

一、實驗架設與結果討論

1.1 光源製備

1.1.1 雷射光

雷射光源為 Toptica 的半導體雷射，可產生波長 795 nm 的窄頻雷射

1.1.2 單光子

雙光子的產生機制為 SPDC，入射一道波長 397.5 nm 的藍光雷射進入 PPKTP 晶體，產生 Type-II 的時間 - 能量糾纏光子對 (time-energy entangled biphoton)，波長為 795 nm。實驗上會將產生出來的雙光子對經過 PBS，將訊號分為 signal 和 idler，以 idler 做為觸發訊號，使 signal 經過 ^{87}Rb 原子氣體管與 EOM，讓光子被吸收或對其進行相位的調製，並做 $G^2(\tau)$ 的測量， $G^2(\tau)$ 的定義如 (1.1)。

$$G^2(\tau) = \frac{4\Gamma_s\Gamma_i}{\Gamma_s + \Gamma_i} \begin{cases} e^{\Gamma_s\tau} & , \tau < 0 \\ e^{-\Gamma_i\tau} & , \tau > 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

此為二階強度關聯函數 (second-order intensity correlation function)， τ 為兩顆單光子抵達探測器的時間差。在符合準相位匹配條件 (quasi phase matching condition) 時能最有效率的產生雙光子，實際測量結果如圖 1.1，此光子之時間波包寬度約為 100 ns，頻寬為 4.5 MHz。

待放圖片

圖 1.1: 糾纏光子對之 $G^2(\tau)$ 量測

為了找到符合準項未匹配條件的入射光波長與晶體溫度，實驗上我們先將入射光的頻率固定在 105489 MHz，改變晶體溫度測量雙光子的產生率 (biphoton rate)，結果如圖 1.2 黑線，在 39.91°C 至 40.10°C 有四組符合條件的模態，若讓其中一顆光子經過 ^{87}Rb 原子氣體管，並做相同的量測，結果如圖 1.2 紅線，可以發現第二和第三個的模態雖有明顯的吸收，但吸收率不高，我們認為這是因為晶體所產生的光子為多模 (multi-mode) 而非單模 (single-mode)，同時產生了兩種以上頻率的單光子，儘管其中一個頻率的光子能完全被吸收，其他頻率的光子仍會透射，因此無法讓透射率趨近於零。為了確認這想法，我們在探測器前面加上一個頻寬為 60 MHz 的 Etalon 濾波器，只允許特定頻率附近的光通過，並在沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時改變晶體溫度，重新測量產生率，有無 Etalon 濾波器測量之結果比較如圖 1.3，黑色為沒放 Etalon 濾波器時測量到的訊號，紅色經過濾波後之訊號，兩者相比可明顯看出，有放濾波器時能將其他產生效率較低的模態過濾掉，一次只讓一個特定頻率區間內的光通過。此時再將 ^{87}Rb 原子氣體管放回，並對其中第二和第三個模態進行相同的量測，結果如圖 1.4，黑線為加上 Etalon 過濾之後測到的訊號，若放上 ^{87}Rb 原子氣體管讓光子通過，測量結果如藍線，光子幾乎完全被吸收，與圖 1.2 相比，可明顯看出，在過濾前的光源的確有其他頻率的成分，要避免其他頻率成分影響後續的實驗與分析，需加上 Etalon

濾波器。

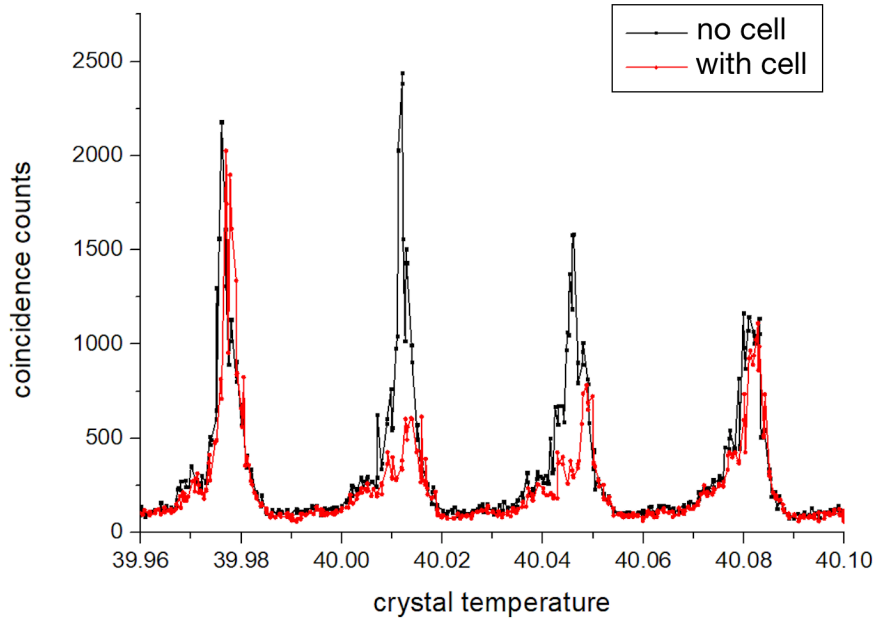


圖 1.2: 調整溫度測量雙光子產生率，黑線為直接對雙光子進行量測；紅線為先讓其中一顆單光子通過 ^{87}Rb 氣體管再測量，其中第二和第三個模態有部分吸收。

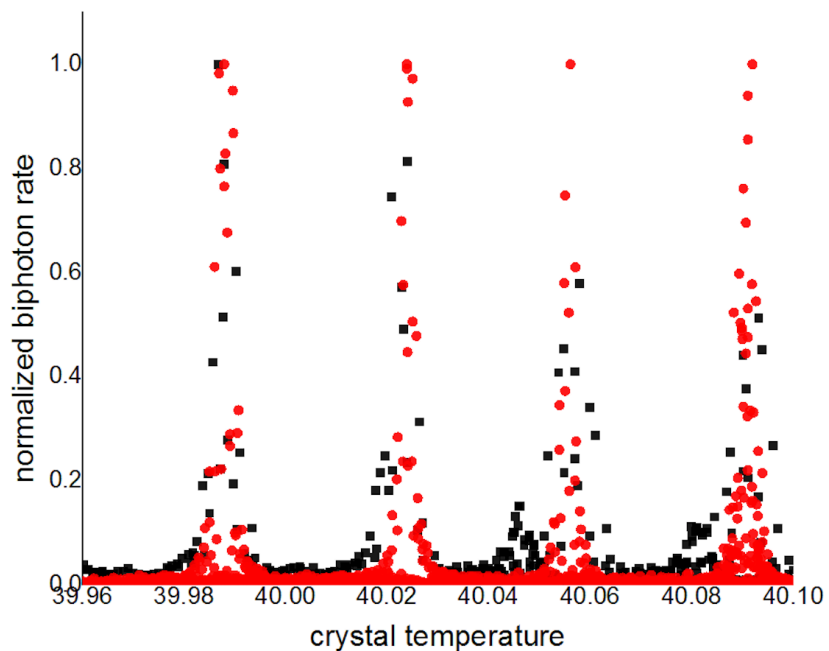


圖 1.3: 黑色為無濾波器時測量之訊號，在二與三個模態附近測量到一些明顯的訊號，表示我們的單光子非單模；紅線為經過濾波器測量到的訊號，此時就只允許特定頻率透射。

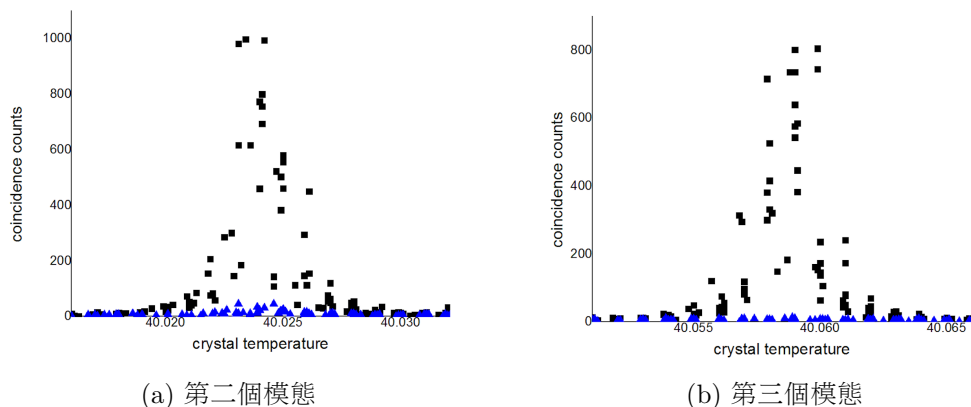


圖 1.4: 經過 Etalon 濾波後光子之吸收

1.2 雷射頻譜量測

實驗光路架設如圖 1.5，我們將窄頻雷射通過兩台 EOM 對其進行相位調製，第一台為展頻用，第二台用來做反向的調製還原頻譜，再以 Fabry-Perot 干涉儀去測量頻譜。

待放圖片

圖 1.5: 雷射頻譜量測光路圖

在兩台 EOM 都關閉的情況下，可以測到波長 795 nm 雷射的頻譜，結果如圖，以此 Fabry-Perot 的解析度掃出的雷射頻寬約為 60 MHz。

若只開啟第一台 EOM，在 10 Gb/s 隨機訊號的調製下可將窄頻雷射光的頻譜展至 10 GHz 寬，但由於我們的使用的 Fabry-Perot FSR 僅 10 GHz，無法涵蓋完整的頻率區間，會使測量的結果失真，要想掃出完整展開的頻譜需使用 FSR 20 GHz 以上的干涉儀，所以下面會先以 2 Gb/s

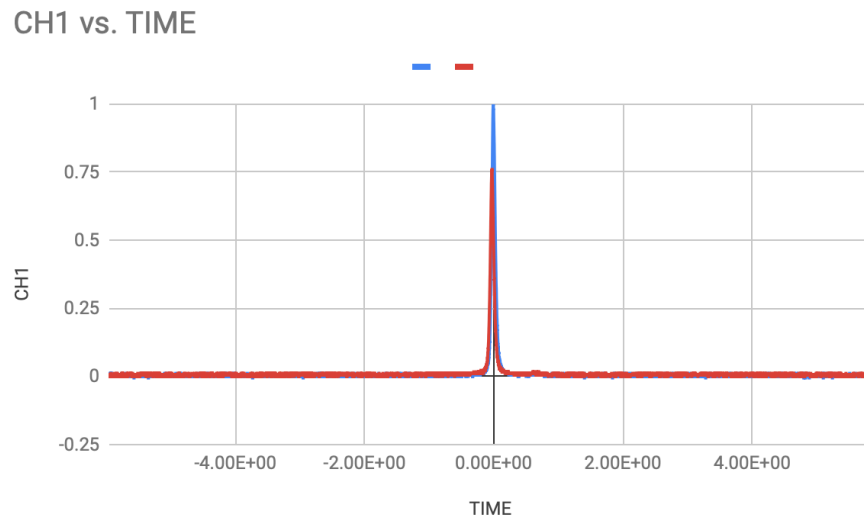


圖 1.6: 以頻寬 60MHz 的 Fabry-Perot 干涉儀掃出之雷射頻譜

的訊號來測試展頻的結果是否符合理論模擬。

1.2.1 2 Gb/s 隨機訊號之相位調製

先以 2 Gb/s 隨機訊號進行相位調製，只開啟第一台能將頻譜展至 ± 5 GHz 寬，如下圖。

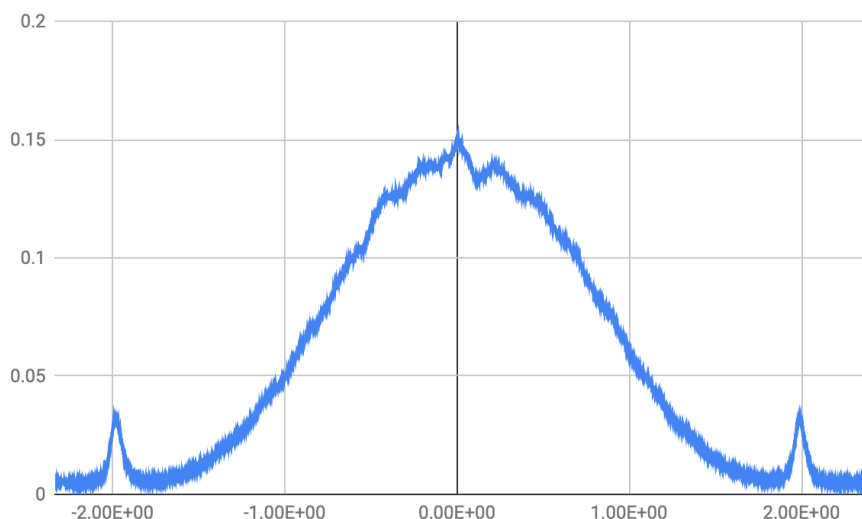
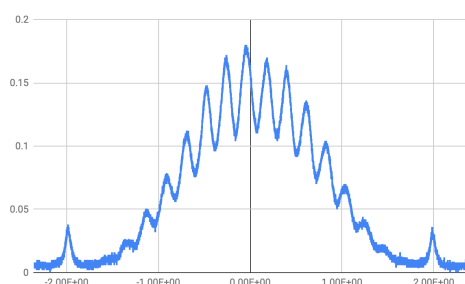
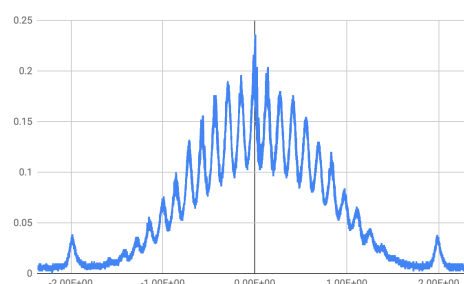


圖 1.7: 2 Gb/s 訊號之展頻頻譜

頻譜的形狀大致上與理論相符，但在 ± 2 GHz 的位置有一個突起的訊號，這是由於隨機訊號的上升與下降時間不夠快所致，若在數值模擬中把隨機訊號加上約 30 ps 的上升與下降時間（如圖），則會出現類似的結果，如圖：



(a) caption_2



(b) caption_2

此外，還可隱約看出該頻譜的包絡線有週期振盪的訊號，原因為我們使用的隨機訊號實際上是個重複出現的週期訊號，每個週期有 $2^{31} - 1$ 個位元，若把位元數調為 $2^{15} - 1$ 或者 $2^7 - 1$ 則可看到週期更大的震盪訊號，測量結果如圖 1.9。

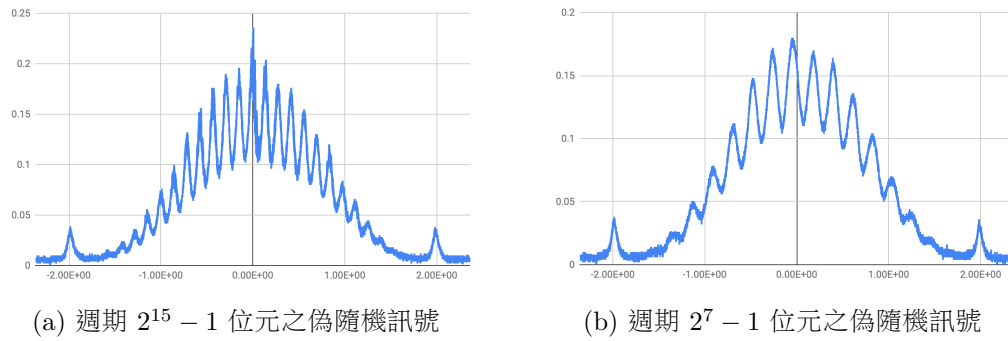


圖 1.9: 偽隨機訊號週期與展頻頻譜震盪之關係

從以上測量的頻譜可以看出，調製後的頻寬與理論計算的結果一致，所以我們認為 10 Gb/s 的隨機訊號能將訊號展至 ± 10 GHz 寬。

1.2.2 10 Gb/s 隨機訊號之相位調製

當兩台 EOM 同時開啟時，理論上要能將展寬的頻譜還原成調製前的狀態，但從圖 1.10 的實驗結果可以看出，壓縮回來的頻譜與調製前相比，中心頻率的強度僅為本來的 80%，若將電壓放大來看（如圖 1.11）可以觀察到，在調製前所有能量皆集中於中心頻率附近，但經過兩台 EOM 調製後，仍有部分能量分散在其他頻率沒被還原，導致中心頻率的強度降低。造成頻譜還原效果不佳的可能原因為，兩個隨機訊號的形狀與穩定度皆不同（如圖 1.12），導致無法將相位做反向的調製，使訊號完美還原成最初的狀態。

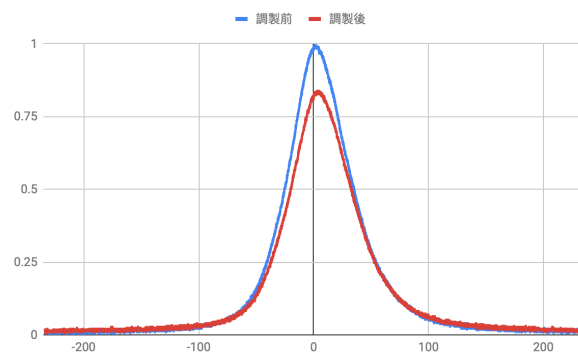


圖 1.10: 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜

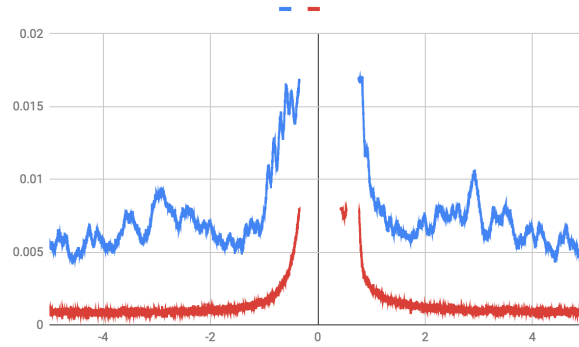
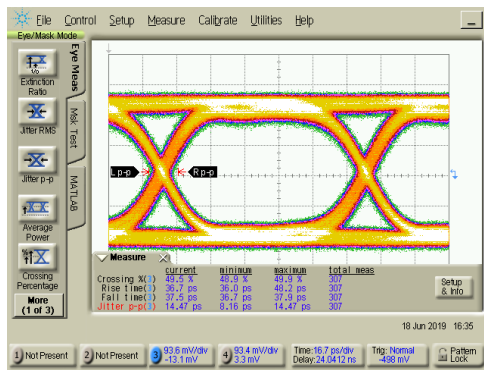
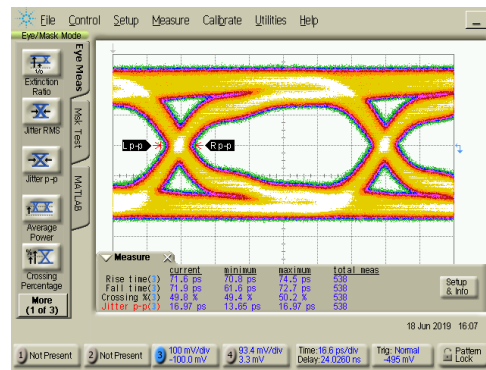


圖 1.11: 放大後之電訊號，紅線為未經調製的雷射頻譜，黑線為兩次調製後的訊號，雖能大致上將頻寬從 10 GHz 壓回 60 MHz，但從圖中可發現，中心以外的頻率仍能測到一些訊號。



(a) 第一台 EOM



(b) 第二台 EOM

圖 1.12: 經過放大器，進入 EOM 用以調製的兩組隨機訊號眼圖

1.3 ^{87}Rb 經相位調製後的原子吸收譜

如章節 ?? 所提，當光子的頻率很接近原子的躍遷能階時，光會被吸收，實驗上可以圖 1.5 的架設，將 Farby-Perot 干涉儀換成光二極體 (photodiode) 收光，連續調變入射光的頻率，測量透射 ^{87}Rb 原子氣體管的光強，從圖 1.13 藍線可以觀察到，在特定的兩個頻率位置附近光會被原子吸收，穿透率特別低。本實驗主要的目的為透過展頻技術，降低光子與原子的交互作用，使光子能不被吸收而增加透射率，所以若將第一台 EOM 開啟，將雷射的頻寬從 60 MHz 展至 10 GHz，此時的吸收譜如圖 1.13 紅線，在經過展頻後，無論在哪個頻率下光皆能大部分透射原子，調製前的光在 105 GHz 與 112 GHz 會被完全吸收，調製後卻有 75%

的光能透射原子，就如隱形了一般，展頻能降低光子受環境的影響。

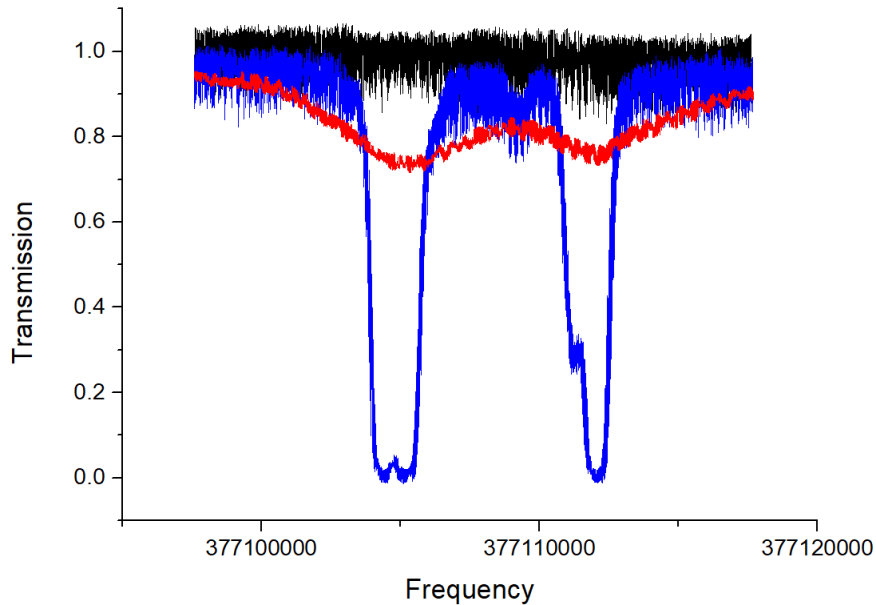


圖 1.13: 調製後的如原子吸收譜，黑線為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時的訊號；藍線為調製前 ^{87}Rb 原子氣體管的吸收譜；紅線為展頻後的吸收譜。

重畫，調整座標軸

1.4 單光子相位調製對原子吸收之影響

從前一小節的實驗結果能得知， ^{87}Rb 的躍遷頻率約在 105 GHz 與 112 GHz 附近，這時我們將光源從窄頻雷射換成單光子，並透過改變入射光的頻率與晶體溫度，將單光子的頻率調至 112300 MHz，使其能被原子吸收，再以圖 1.14 的光路架設，對光子進行相位調製與測量。

當兩台 EOM 皆關閉時，頻寬約為 4.5 MHz 的單光子會幾乎完全被原子吸收，光無法透射氣體管，但若對其進行 $G^2(\tau)$ 測量，卻會測到訊號，如圖 1.15，原因如章節 1.1.2 所述，是由於我們晶體產生的單光子源非單模 (single-mode)，其中還存在符合其他組準相位匹配條件 (quasi phase matching condition) 所產生的光，若要去除那些光子對實驗的影響，在此小節的數據處理上，我們直接將其當作雜訊扣除，只保留主要

待放圖片

圖 1.14: 單光子量測光路圖

模態的光；下一小節的實驗中，我們會外加一個 Etalon 濾波器，只讓 112300 MHz 附近的光通過。

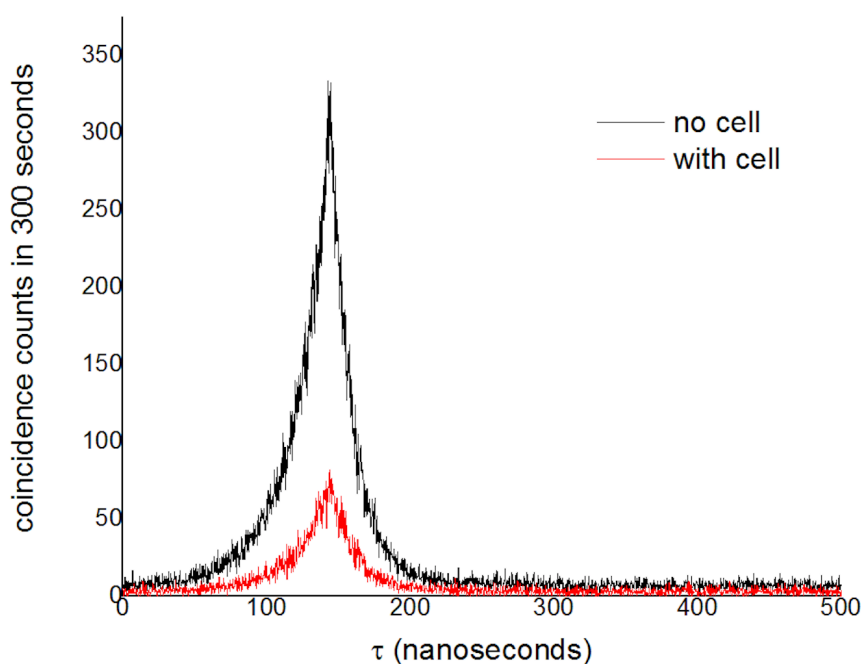


圖 1.15: 單光子通過 ^{87}Rb 氣體管之 $G^2(\tau)$ 量測，黑線為沒放氣體管時測到的訊號，放了氣體管後，其他模態的光因不在吸收頻率附近而能透射原子團不吸收，所以會測到紅線的訊號。

若開啟第一台 EOM，以 10 Gb/s 的隨機訊號對單光子進行相位調製，可以讓單光子的頻寬從 4.5 MHz 展至 10 GHz，使大部分的光可以透射 ^{87}Rb 氣體不被吸收，扣除雜訊後的 $G^2(\tau)$ 的測量結果如圖 1.16，透射率為 76%。另外，此時若將 ^{87}Rb 氣體管移除，直接測量展頻後的訊

號，能發現單位時間測量到的光子數與調製前相差不多，比較如圖 1.17，印證了本章第一小節的結論——相位調製僅改變頻率的分佈，不會影響光強。

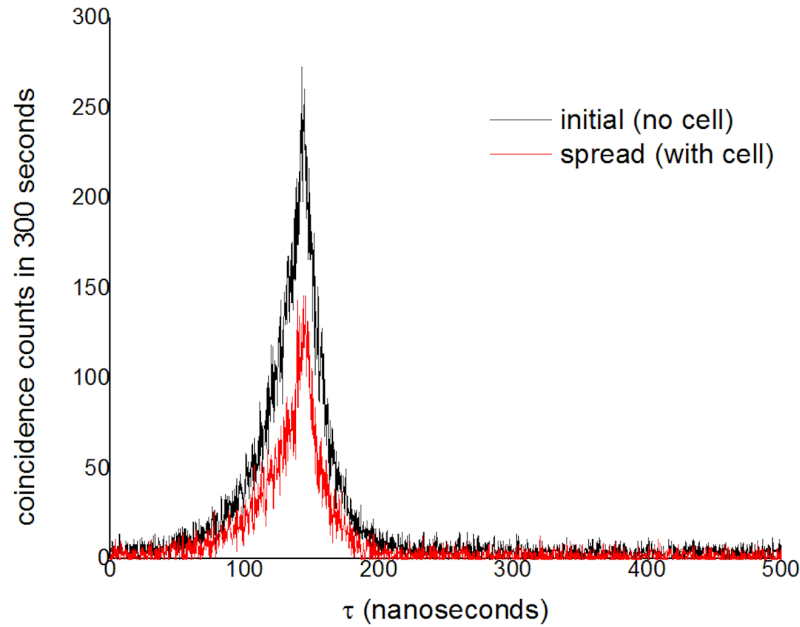


圖 1.16: 黑線為沒被放氣體管也沒調製時的 $G^2(\tau)$ 量測，紅線為展頻光子被部分吸收後之訊號，可以以兩者 coincidence counts（也就是圖下面積）的比值來計算透射率，約為 76%

待放圖片 待放圖片

(a) 調製前

(b) 調製後

圖 1.17: 沒通過 ^{87}Rb 氣體管之單光子 $G^2(\tau)$ 量測。有無相位調製時的雙光子產生率幾乎相同

從前述的結果可知，未經調製的窄頻單光子會幾乎被 ^{87}Rb 原子吸收，無法透射氣體管，透射率幾乎為零，但經過 10 Gb/s 隨機訊號的調製後，可讓透射率提升至 76%，如同穿上隱形斗篷般，能大部分的光子

不會與原子產生交互作用，直接穿透原子團。

1.5 雷射光相位調製對原子吸收之影響

在上一小節中，我們對單光子進行相位調製，觀察展頻對吸收率之影響，為確定此現象在不同系統下能維持一致性，我們將圖 1.14 光路架設的光源改為雷射光，單光子探測器改用光二極體，並將雷射調至與單光子同樣的波長去進行相同的量測，實驗結果如圖 1.18，與單光子的量測結果相近，調製前的光幾乎會全部被原子團吸收，但經過展頻後的雷射光能有約 80% 的穿透率，也能達到隱形斗篷的效果。

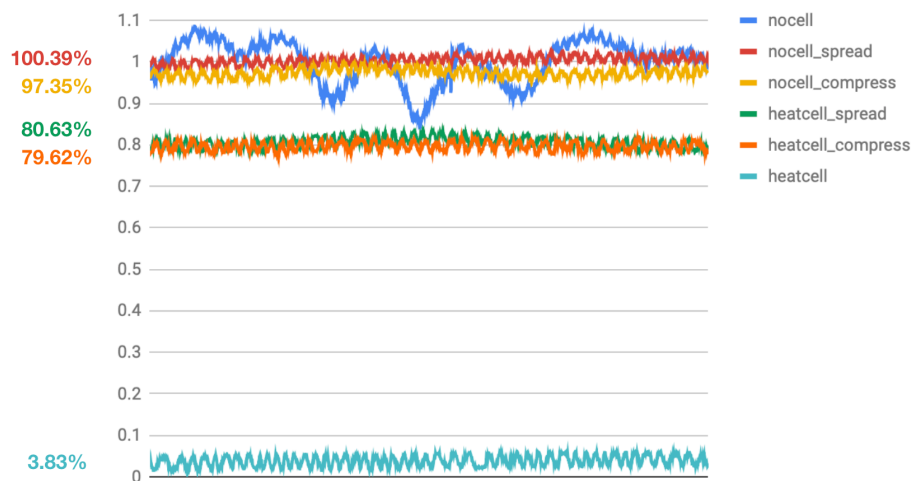


圖 1.18: 雷射光相位調製對穿透率之影響，最上面三條線（藍、紅與黃色）為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測，無論是展頻還是壓縮，相位調製皆不會影響光強；中間兩條線（綠色與橘色）為展頻後通過氣體管所測得的訊號，約 80% 的光能因相位調製而穿透原子團而不被吸收；最下面的藍線為兩台 EOM 關閉時測到的訊號，未經調製的光會幾乎都被原子吸收。

1.6 不同展頻頻寬對吸收率之影響

由章節 ?? 的模擬可知，使用越高頻的隨機訊號去展頻可提升光子隱形的效果，為驗證此理論，我們分別使用 2, 4, 6, 8, 10 Gb/s 的隨機訊

號去展頻，並透射原子團測量穿透率，實驗結果如圖 1.19，從結果可看出，無論是雷射光或單光子，頻寬越大，吸收率越低，使用越高的頻率去進行調製，的確能增加光子的隱匿性，降低環境或竊聽者的影響。

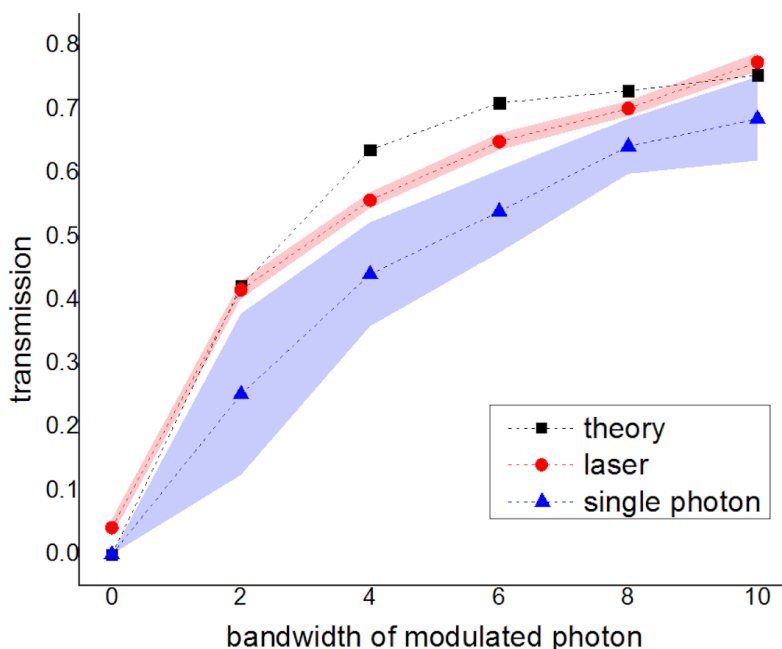


圖 1.19: 黑色為數值模擬；紅線與藍線分別為雷射光與單光子的實驗測量結果，數據點的值為數次測量的平均，帶狀的寬度為測量的標準差。單光子的標準差較大是實驗穩定度不佳造成的。

此外，可以看出單光子的透射率皆比雷射光低一些，或許是因為單光子較容易被原子團吸收所致。

1.7 單光子頻譜壓縮

從前兩小節的結果可知，使用展頻技術可以有效的降低環境對光子的影響，但若考量到接收訊息端可能會需要光子原始的相位資訊，或者需要讓光子與 ^{87}Rb 原子進行交互作用，我們必須要開啟第二台 EOM 進行反向的調製，盡量使光子還原到原先的狀態，若以圖 1.14 的光路架設，除了第一台 EOM 外，將第二台也開啟，由於相位調製不影響光強與波形，單就 $G^2(\tau)$ 的測量無法得知頻譜的變化，因此要將光路架設改為

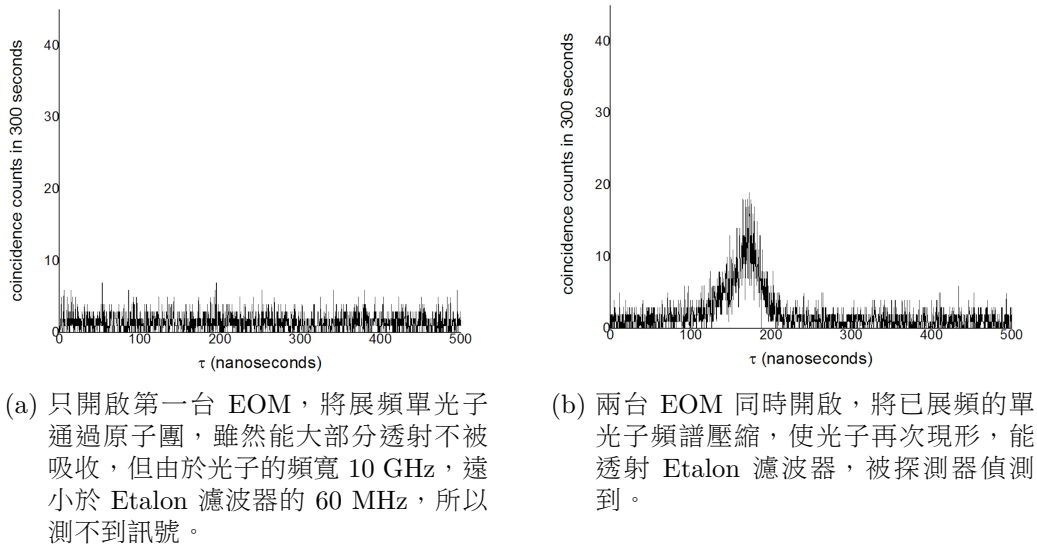
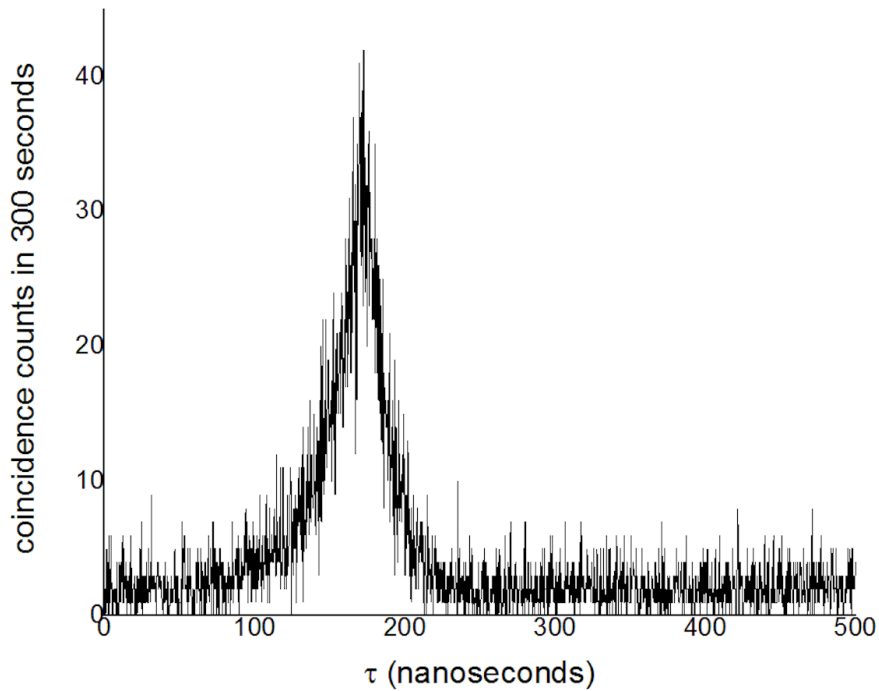
圖 1.21，在單光子探測器前加上 Etalon 濾波器，限制只讓頻寬 60 MHz 內的光通過，如此一來，只要能測到訊號就代表部分光子的頻寬有被壓窄至 60 MHz 內，另一方面，這也可以將上一小節及提的雜訊去除。

待放圖片

圖 1.20: 加上濾波器之單光子量測光路圖

以圖 1.21 的光路架設，只開啟第一台 EOM 時，被展頻的單光子能大部分透射原子團，但由於 Etalon 的過濾，頻寬 10 GHz 的光子幾乎無法抵達探測器，因而測不到明顯的訊號，結果如圖 1.21a。若將第二台 EOM 也開啟，將已展頻且被部分吸收的單光子頻譜壓縮，則能再次測到訊號，如圖 1.21b，與調製前且沒放氣體管時的初始訊號相比，透射率為 42.3%。

為了知道原子吸收對於單光子頻譜的壓縮有何影響，我們以同樣的光路架設，在沒放 Etalon 濾波器時，同時開啟兩台 EOM，測量結果如圖 1.22 黑線，與調製前的訊號相比，透射率為 77.9%；放上 ^{87}Rb 原子氣體管後的訊號為紅線，透射率為 42.3%。

圖 1.21: 加上 Etalon 濾波器之單光子 $G^2(\tau)$ 量測圖 1.22: 在兩台 EOM 同時開啟時測量 $G^2(\tau)$ ，黑線為沒經過 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測；紅線為透射 ^{87}Rb 原子氣體管之訊號。

1.8 雷射光頻譜壓縮

同樣的，我們以上一小節相同的架設，將光源換成雷射光，單光子探測器改為光二極體，且進行同樣的測量，結果如圖 1.23，與單光子的量測結果相近，經展頻後在壓縮的光，約 70% 能通過 Etalon 濾波器，

若在中間放氣體管使部分光被吸收，僅 40% 的光能通過 Etalon，被重新壓回窄頻雷射

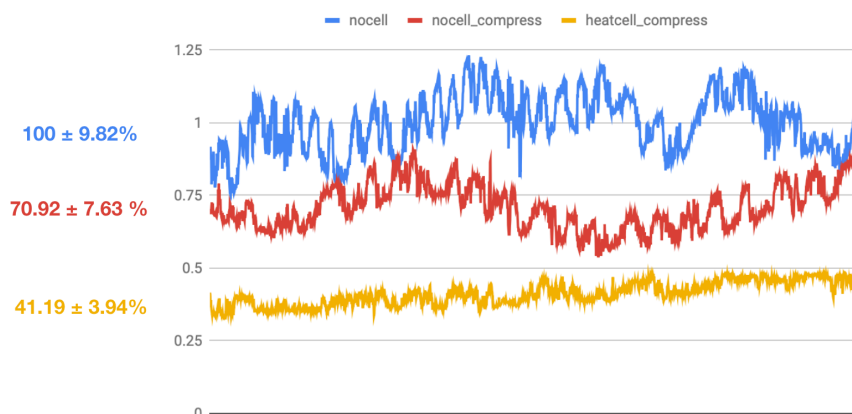


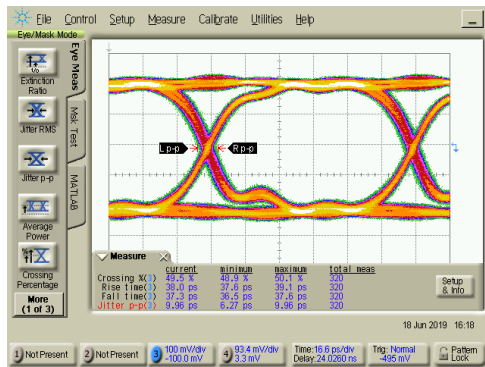
圖 1.23: 原子吸收對雷射光壓縮品質比較圖

補上另一條紅色的線

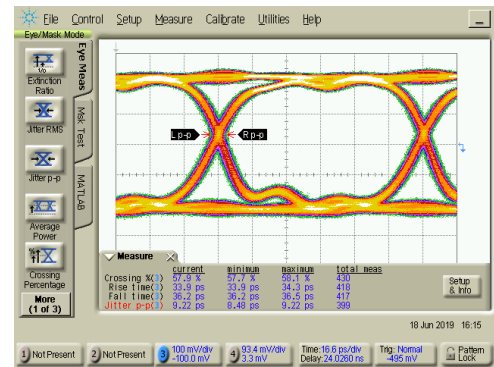
1.9 誤差分析與模擬修正

由相位調製的基本原理可知，若輸入兩台 EOM 的隨機訊號符合式 () 的條件，則能完美的將光的相位與頻譜還原成最初的狀態，在我們實驗中所使用的窄頻雷射與單光子，頻寬皆遠小於 Etalon 濾波器的頻寬，在沒原子團吸收的狀況下，被展頻再壓縮的光應該要能 100% 通過 Etalon，這與實驗測量的結果不符，我認為主要的可能原因為隨機訊號的品質不佳所致，兩個訊號從 PRBS 輸出時的波形如圖 1.24，兩者形狀不一致，且上下不對稱，若在經過延長線與高頻訊號放大器波形則變為圖 1.25，兩者變得更不一致，有著不一樣的波形、穩定度、上升時間、下降時間與交叉位置 (crossing)，這些因素都會使兩台 EOM 的調製無法互相抵消，讓相位無法還原至最初的狀態。除此之外，也有能是因為兩台 EOM 對高頻訊號的響應不同，也會影響調製的結果。

為了確認上述的因素所造成的影響，根據圖 1.25 的測量結果，修正

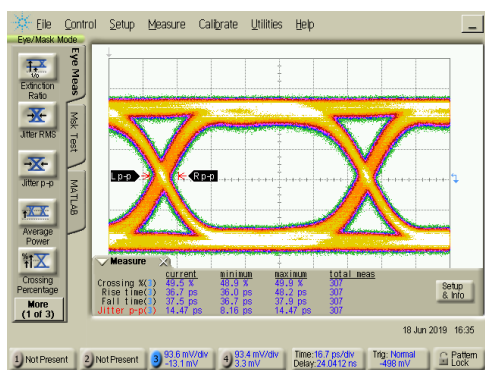


(a) 第一台 EOM

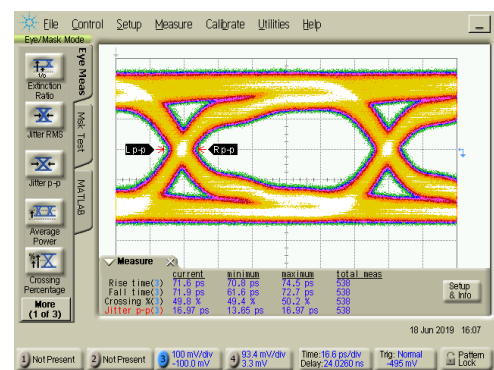


(b) 第二台 EOM

圖 1.24: PRBS 輸出之訊號眼圖 (放大前)



(a) 第一台 EOM



(b) 第二台 EOM

圖 1.25: PRBS 輸出之訊號眼圖 (放大後)

模擬時使用的隨機訊號，修正的參數如 表 1.1，並將實驗結果與理論模擬整理成 表 1.2

表 1.1: 數值模擬參數修正

	jitter	amplitudu	rising & falling
EOM 1	14 ps	$\pm 7.7\%$	38 ps
EOM 2	16 ps	$\pm 16.7\%$	144 ps

表 1.2: 展頻後的光經過 ^{87}Rb 之穿透率

	修正前理論	修正後理論	雷射光實驗	單光實驗
穿透率	79.1%	73.8%	76.0%	79.6%