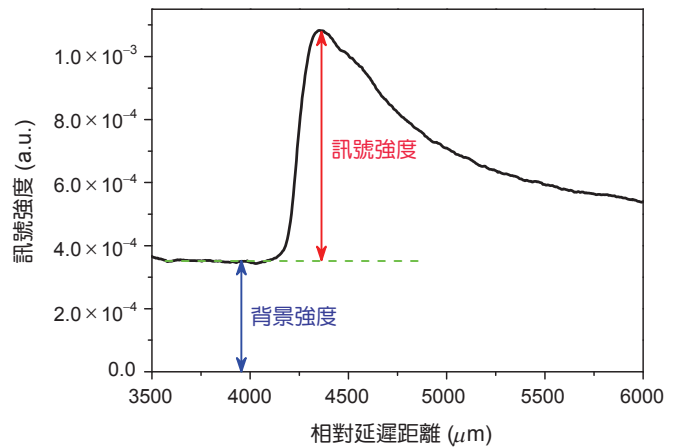


圖 27. 定義訊號強度與背景強度。

四、實驗結果與討論

由時間解析激發－探測反射率量測系統所獲得的訊號皆有明顯強度的背景，如圖 27 所示，為了探討訊號強度與背景強度，於圖中定義訊號強度與背景強度。首先固定探測光強度為 1 mW，改變激發光強度，得到訊號強度與背景強度隨著激發光強度的變化，如圖 28 所示，背景強度與激發光強度成正比，推測背景來自於激發光的散射。圖 28 中訊號強度的關係曲線有兩條，由於激發光越強，訊號最大值會有些許的位移，所以其中一條曲線是取訊號強度最大值，另一條曲線是固定光程差 (激發光為 5 mW 下，訊號最大值的光程差) 所對應的訊號強度，兩條曲線的趨勢是相同的。激發光大於

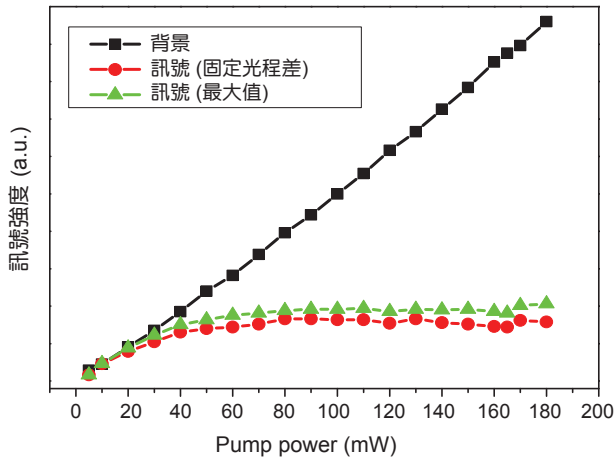


圖 28. 探測光強度固定為 1 mW，得到的訊號強度與背景強度隨著激發光強度的變化。

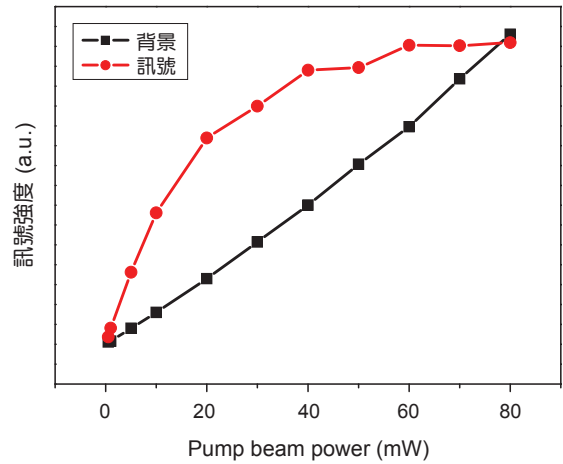


圖 30. 光偵測器前加入偏振方向與探測光相同的偏光片，探測光強度固定為 1 mW，得到的訊號強度與背景強度隨著激發光強度的變化。

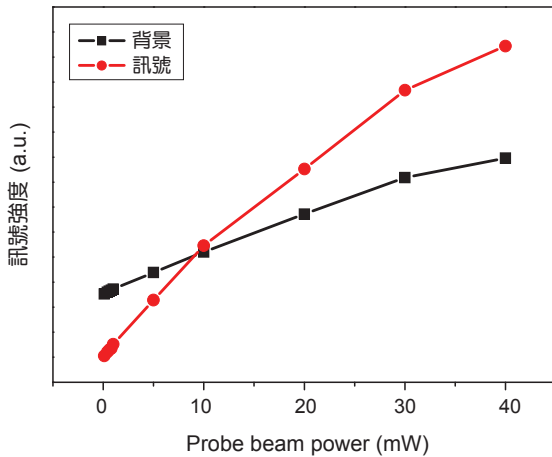


圖 29. 激發光強度固定為 50 mW，得到的訊號強度與背景強度隨著探測光強度的變化。

50 mW 訊號強度開始出現飽和趨勢，由 50 mW 至 100 mW 為過渡階段，大於 100 mW 為完全飽和，表示激發光強度再增強對訊號的貢獻並不會再增加，可將激發光強度 50–100 mW 與探測光強度 1 mW 定為最佳條件。

固定激發光強度為 50 mW，改變探測光強度，得到訊號強度與背景強度隨著探測光強度的變化，如圖 29 所示。當探測光強度趨近於零，背景強度不為零，可證實背景強度部分來自於探測光的散射，而背景強度與訊號強度隨著探測光強度增強皆出現飽和趨勢，可能是因為探測光的強度接近激發光的強度，兩道光對樣品的作用已經不可被明確

定義了。所以如同前面的結果，激發光與探測光的強度比值最好是在 50 以上，可依訊號強弱及避免對樣品產生破壞而做調整。

上述實驗皆在激發光與探測光的偏振方向為正交的條件下完成，如果在光偵測器前再加入偏振方向與探測光相同的偏光片，可減少激發光的散射進入光偵測器。變化激發光與探測光強度的實驗結果，分別如圖 30 與 31 所示，與上述結果的趨勢一致，但是能明顯降低背景強度，大約為之前的三分之一。

在深入瞭解各儀器的使用方式及獲得最佳激發光與探測光強度後，以 GaAs 做為時間解析激發—探測反射率量測系統的標準樣品，進行訊噪比的比較。圖 32 為系統改進前後的訊號比較，改進前激發光與探測光強度分別為 230 及 57 mW，改進後分別為 50 及 1 mW，改進前後的訊噪比分別為 10 與 50，由圖中也能明顯看出改進後的訊噪比改進前的平滑許多。雖然環境因素對訊號的影響程度不大，但若有電燈或門窗的開關，使環境有明顯的亮度變化，對於直流訊號產生較明顯的影響，可能使光偵測器進入非線性工作區域，導致訊號的變形，所以建議需要對外界光源進行隔絕。另外，環境或是儀器對訊號產生的不穩定性，考慮使用軟體的方式來改善，即是在每次取數據時做多點數的平均，亦能使訊噪比再提升。

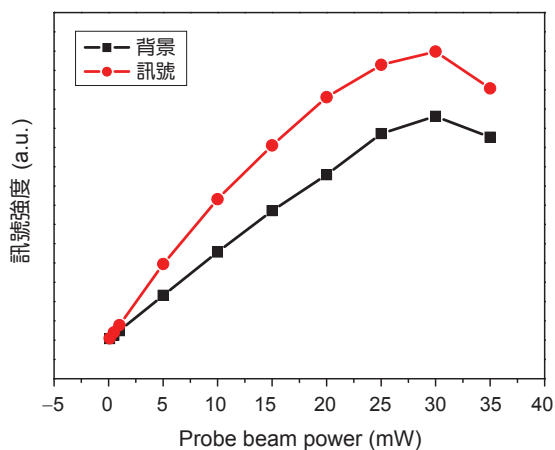


圖 31. 光偵測器前加入偏振方向與探測光相同的偏光片，激發光強度固定為 50 mW，得到的訊號強度與背景強度隨著探測光強度的變化。

五、結論

時間解析激發－探測反射率量測技術所獲得的訊號為反射率變化隨時間的改變 $\Delta R(t)$ ，而不同樣品的訊號強度可能會有相當大的差距，所以有效提高訊號強度與訊噪比，對於後續的訊號處理分析是非常重要的。由於本超快雷射其時間脈衝寬度相當短並且重複頻率相當高，因此作為激發－探測系統時將遭遇時間及空間光束重合之問題，亦即激發與探測兩道光束之光程差必須相等（時間），而且在兩道光束路徑上的光學元件將須嚴格控制偏心程度，以達成空間之重疊（空間）。

透過觀察超快雷射光譜分布，可以確保超快雷射之鎖模狀態，透過所架設之高解析度即時監控系統，可確保激發－探測光束空間重合可以小於 10 μm ，調整激發－探測光束之偏振狀態，使其偏振狀態互相正交之狀態，再輔以調整光偵測器操作最佳化於線性工作區域，對於標準樣品 GaAs，訊噪比已明顯提升由 10 上升到 50。改進前激發光與探測光強度分別為 230 mW 及 57 mW，改進後分別僅需要 50 mW 及 1 mW，所量得的數據顯示，明顯地可看出改進後的訊號比改進前的平滑許多。透過系統最佳化，我們所架設的超快雷射時間解析之激發－探測系統具有較佳的穩定性與再現性，可以提供高訊噪比之實驗觀測。

參考文獻

1. J. L. Arlein, S. E. M. Palaich, B. C. Daly, P. Subramonium, and G. A. Antonelli, *J. Appl. Phys.*, **104**, 033508 (2008).
2. S. Claussen, L. Tang, J. Roth, O. Fidaner, S. Latif, and D. A. B. Miller, *4th International Conference on Group IV Photonics*, Tokyo, Japan, September, Paper ThA4 (2007).
3. T. R. Tsai, C. F. Chang, and S. Gwo, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 252111 (2007).
4. R. Liu, G. D. Sanders, C. J. Stanton, and C. S. Kim, *Phys. Rev. B*, **72**, 195335 (2005).
5. A. J. Sabbah and D. M. Riffe, *Phys. Rev. B*, **66**, 165217 (2002).
6. A. Yamamoto, T. Kido, T. Goto, Y. Chen, T. Yao, and A. Kasuya, *J. Korean Phys. Soc.*, **34**, 58 (1999).
7. W. Z. Lin, L. G. Fujimoto, E. P. Ippen, and R. A. Logan, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 3 (1987).

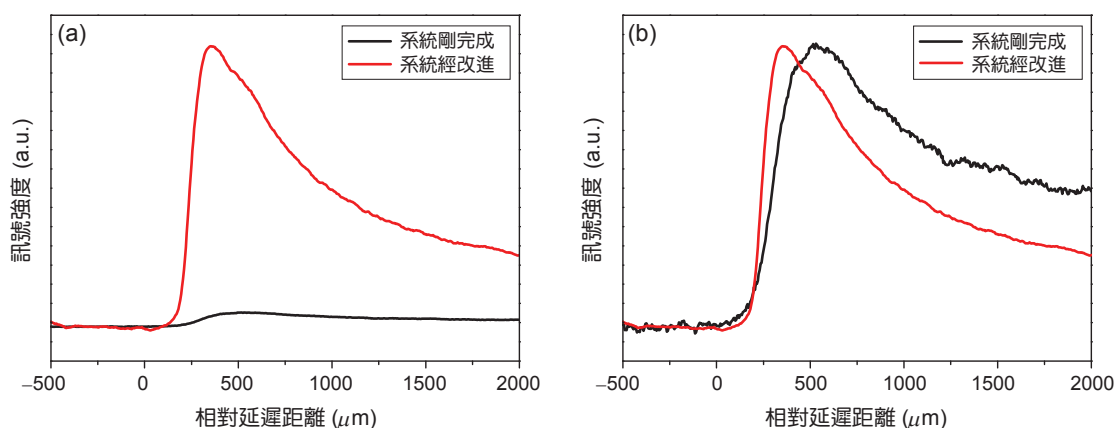


圖 32. 系統改進前後 GaAs 樣品的訊號比較，(a) 經過縱軸方向的平移，使背景強度一樣，(b) 訊號強度經過歸一化處理，再做縱軸方向的平移，使背景強度一樣。



翁俊仁先生為國立中山大學光電碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Chun-Jen Weng received his M.S. in electro-optical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



王太伸博士為國立成功大學物理博士，現任西柏科技股份有限公司工程師。

Tai-Shen Wang received his Ph.D. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an engineer in the Cypress Technology CO., LTD.



張鮮文先生為國立台灣科技大學機械碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Shian-Wen Chang received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



白世璽先生為國立清華大學物理博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Shyh-Shii Pai received his Ph.D. in physics from National Tsing Hua University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.