

# 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  $^{87}\text{Rb}$  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)， $\tau$  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  $39.91^\circ\text{C}$  至  $40.10^\circ\text{C}$  有四組符合條件的模態，若讓其中一顆光子經過  $^{87}\text{Rb}$  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  $^{87}\text{Rb}$  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  $^{87}\text{Rb}$  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  $^{87}\text{Rb}$  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。

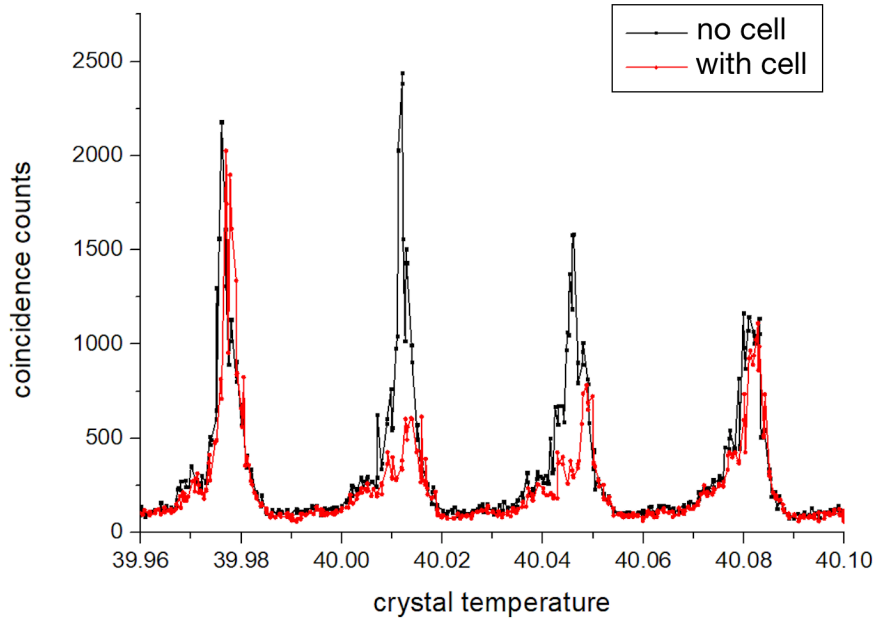


圖 1.2: 調整溫度測量雙光子產生率，黑線為直接對雙光子進行量測；紅線為先讓其中一顆單光子通過  $^{87}\text{Rb}$  氣體管再測量，其中第二和第三個模態有部分吸收。

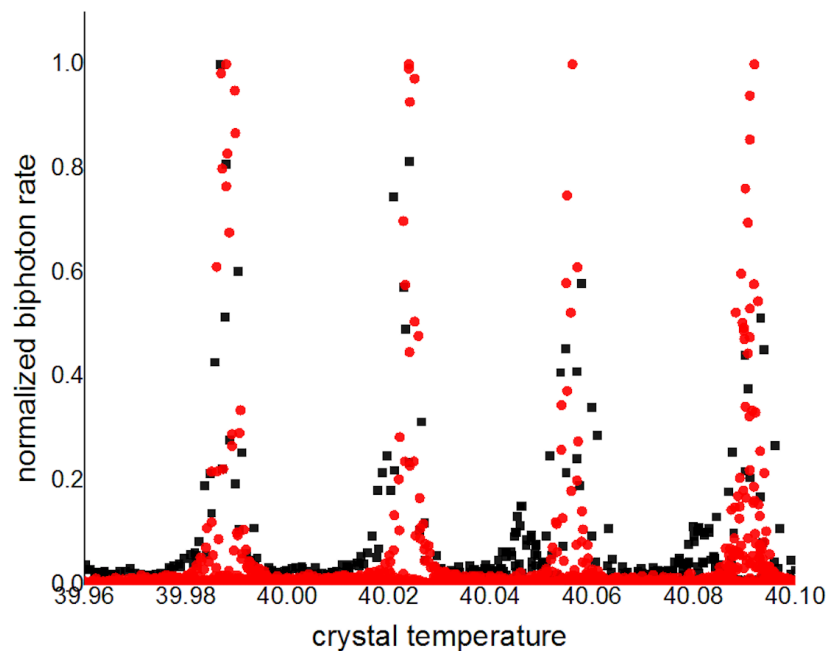


圖 1.3: 黑色為無濾波器時測量之訊號，在二與三個模態附近測量到一些明顯的訊號，表示我們的單光子非單模；紅線為經過濾波器測量到的訊號，此時就只允許特定頻率透射。

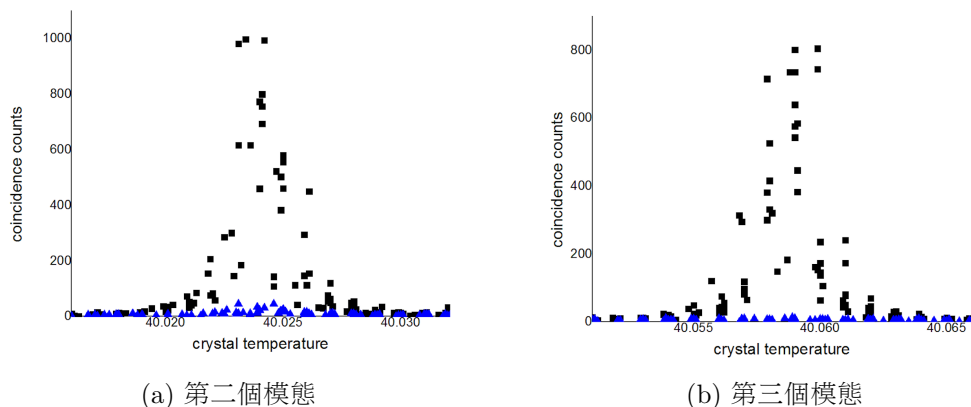


圖 1.4: 經過 Etalon 濾波後光子之吸收

## 1.2 雷射頻譜量測

實驗光路架設如圖，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 窄頻雷射的頻譜，結果如圖，以此 Fabry-Perot 的解析度掃出的雷射頻寬約為 30 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

# 待放圖片

圖 1.6: 窄頻雷射頻譜

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 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  $\pm 5$  GHz 寬，如下圖。

# 待放圖片

圖 1.7: 5 Gb/s 訊號之展頻頻譜

頻譜的形狀大致上與理論相符，但在  $\pm 2$  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：

## 待放圖片 待放圖片

(a) caption\_1

(b) caption\_2

此外，還可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，若把單位週期的位元數調為  $2^{15} - 1$  做可看到週期更小的震盪週期，如圖：

## 待放圖片 待放圖片

(a) caption\_1

(b) caption\_2

從測量的頻譜可以看出，展寬的頻率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  $\pm 10$  GHz 寬。

### 1.2.2 10 Gb/s 隨機訊號之相位調製

上一小節我們先以 2 Gb/s 的訊號做展頻的測試，是由於我們使用的 Fabry-Perot 干涉儀 FSR 不夠大，無法涵蓋以 10 Gb/s 訊號調製的展頻頻譜。至於壓縮頻譜的部分，能將頻寬還原成約 10 MHz，所以可使用 10 Gb/s 的訊號進行調製與量測。

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 70%，若只計算中心頻率附近 1 GHz 的頻率區間，與調製前的頻譜相比光強僅約 80%，剩下 20% 的能量還分散

在其他頻率沒被還原。造成頻譜壓縮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??），上下也不夠對稱，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。

# 待放圖片

圖 1.10: 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜

## 1.3 $^{87}\text{Rb}$ 原子吸收譜

為了確定相位調製對於鉀原子吸收的影響，我們在兩台 EOM 的後面放上一個  $^{87}\text{Rb}$  原子氣體管，並以光二極體 (photodiode) 收光，測量透射的強度。只有在入射頻率與鉀原子躍遷能階共振時光子才會被吸收，使透射率降低，所以若連續調整入射光的頻率，則能掃出整個吸收譜，如圖 1.11 黑線。

接著打開第一台 EOM，將頻寬從 30 MHz 展至 10 GHz，結果如圖 1.11 紫線，可見頻譜展寬之後，光能大部分透射鉀原子氣體不被吸收，就像隱形了一樣，能降低光子受環境的影響。若同時開啟兩台 EOM 將頻譜壓縮，則能再次看到光被吸收，如圖 1.11 紅線，但吸收率卻明顯降低，原因如上一小節所述，可能為隨機訊號品質不所致，影響頻譜壓縮的效果，有部分的能量還分散在各個頻率上沒能被還原，那些能量不在鉀原子的共振頻率上，所以能夠穿透氣體管，使穿透率上升。

重畫圖，把藍線去掉

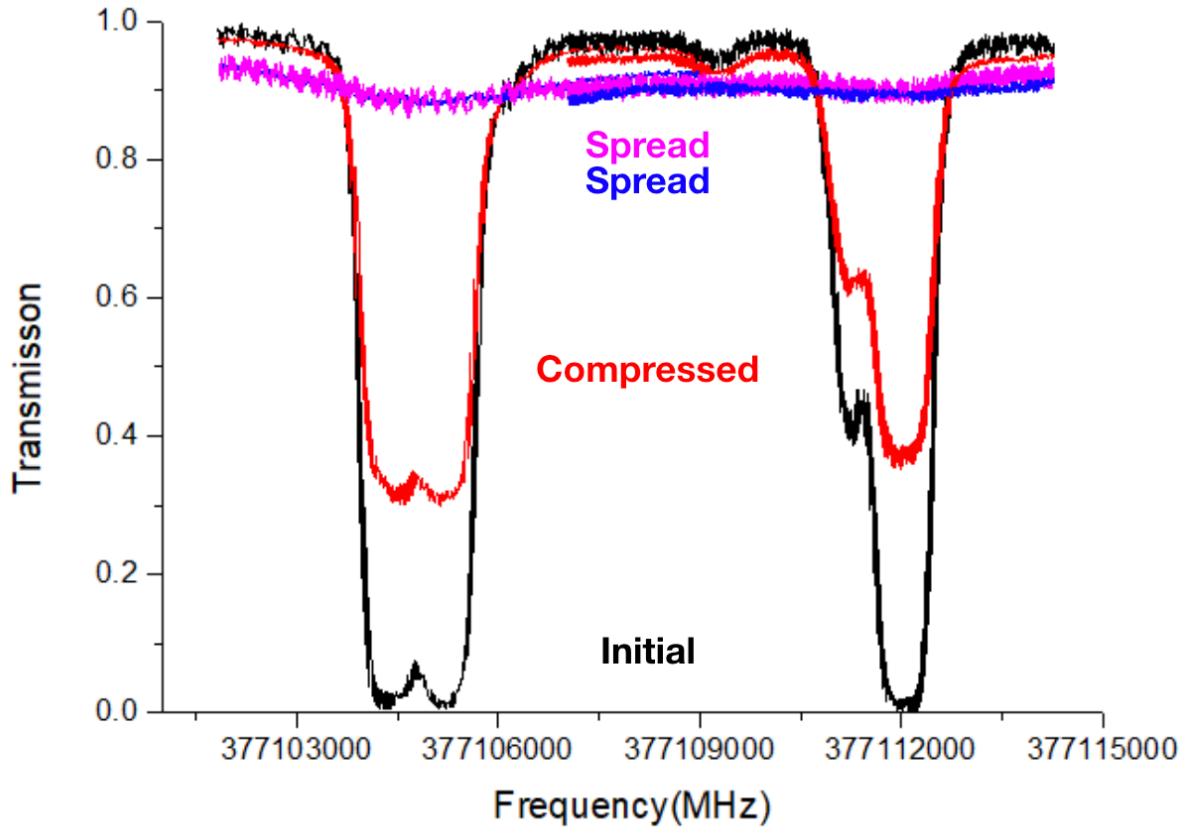


圖 1.11: 調製後的鉀原子吸收譜

## 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， $^{87}\text{Rb}$  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 112 GHz，使其能被原子吸收，再以圖 1.12 的光路架設，對光子進行相位調製與測量。

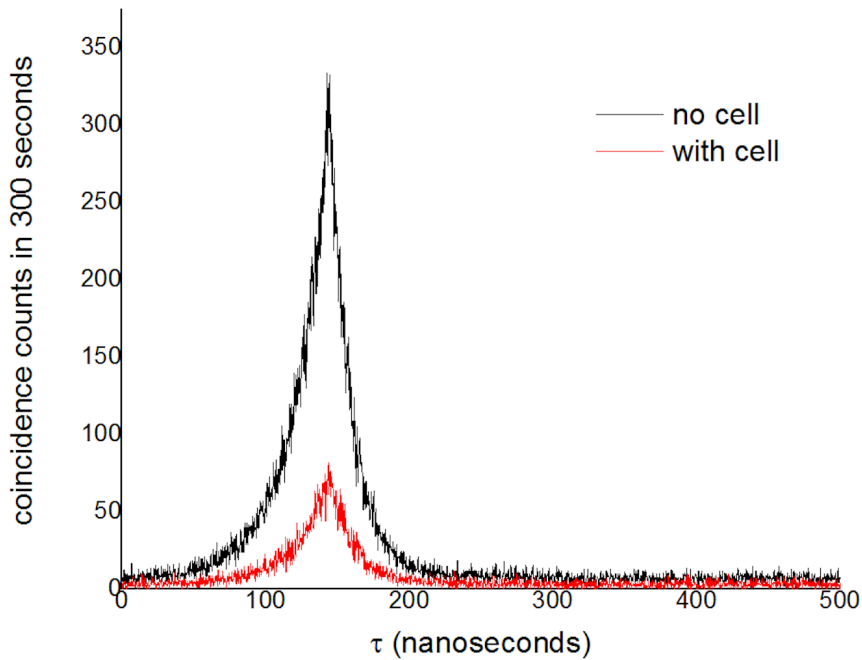
當兩台 EOM 皆關閉時，頻寬約為 4.5 MHz 的單光子會幾乎完全被原子吸收，光無法透射氣體管，但若對其進行  $G^2(\tau)$  測量，卻會測到訊號，如圖 1.13，原因如 1.1.2 所述，是由於我們晶體產生的單光子源非單模 (single-mode)，其中還存在符合別組準相位匹配條件 (quasi phase matching condition) 所產生的光，若要去除那些光子對實驗的影響，在此小節的數據處理上，我們直接將其當作雜訊扣除；下一小節的實驗中，



# 待放圖片

圖 1.12: 單光子量測光路圖

我們會外加一個 Etalon 濾波器，只讓 112 GHz 附近的光通過。

圖 1.13: 單光子通過  $^{87}\text{Rb}$  氣體管之  $G^2(\tau)$  量測

若開啟第一台 EOM，使用 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  $^{87}\text{Rb}$  氣體不被吸收，扣除雜訊後的  $G^2(\tau)$  的測量如圖 1.14，透射率為 76%。另外，此時若將  $^{87}\text{Rb}$  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，印證了本章第一小節的結論——相位調製不影響光強。

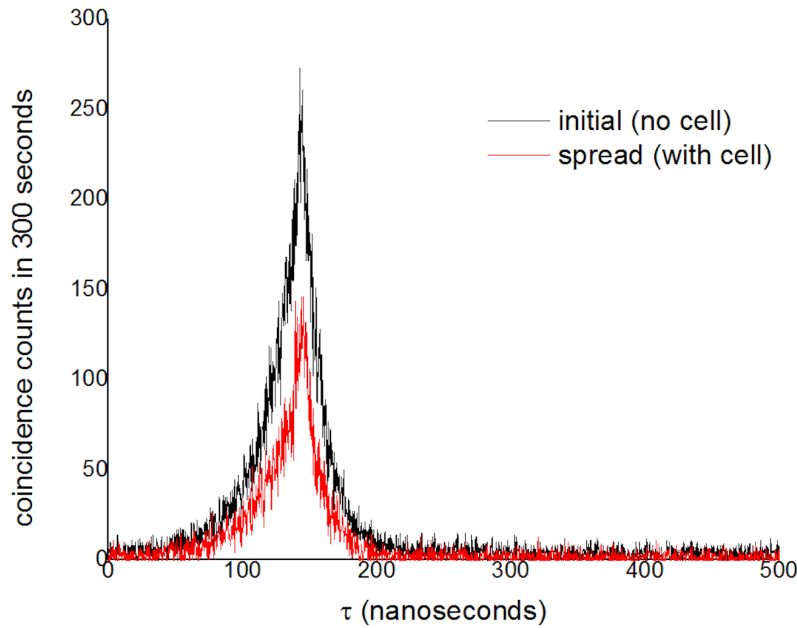


圖 1.14: 展頻後單光子被部分吸收後  $G^2(\tau)$  量測

從前述的結果可知，未經調製的窄頻單光子會幾乎被  $^{87}\text{Rb}$  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。

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，為驗證此模擬，我們分別使用 2, 4, 6, 8, 10 Gb/s 的隨機訊號去展頻，並經過原子團測量穿透率，實驗結果如圖 1.15，從結果可看出，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。而我們實驗上選用 10 Gb/s 的訊號進行量測為訊號產生器和線材的限制。

# 待放圖片

圖 1.15: 展頻後單光子被部分吸收後之  $G^2(\tau)$  量測

## 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保持一致性，我們將圖 1.12 光路架設的光源改成雷射光，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同樣的量測，實驗結果如圖 1.16，與單光子的量測結果相近，調製前的光通過氣體管後會幾乎全部被吸收，但經過展頻的雷射光能有約 80% 的穿透率，也能達到隱形斗篷的效果。

# 待放圖片

圖 1.16: 雷射光相位調製對穿透率之影響

## 1.6 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，或者要讓光子與  $^{87}\text{Rb}$  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 1.12 的光路架設，將第二台 EOM 開啟，由於相位調製不影響光強，無從得知頻寬是否有被還原，因此要將光路架設改為圖 1.17，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 1.17: 加上濾波器之單光子量測光路圖

以圖 1.17 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 1.18a。若將第二台 EOM 也開啟，將已展頻的單光子頻譜壓縮，則能再次測到訊號，如圖 1.18b

為了知道原子團的吸收對於單光子頻譜的壓縮有何影響，我們在兩台 EOM 同時開啟時將氣體管移除，測量先展頻再壓縮的單光子經過 Etalon 的透射率，測量的結果比較如圖 1.19，有 25% 的單光子可以在被

待放圖片      待放圖片

(a) caption\_1

(b) caption\_2

部分吸收後，重新將頻譜壓縮回 60 MHz 內。

待放圖片

圖 1.19: 原子吸收對單光子壓縮品質比較圖

## 1.7 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，結果如圖圖 1.20，與單光子的量測結果相近，經展頻後在壓縮的光，僅 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

# 待放圖片

圖 1.20: 原子吸收對雷射光壓縮品質比較圖

## 1.8 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 1.21，兩者形狀不一致，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 1.22，兩者變得更不一致，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 1.22 的測量結果，修正模擬時使用的隨機訊號，修正的參數如表，若以此隨機訊號進行模擬，則能稍微貼近實驗結果，比較如表：

# 待放圖片

圖 1.21: PRBS 輸出之訊號

# 待放圖片

圖 1.22: 經放大器之隨機訊號