

一、 實驗架設與結果討論

本章為實驗的主軸，會從光源的製備出發，介紹實驗上會用到兩種不同光源的產生機制。再介紹光路的架設與其測量上限制，且會在同樣的架設下，分別以兩種不同的光源去測量，交叉驗證不同系統下實驗的結果，並與前幾章的理論計算比較，探討可能產生誤差的原因，以實際的狀況去修正理論模擬，讓計算結果更貼近測量數據，

1.1 光源製備

1.1.1 雷射光

雷射光源為 TOPTICA 的 DLC TA-SHG PRO 雷射系統，可產生中心波長約為 795 nm 的窄頻雷射。此雷射的特點為出光頻率可調，可以透過電壓大小來改變共振腔上光柵的角度，以調整出光的頻率，實際上會用電腦控制，經由資料擷取器（DAQ, Data Acquisition Device）輸出電壓至雷射系統。此外，我們還會將光源一分為二，將其中一道光做為參考光（reference light）打入波長計（wavemeter），其型號為 WSU 30 (HighFinesse)，可由電腦讀出雷射的頻率與波長等數值。結合前述的電壓控制與波長讀值，可形成一個 PID (proportional-integral-derivative) 回饋系統，我們能以此系統精準的調整雷射頻率，將其穩定度控制在 2 MHz 內。

除了波長 795 nm 的紅光外，雷射系統內還有一塊置於共振腔內的非線性晶體，可將前述的紅光打入內，以倍頻效應 (Simple-Harmonic Generation, SHG) 產生波長為

397.5 nm 的藍光，可用來打入另一塊非線性晶體，以自發參量下轉換 (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 的過程產生 795 nm 的單光子。

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 (Periodically Poled KTP) 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。

在晶體設計中，我們在晶體的末端鍍上 397.5 nm 的高反射薄膜，使入射藍光在末端被反射，此舉等效於將晶體變為兩倍長，從?? 的增益曲線 (gain curve) 中可知，當晶體長度 L 變兩倍，增益曲線會變窄。除此之外，還會在晶體兩端都度上 795nm 的高反射薄膜，使晶體本身形成一個紅光的共振腔，只有在增益曲線內且符合能量守恆的共振模態才會產生雙光子對。基於上述的兩種鍍膜帶來的效果，這樣的設計能讓我們產生出接近單模 (single mode) 的窄頻光子，且相對的會有較長的相干時間 (coherence time)，利於我們對光子的時間波包進行調製。

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 (??)。

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

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 (SPCM-AQRH-14-FC, Excelitas Technologies) 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??，此光子之時間波包寬度約為 50 ns，對此時間波包做傅立葉轉換，可計算出

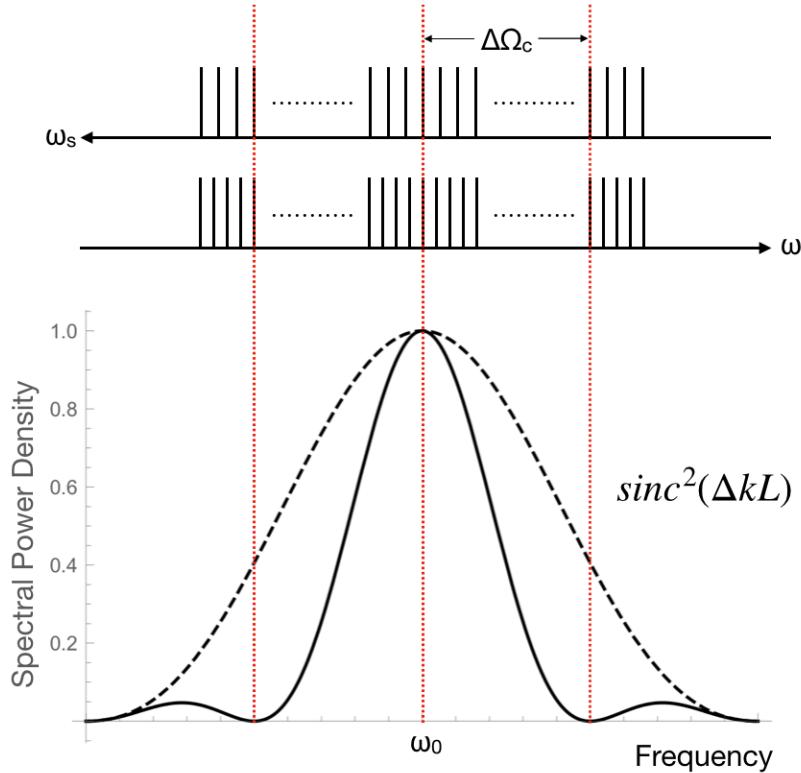


圖 1.1: 雙光子產生機制，下半部為晶體之增益曲線；上半部為共振模態， ω_s 與 ω_i 互相重疊的部分為符合能量守恆條件的模態。僅有在增益曲線內且符合能量守恆的模態會被產生。

光子的頻寬約為 4.5 MHz。

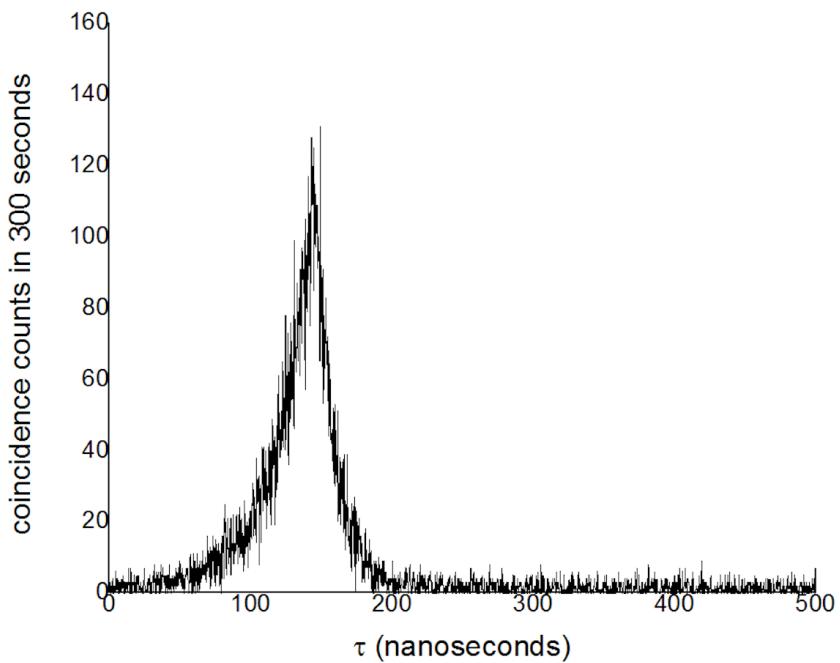


圖 1.2: 紳纏光子對之 $G^2(\tau)$ 量測

一、實驗架設與結果討論

為了找到符合準項未匹配條件的入射光波長與晶體溫度，實驗上會以?? 的光路架設，將入射紅光的頻率固定在 377105489 MHz，改變 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率 (biphoton rate)，結果如??，在 39.91°C 至 40.10°C 有四組符合條件的模態，紅線與黑線分別為有放與沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之測量結果，兩者比較可以發現在第二和第三個的模態中雖有明顯的吸收，但吸收率不高，我們認為這是因為在頻域上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原子吸收，其他頻率的光子仍會透射，因此無法讓透射率趨近於零。

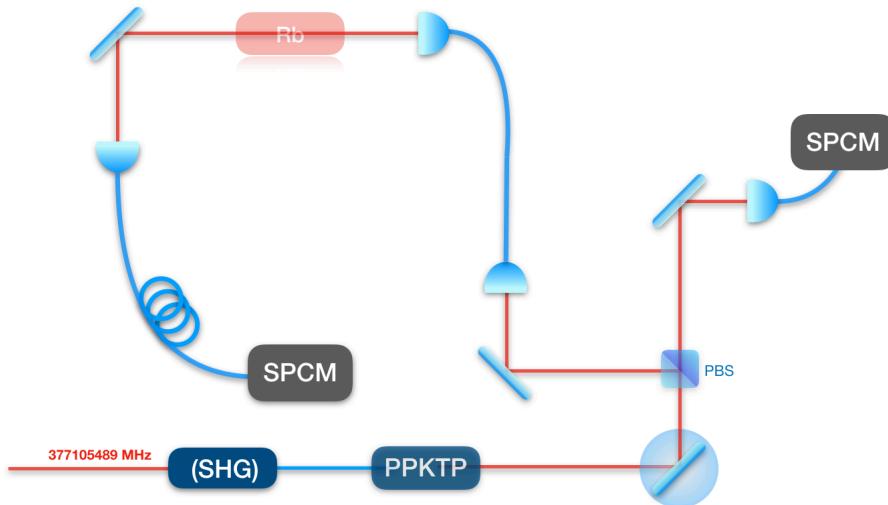


圖 1.3: 固定入射光頻率，調整 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率

為了確認光是否為多模，我們在 ^{87}Rb 氣體管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，實驗架設如 ??，先不放 ^{87}Rb 原子氣體管時，比較有無 Etalon 濾波器時測量之結果，如??，黑色為沒放 Etalon 濾波器時測量到的訊號，紅色為經過 Etalon 濾波後之訊號，兩者相比可看出，有放 Etalon 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 原子氣體管放回光路，並對其中第二和第三個模態進行相同的量測，結果如?? 藍線，濾波後的光幾乎完全被 ^{87}Rb 原子吸收，與?? 相比可明顯看出，我們的單光子源的確是多模，含有兩種以上的頻率的成分，所以光才無法被完全吸收。

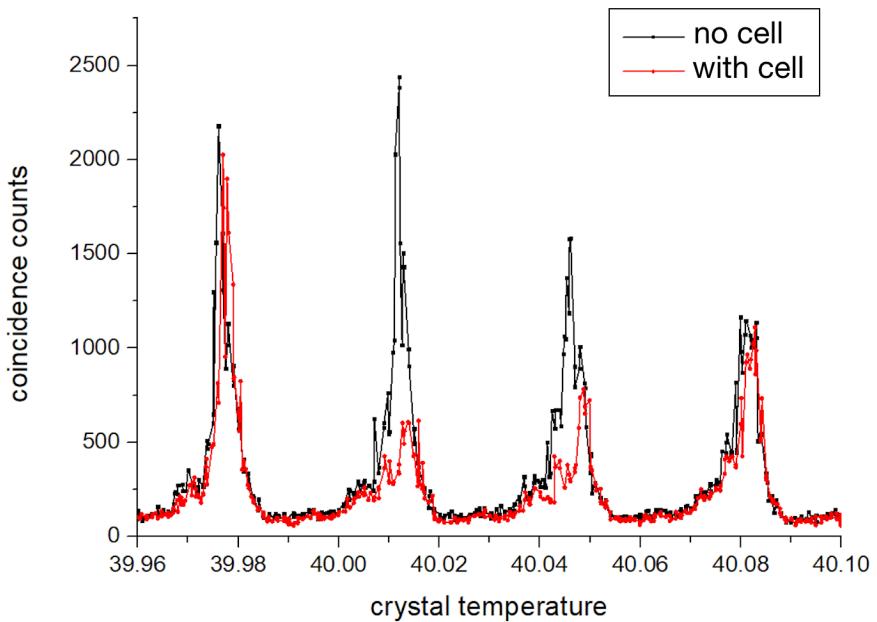


圖 1.4: 調整溫度測量雙光子產生率，黑線為直接對雙光子進行量測；紅線為先讓其中一顆單光子通過 ^{87}Rb 氣體管再測量，其中第二和第三個模態穿透率下降，表示有部分的光被 ^{87}Rb 原子吸收。

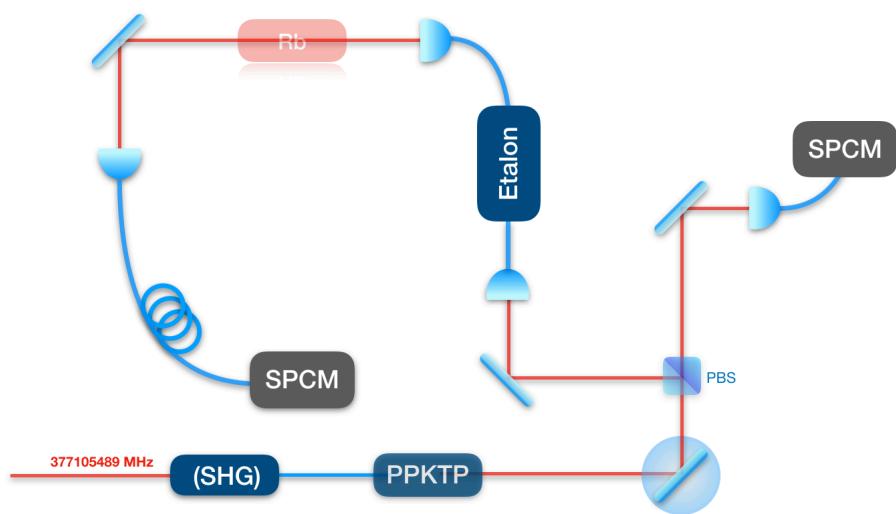


圖 1.5: 固定入射光頻率，調整 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率（加上 Etalon 濾波器）

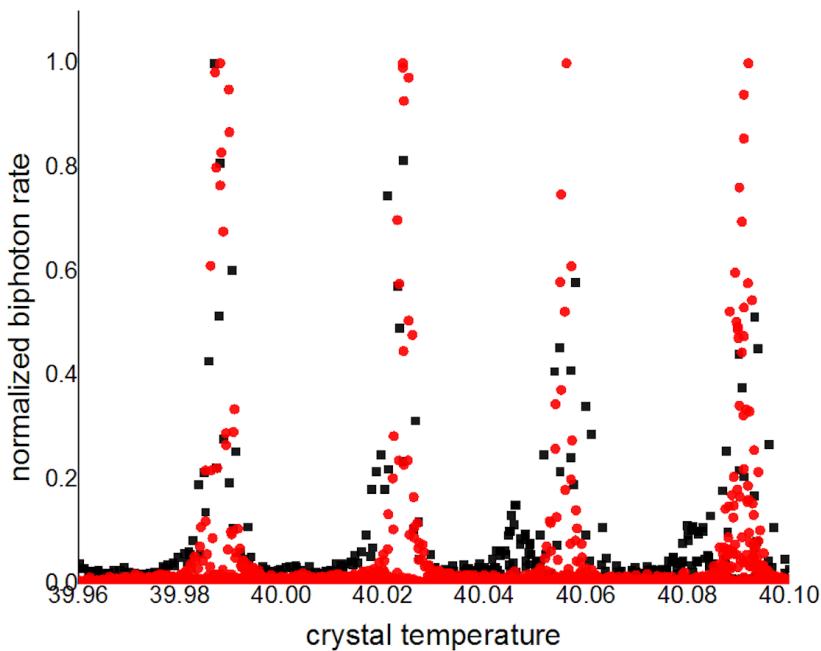


圖 1.6: 在沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之測量。黑色為無 Etalon 濾波器時測量之訊號，紅線為加上 Etalon 濾波器測量到的訊號，兩者相比可看出，加上 Etalon 濾波器後測量到的頻寬較小，代表有部分的光被濾掉了

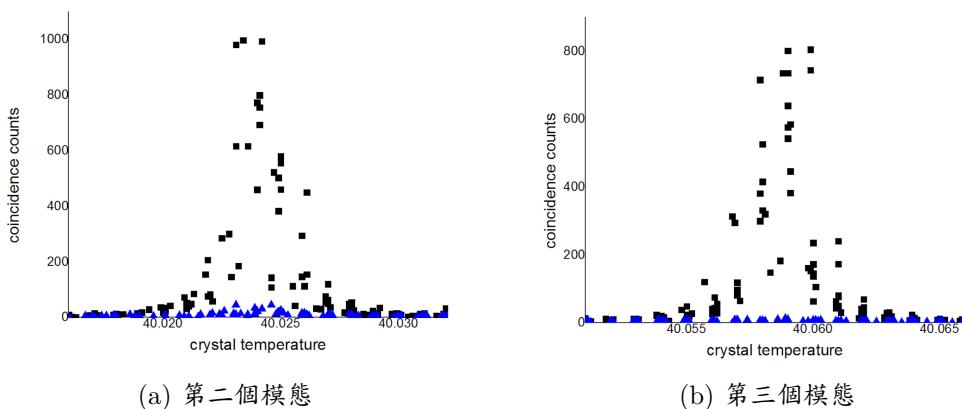


圖 1.7: 加上 Etalon 濾波器之後，測量光子對原子之穿透率。黑色為未放 ^{87}Rb 原子時測量到的訊號，藍色為放了 ^{87}Rb 原子後測量到的訊號，光幾乎完全被 ^{87}Rb 吸收。

1.2 雷射頻譜量測

實驗光路架設如??，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。

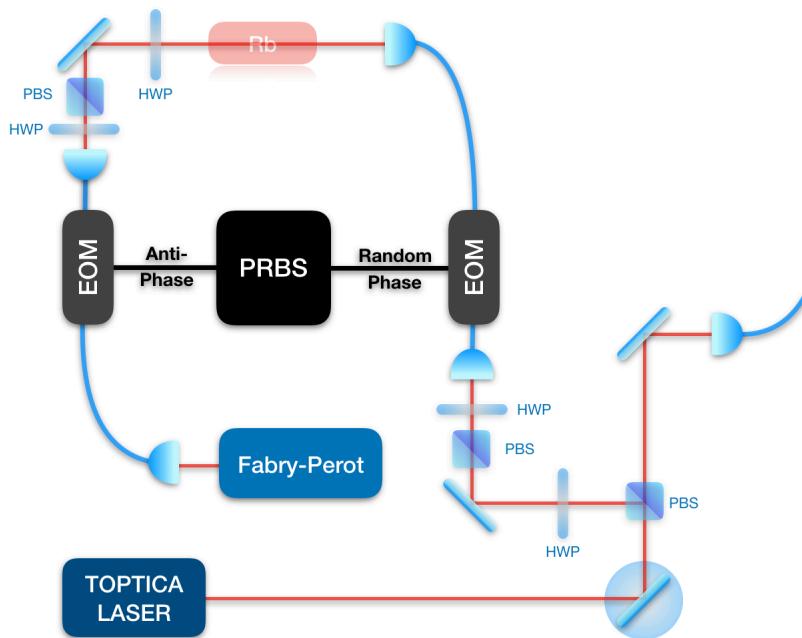


圖 1.8: 雷射頻譜量測光路圖

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??，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正負 10 GHz 寬，但由於我們的使用的 Fabry-Perot 干涉儀 FSR 僅 10 GHz，無法涵蓋完整的頻率分佈區間，這會使測量的結果失真，所以下面會先以 2 Gb/s 的訊號來測試展頻的結果是否符合理論模擬。

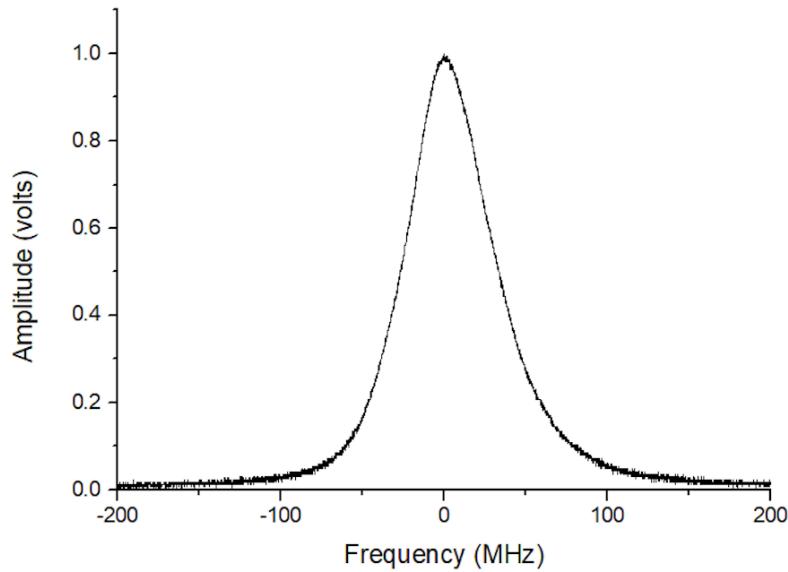


圖 1.9: 以頻寬 60MHz 的 Fabry-Perot 干涉儀掃出之雷射頻譜

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??。

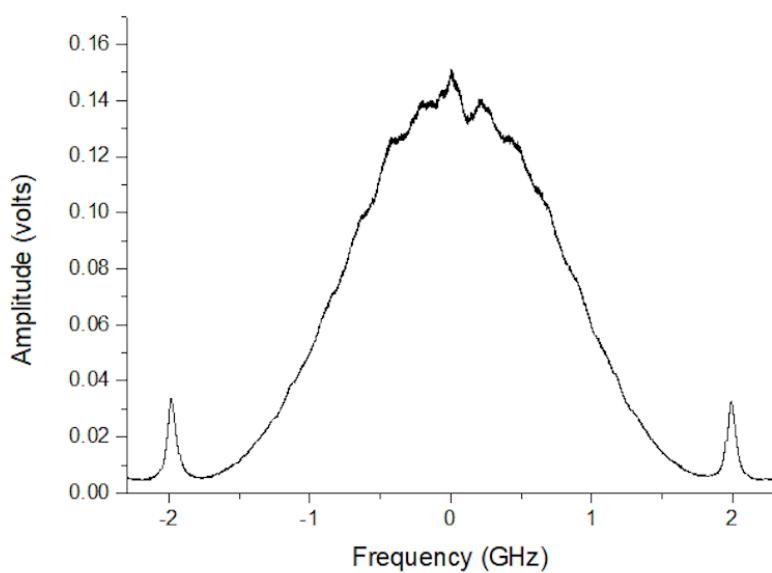


圖 1.10: 2 Gb/s 訊號之展頻頻譜

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 100 ps 的上升與下降時間（如??），則會出現類似的結果，如??。

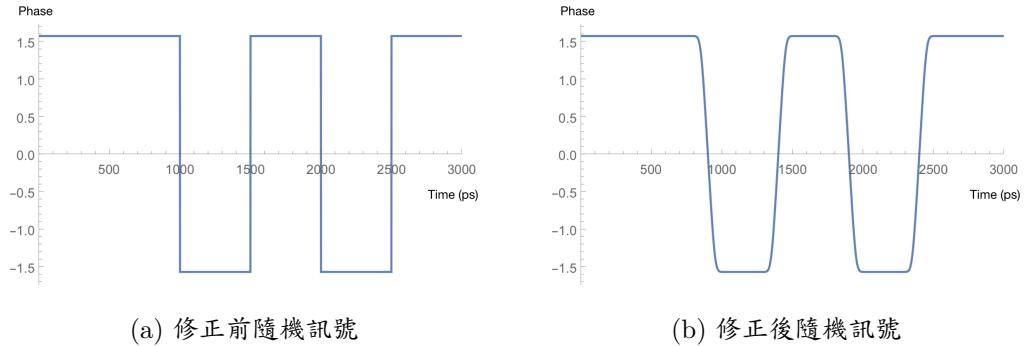


圖 1.11: 隨機訊號修正，加上上升時間與下降時間。

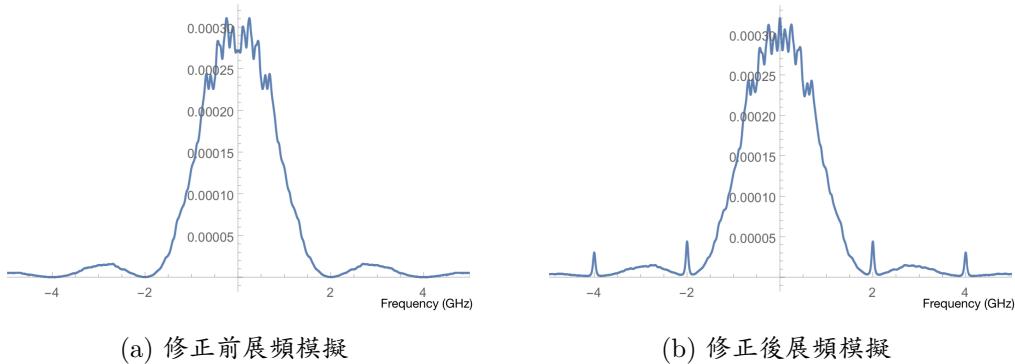


圖 1.12: 隨機訊號之上升與下降時間對頻譜之影響，隨機訊號加了上升與下降時間後的模擬更貼近實驗結果。

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??。

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能將訊號展至 ±10 GHz 寬。

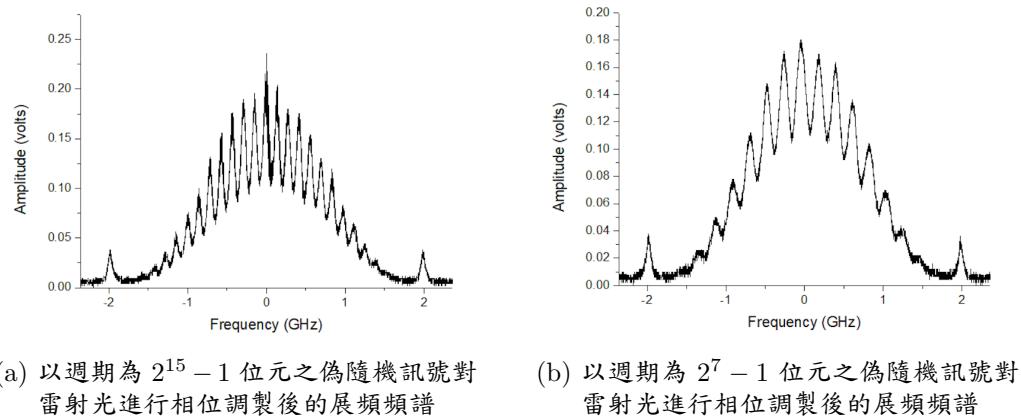


圖 1.13: 偽隨機訊號週期與展頻頻譜振盪之關係

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??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??）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??），使相位無法被反向調製，還原成最初的狀態。

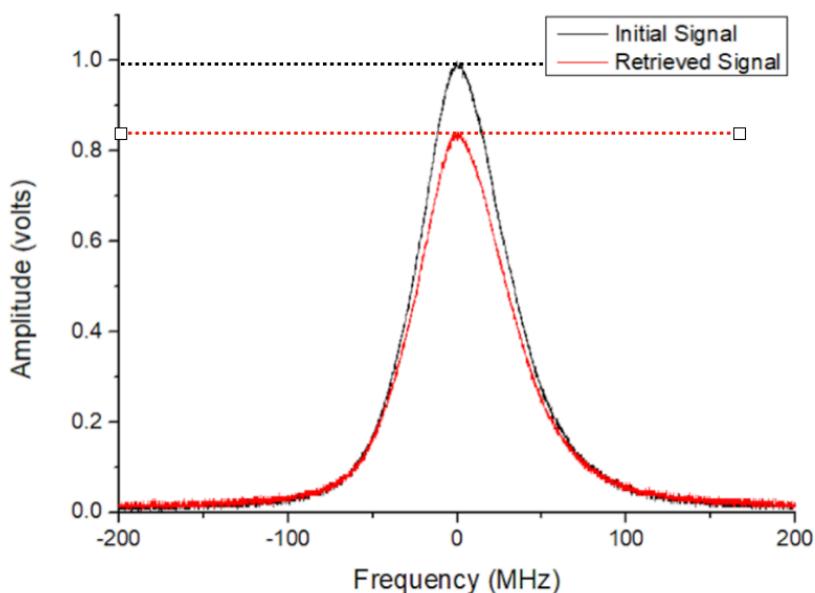


圖 1.14: 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜

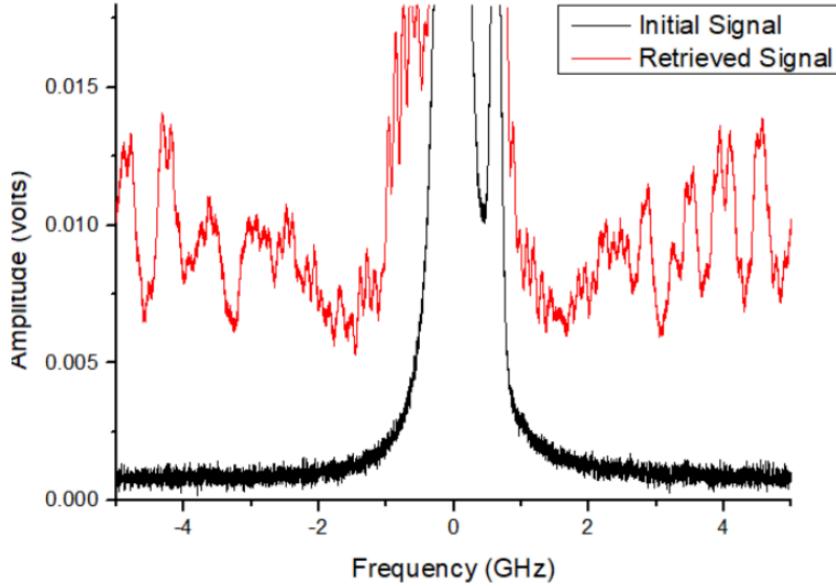


圖 1.15: 放大後之電訊號，黑線為未經調製的雷射頻譜，紅線為經兩次調製後還原的訊號，雖能大致上將頻寬從 10 GHz 壓回 60 MHz，但從圖中可觀察到，中心以外的頻率仍能測到一些訊號，仍有部分的能量分散在其他頻率沒被還原。

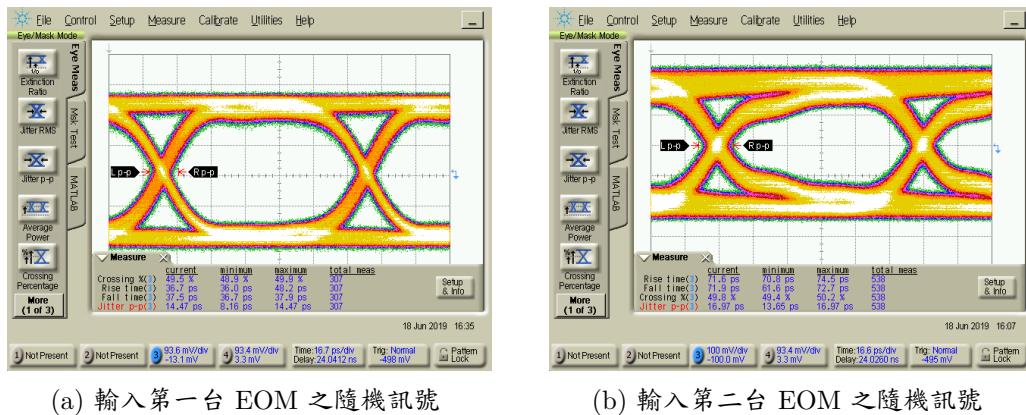


圖 1.16: 經過放大器，進入 EOM 用以調製的兩組隨機訊號眼圖

1.3 經隨機相位調製後之 ^{87}Rb 原子吸收譜

在?? 中，我們探討了隨機相位調製對於 ^{87}Rb 原子吸收率之影響，特定頻率光能被原子完全吸收，但在經過隨機相位調製後能大幅降低原子的吸收率。在此小節中，我們會對光進行隨機相位調製，並連續的調整雷射光頻率，去測量調製後的光對 ^{87}Rb 原子的穿透率，以掃出此時的 ^{87}Rb 原子吸收譜。

實驗架設如??，只開啟第一台 EOM 將雷射光的頻寬從約 1 MHz 展至 10 GHz，再

一、實驗架設與結果討論

讓光通入 ^{87}Rb 原子氣體管，測量結果如?? 紅線，經展頻後，無論在哪個頻率下光皆能大部分透射原子，若與調製前測得的頻譜（?? 黑線）相比，在 377105 GHz 與 377112 GHz 時光本來會被完全吸收，調製後卻有 75% 能透射原子團，如隱形了一般，由此可知，展頻能部分避免光子被吸收，有效降低環境的影響。

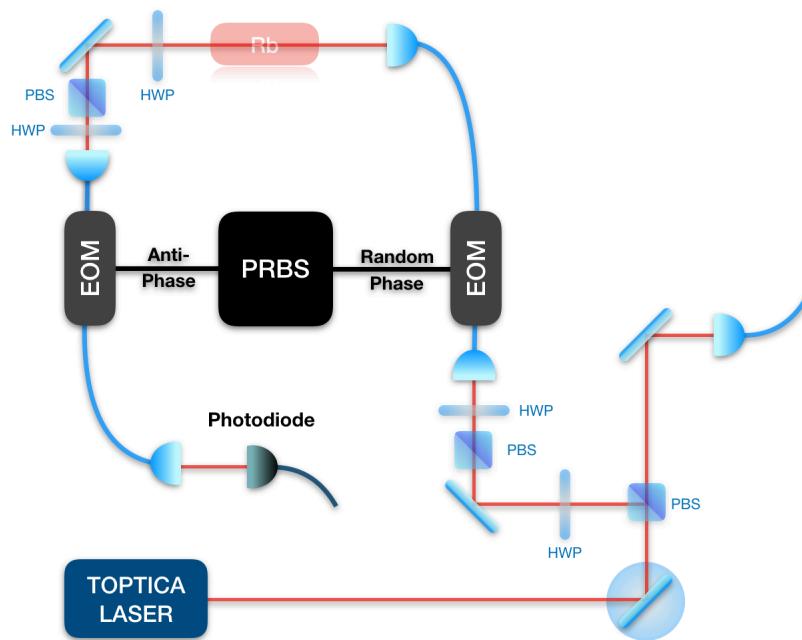


圖 1.17: 展頻雷射光 ^{87}Rb 原子吸收譜測量光路圖

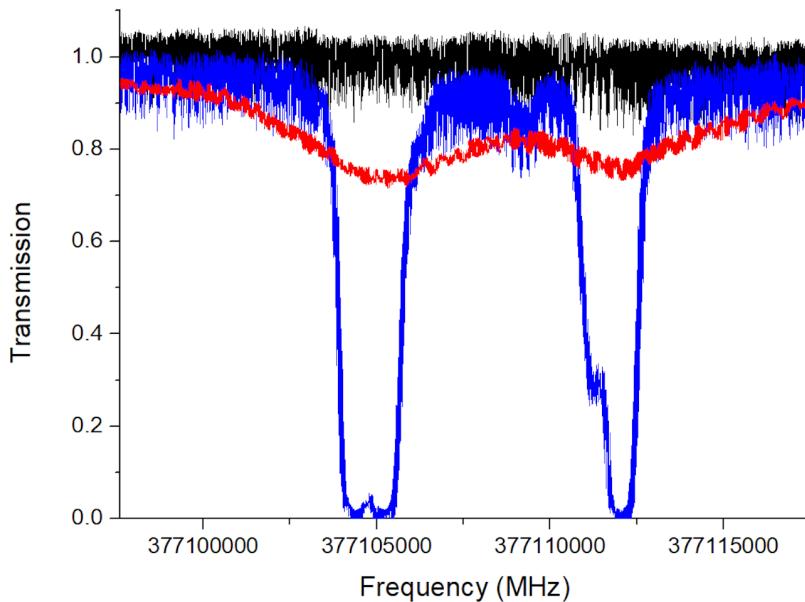


圖 1.18: 調製後的 ^{87}Rb 原子吸收譜，黑線為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時的訊號；藍線為調製前 ^{87}Rb 原子氣體管的吸收譜；紅線為展頻後的吸收譜。

1.4 單光子隨機相位調製對原子吸收之影響

從?? 的量測結果可知，當我們將紅光雷射的頻率固定於 37710589 MHz，將晶體溫度調至 $40.023^{\circ}C$ 時能產生會被 ^{87}Rb 原子吸收之單光子，為了確定該光子之頻率，我們使用 Etalon 濾波器，連續的調整濾波器的溫度，改變允許光通過的頻率，直到能在濾波器後面測到單光子的訊號，在測到訊號時固定濾波器的溫度，將光源改為紅光雷射，且連續的改變其頻率，直到雷射光能通過 Etalon 濾波器，此時的雷射光頻率為 377112294 MHz，即是單光子之頻率。

知道單光子的頻率後，即可開始對光子進行相位調製與相關測量，光路架設如?? 在這個架設中，我們可以測量隨機相位調製對於 ^{87}Rb 原子吸收率之影響。

如?? 所述，我們晶體產生的單光子源非單模 (single-mode)，在這組準相位匹配條件 (quasi phase matching condition) 下，同時有兩種以上頻率的光符合共振條件而被產生，所以在兩台 EOM 都關閉時，未經調製的窄頻光子通過 ^{87}Rb 原子氣體管不會完全被吸收，若對其進行 $G^2(\tau)$ 測量，會測到一些訊號，如??，若要去除那些光子對實驗

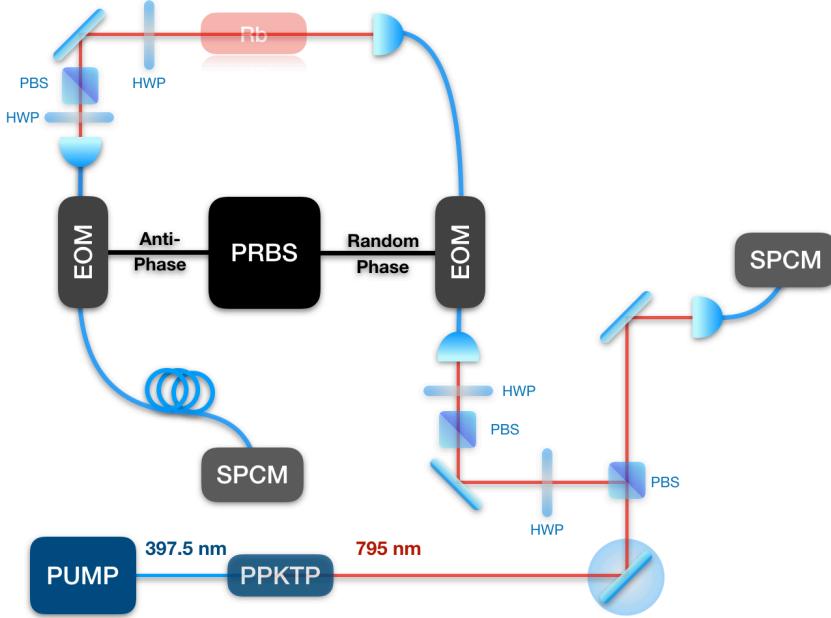


圖 1.19: 單光子量測光路圖

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 377112294 MHz 附近的光通過。

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 原子氣體不被吸收，扣除雜訊後的 $G^2(\tau)$ 的測量結果如??，本該被原子吸收的光，因展頻而有能 76% 的透射率。

此時若將第二台 EOM 也開啟，使頻譜被壓縮且還原，再進行 $G^2(\tau)$ 測量，結果如??，與??相比，兩者單位時間測得的光子數幾乎相同，可見相位調製僅會改變頻率的分佈，不會影響光強。

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被吸收，不與原子產生交互作用，會直接穿透原子團。

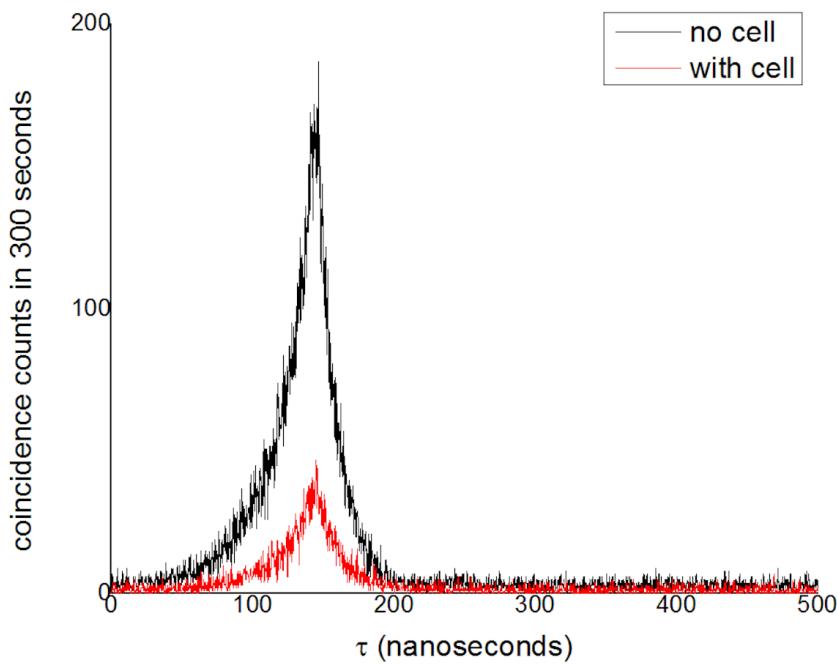


圖 1.20: 單光子通過 ^{87}Rb 原子氣體管之 $G^2(\tau)$ 量測，黑線為沒放氣體管時測到的訊號，放了氣體管後，其他模態的光因不在吸收頻率附近而能透射原子團不吸收，所以會測到紅線的訊號。

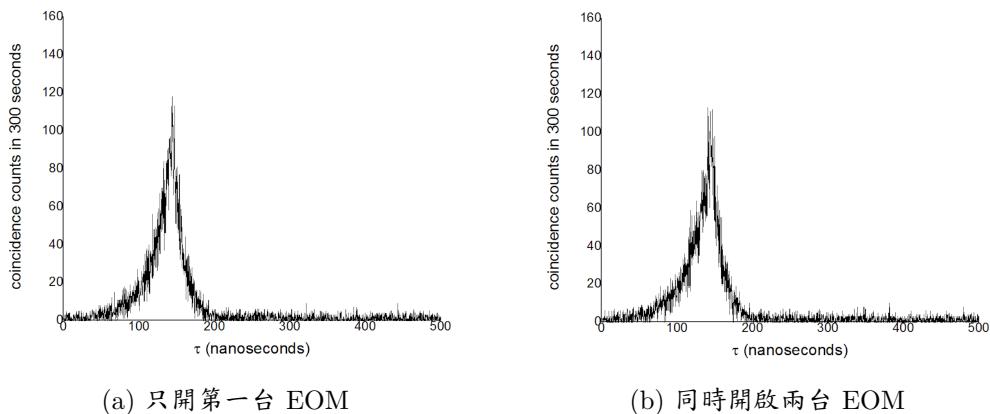


圖 1.21: 相位調製不影響波形與光強，僅改變頻率的分佈。

1.5 雷射光隨機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??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??，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。

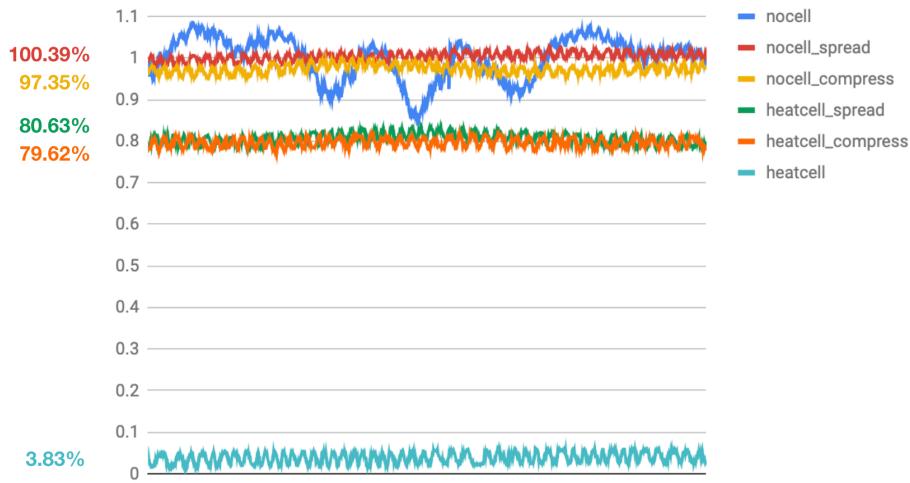


圖 1.22: 雷射光相位調製對穿透率之影響，最上面三條線（藍、紅與黃色）為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測，無論是展頻還是壓縮，相位調製皆不會影響光強；中間兩條線（綠色與橘色）為展頻後通過氣體管所測得的訊號，約 80% 的光能因相位調製而穿透原子團而不被吸收；最下面的藍線為兩台 EOM 關閉時測到的訊號，未經調製的光會幾乎都被原子吸收。

1.6 不同展頻頻寬對吸收率之影響

由??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??，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，確時能增加光子的隱匿性，降低環境或竊聽者的影響。

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。

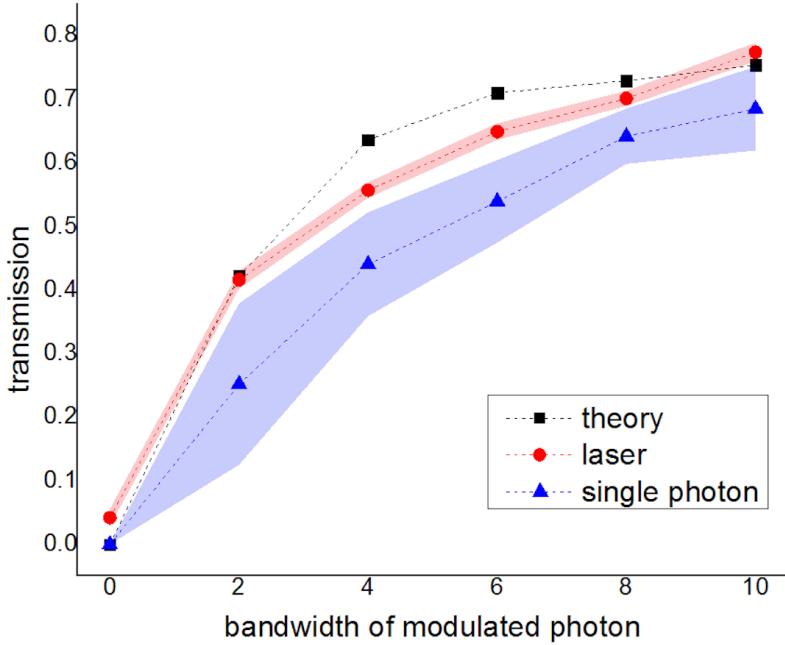


圖 1.23: 黑色為數值模擬；紅線與藍線分別為雷射光與單光子的實驗測量結果，數據點的值為數次測量的平均，帶狀的寬度為測量的標準差。單光子的實驗結果標準差較大是由於晶體溫控穩定度不夠造成的。

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?? 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??，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。

以?? 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

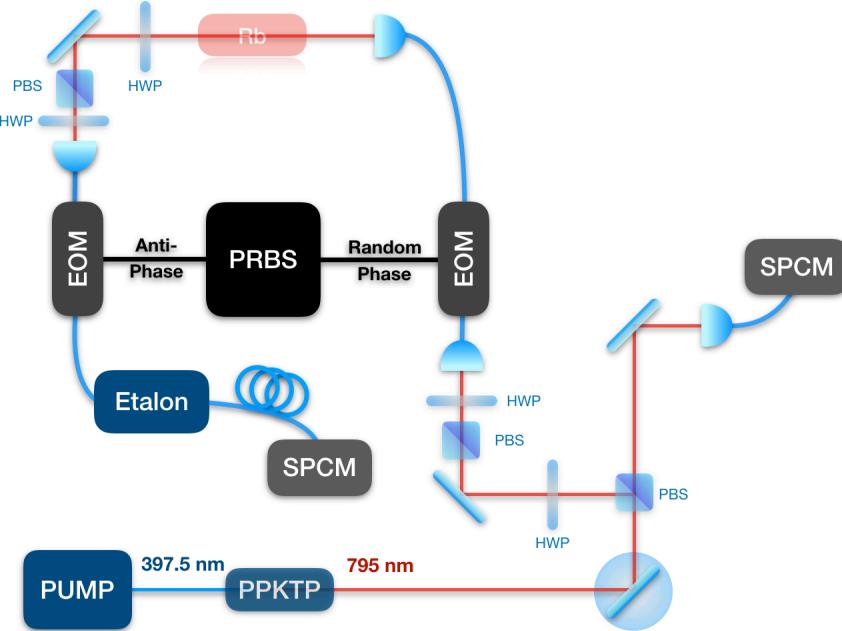
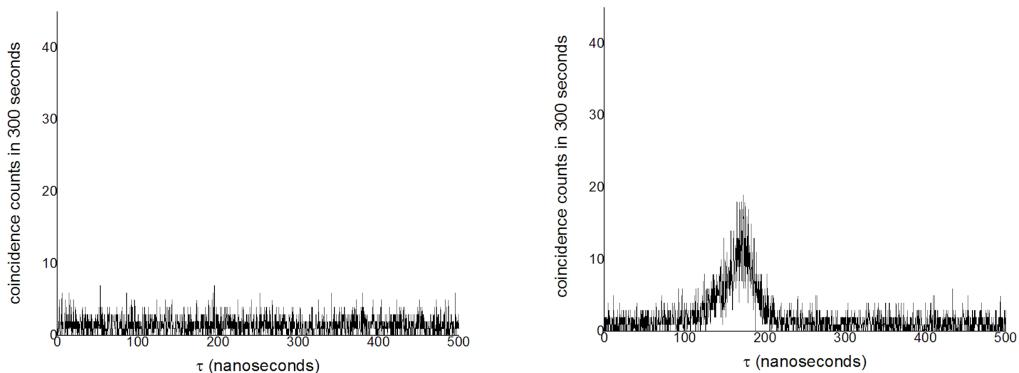


圖 1.24: 加上濾波器之單光子量測光路圖

訊號，結果如??。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??，與調製前且沒放氣體管時的初始訊號相比，透射率為 42.3%。



(a) 只開啟第一台 EOM，將展頻單光子通過原子團，雖然能大部分透射不被吸收，但由於光子的頻寬 10 GHz，遠小於 Etalon 濾波器的 60 MHz，所以測不到訊號。

(b) 兩台 EOM 同時開啟，將已展頻的單光子頻譜壓縮，使光子再次現形，能透射 Etalon 濾波器，被探測器偵測到。

圖 1.25: 加上 Etalon 濾波器之單光子 $G^2(\tau)$ 量測

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 ^{87}Rb 原子氣體管時同時開啟兩台 EOM，測量結果如??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%。

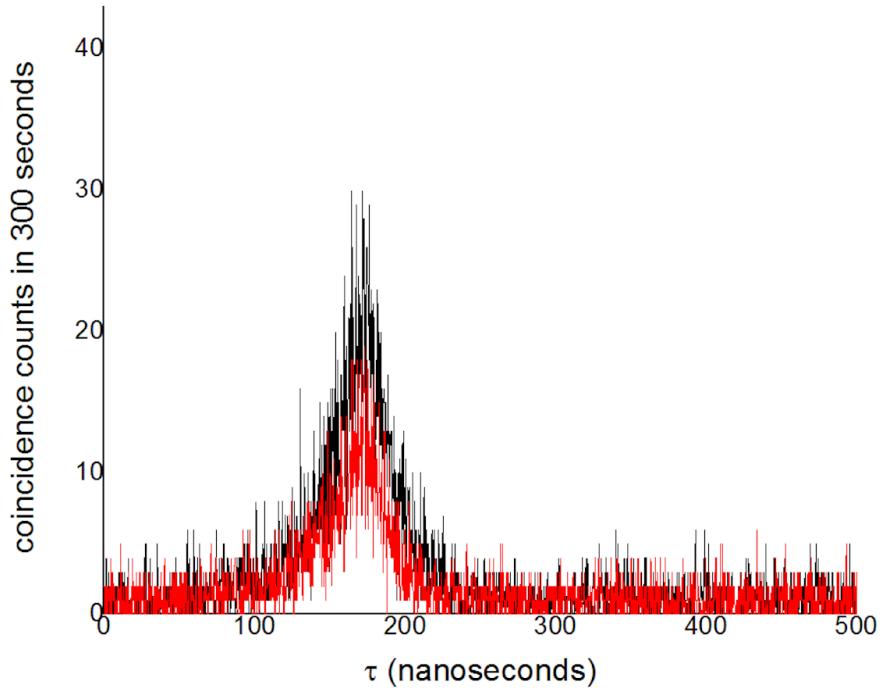


圖 1.26: 在兩台 EOM 同時開啟時測量 $G^2(\tau)$ ，黑線為沒經過 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測；紅線為透射 ^{87}Rb 原子氣體管之訊號，兩者總光子數的比值為 54.3%。

1.8 雷射光頻譜壓縮

同樣的，我們將上一小節的架設中的光源換成雷射光，單光子探測器改為光二極體，如??，且進行同樣的測量，結果如??，與單光子的量測結果相近，經展頻後再壓縮的光，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，被重新將頻寬還原至 60 MHz 內。

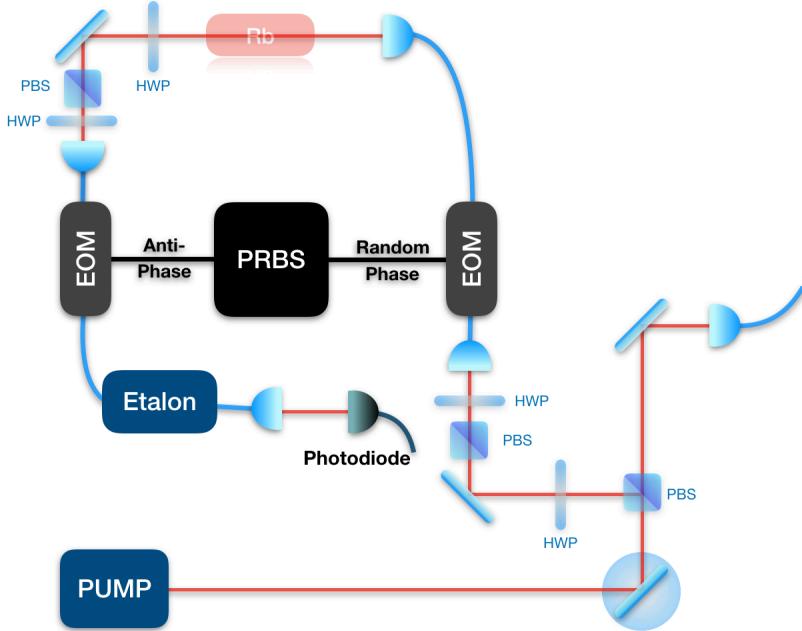


圖 1.27: 加上濾波器之雷射光量測光路圖

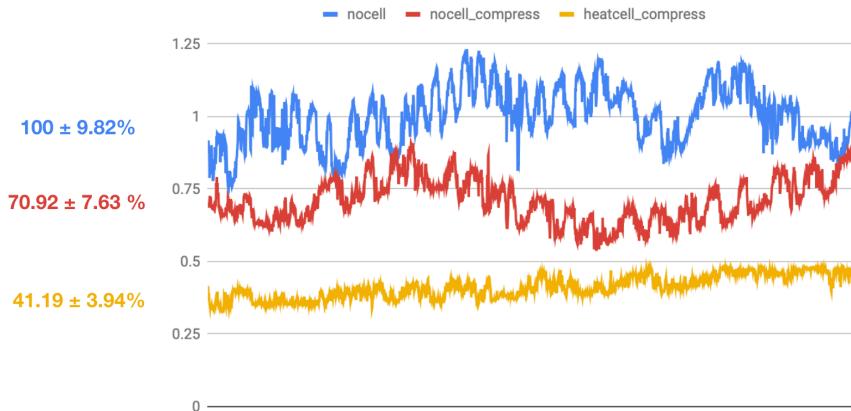


圖 1.28: 原子吸收對雷射光壓縮品質比較圖

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??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为

隨機訊號的品質不佳所致，兩個訊號從 PRBS 輸出時的波形如??，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??，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，也有可能是因為兩台 EOM 對高頻訊號的響應不同，也會影響調製的結果。

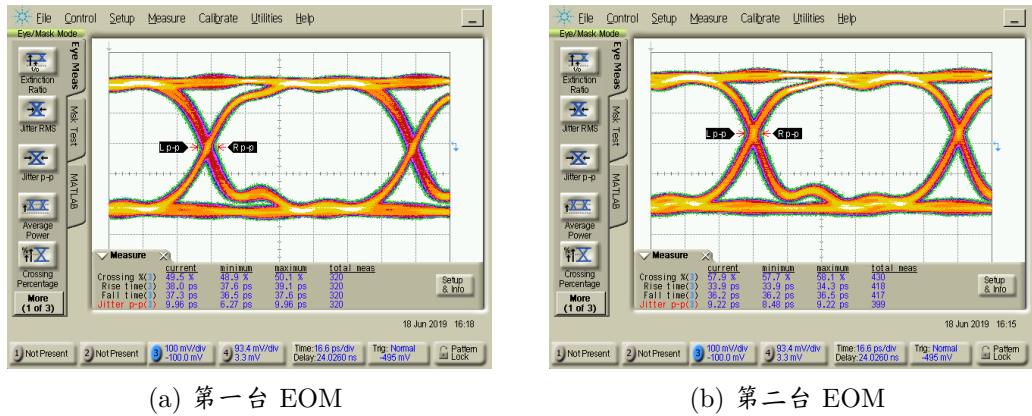


圖 1.29: PRBS 輸出之訊號眼圖（放大前）

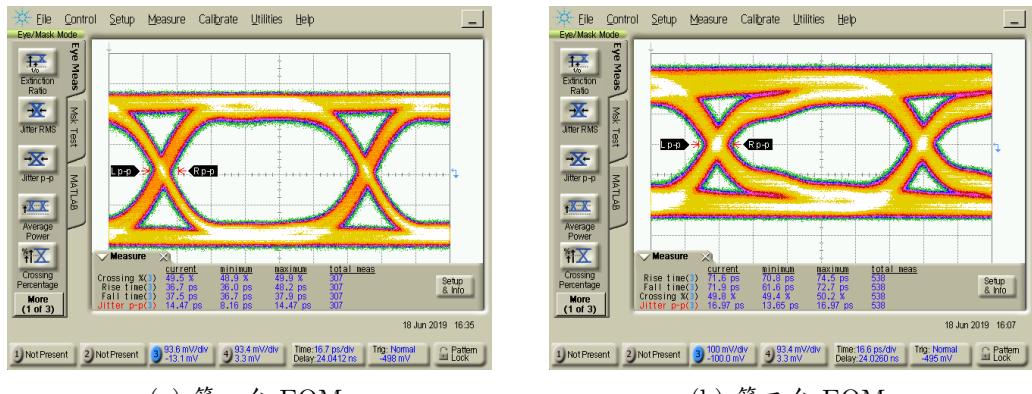


圖 1.30: PRBS 輸出之訊號眼圖（放大後）

為了確認上述的因素所造成的影響，根據??的測量結果，修正模擬時使用的隨機訊號，修正的參數如??，模擬的電訊號如??。使用修正後的隨機訊號進行展頻、吸收與壓縮的模擬，可讓計算的結果更貼近實驗的測量，以下將整理理論與實驗的結果整理成??與??，從表中可觀察到，經過修正後的理論模擬更接近實驗的結果，由此可知，想要有效地使用展頻技術，電訊號的品

一、實驗架設與結果討論

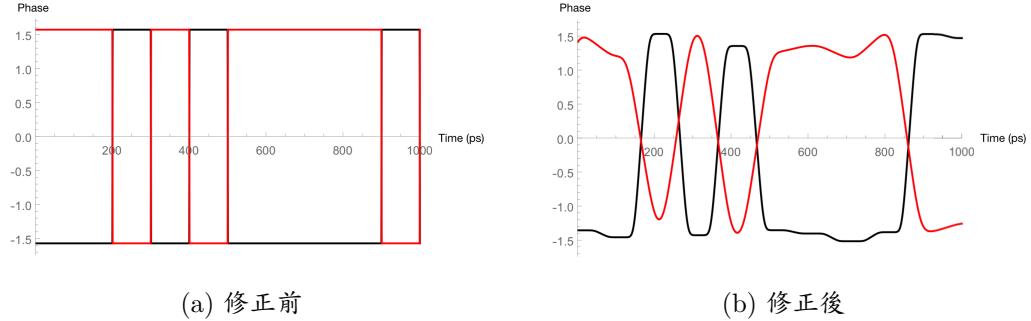


圖 1.31: 理論模擬使用的隨機訊號，黑線與紅線分別為輸入第一台和第二台 EOM 之電訊號。

質起了關鍵的作用，需要有更好的訊號產生器與線材才可以將調製的訊號還原成原始的模樣。

表 1.1: 數值模擬參數修正

| | jitter | amplitidu | 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 原子氣體管之透射率（無 Etalon 濾波器）

| 無 Etalon | 理論 | | 實驗 | |
|----------|-------|-------|--------|--------|
| | 修正前 | 修正後 | 雷射光 | 單光子 |
| 穿透率 | 79.1% | 73.8% | 77.38% | 68.48% |

表 1.3: 展頻後壓縮的光經過 Etalon 濾波器之透射率

| 有 Etalon | 理論 | | 實驗 | |
|----------|--------|-------|-------|-------|
| | 修正前 | 修正後 | 雷射光 | 單光子 |
| 無通過氣體管 | 100.0% | 88.9% | 77.9% | 70.9% |
| 有通過氣體管 | 67.6% | 45.6% | 42.3% | 41.0% |