

# 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 奈米的藍光雷射進入 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 奈米。實驗上會讓雙光子對經過 PBS 分光，並做  $G^2(\tau)$  的測量， $G^2(\tau)$  的定義如下。

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

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。

若調整入射光的頻率與 PPKTP 晶體的溫度，則可改變單光子的頻率。

雙光子在產生出來後會先進 PBS 將訊號分為 signal 和 idler，以 idler 做為觸發訊號，讓 signal 經過 EOM 與銣原子氣體管，進行相位的

調製與吸收。

## 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 1.1: 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 奈米窄頻雷射的頻譜，結果如圖，以此 Fabry-Perot 的解析度掃出的雷射頻寬約為 30 MHz。

待放圖片

圖 1.2: 窄頻雷射頻譜

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 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 1.3: 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）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不同，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 1.6: 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 1.7 黑線。

接著打開第一台 EOM，將頻寬從 30 MHz 展至 10 GHz，結果如圖 1.7 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 1.7 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

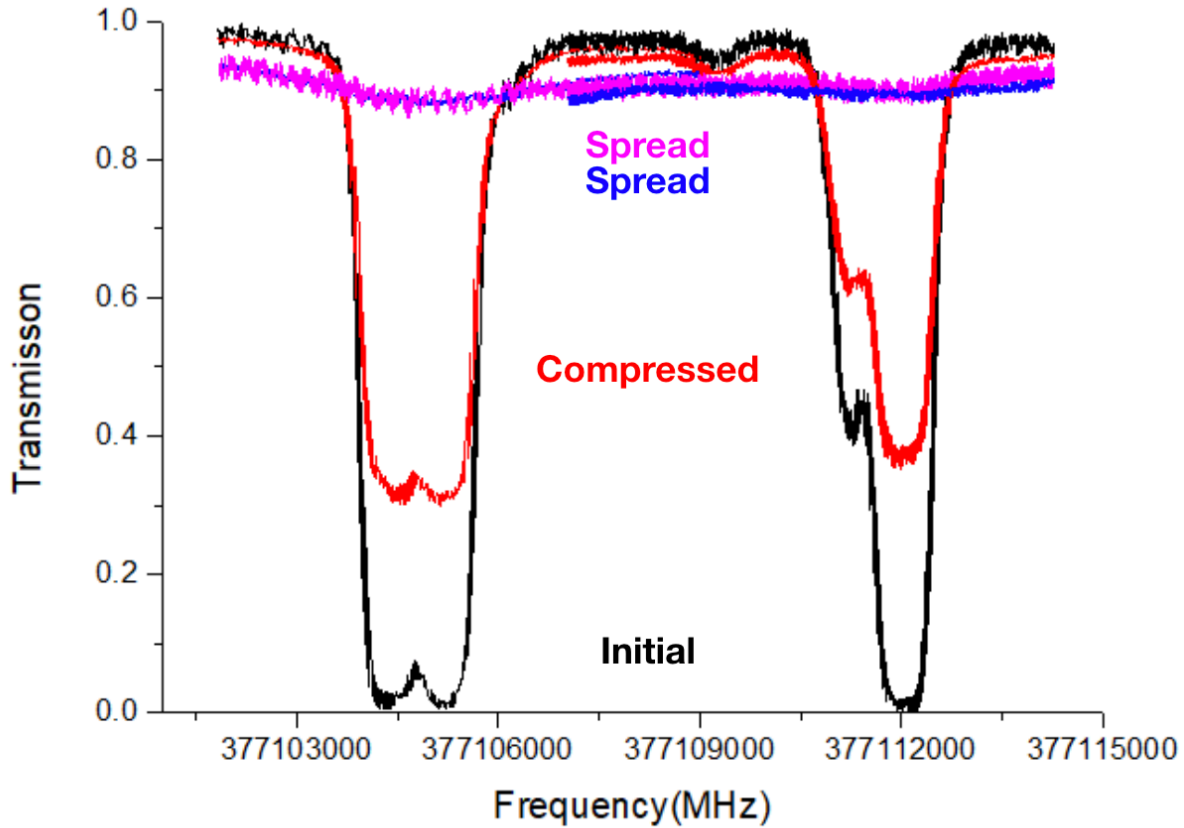


圖 1.7: 調製後的鉀原子吸收譜

## 1.4 單光子隱藏

從前一小節的實驗結果我們能得知， $^{87}\text{Rb}$  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 1.8 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，光應該無法通過氣體管，但若對其進行  $G^2(\tau)$  測量，卻會測到訊號，如圖 1.9，這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相位匹配條件 (phase-matching condition) 產生的光，若要去掉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，我們會外加一個

# 待放圖片

圖 1.8: 單光子量測光路圖

Etalon 濾波器，只讓 112 GHz 附近的光通過。

# 待放圖片

圖 1.9: 單光子通過  $^{87}\text{Rb}$  氣體管之  $G^2(\tau)$  量測

## 1.5 光子再現