### 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 (??)。

$$G^{2}(\tau) = \frac{4\Gamma_{s}\Gamma_{i}}{\Gamma_{s} + \Gamma_{i}} \begin{cases} e^{\Gamma_{s}\tau} &, \tau < 0 \\ e^{-\Gamma_{i}\tau} &, \tau > 0 \end{cases}$$

$$(1.1)$$

此為二階強度關聯函數 (second-order intenstity 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??,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 (biphton rate), 結果如??黑線, 在  $39.91^{\circ}C$  至  $40.10^{\circ}C$  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??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 <sup>87</sup>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??,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 <sup>87</sup> 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??,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??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。

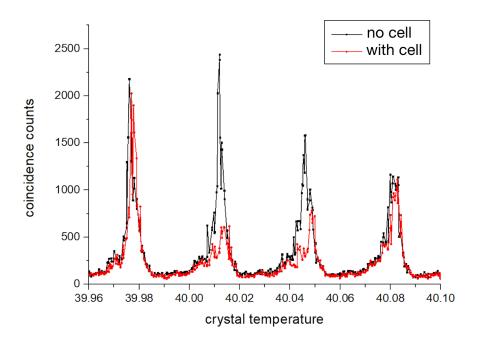


圖 1.2: 調整溫度測量雙光子產生率,黑線為直接對雙光子進行量測;紅線為先讓其中 一顆單光子通過 <sup>87</sup> Rb 氣體管再測量,其中第二和第三個模態有部分吸收。

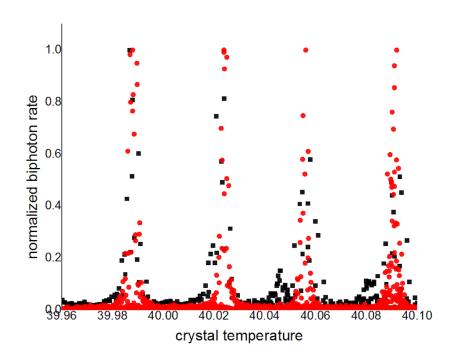


圖 1.3: 黑色為無濾波器時測量之訊號,在二與三個模態附近測量到一些明顯的訊號, 表示我們的單光子非單模;紅線為經過濾波器測量到的訊號,此時就只允許特 定頻率透射。

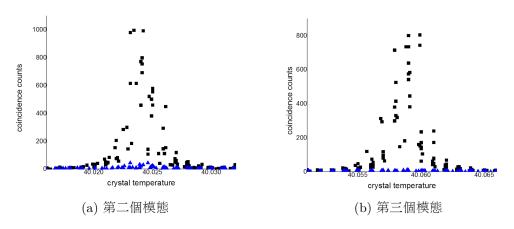


圖 1.4: 經過 Etalon 濾波後光子之吸收

#### 1.2 雷射頻譜量測

實驗光路架設如??,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Fabrty-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。

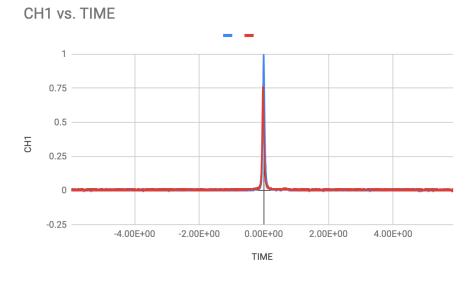


圖 1.6: 以頻寬 60MHz 的 Fabry-Perot 干涉儀掃出之雷射頻譜

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 ±5 GHz 寬,如下圖。

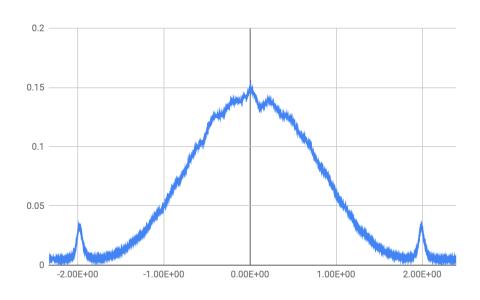
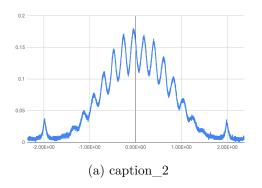
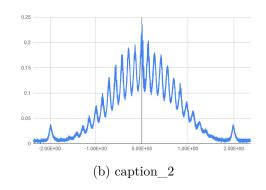


圖 1.7: 2 Gb/s 訊號之展頻頻譜

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:





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??。

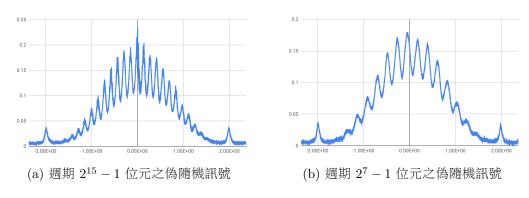


圖 1.9: 偽隨機訊號週期與展頻頻譜震盪之關係

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??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??),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。

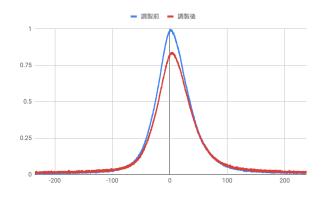


圖 1.10: 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜

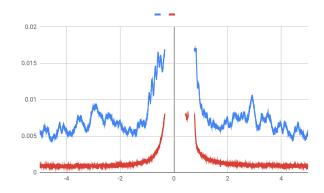


圖 1.11: 放大後之電訊號,紅線為未經調製的雷射頻譜,黑線為兩次調製後的訊號,雖能大致上將頻寬從 10 GHz 壓回 60 MHz,但從圖中可發現,中心以外的頻率仍能測到一些訊號。

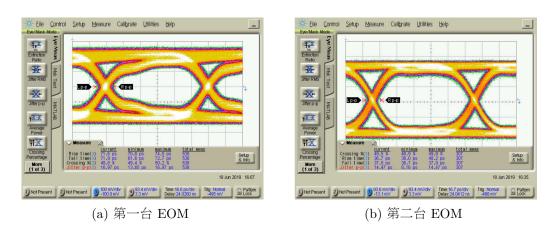


圖 1.12: 經過放大器, 進入 EOM 用以調製的兩組隨機訊號眼圖

#### 1.3 <sup>87</sup> Rb 經相位調製後的原子吸收譜

如?? 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??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 <sup>87</sup> *Rb* 原子氣體管的光強,從?? 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?? 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。

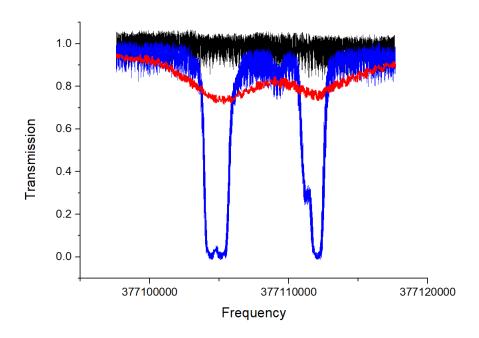


圖 1.13: 調製後的如原子吸收譜,黑線為沒放  $^{87}Rb$  原子氣體管時的訊號;藍線為調製 前  $^{87}Rb$  原子氣體管的吸收譜;紅線為展頻後的吸收譜。

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,<sup>87</sup>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??的光路架設,對光子進行相位調製與測量。

## 待放圖片

圖 1.14: 單光子量測光路圖

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??,原因如 ?? 節所述,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。

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??,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??,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。

從前述的結果可知,未經調製的窄頻單光子會幾乎被 <sup>87</sup>*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。

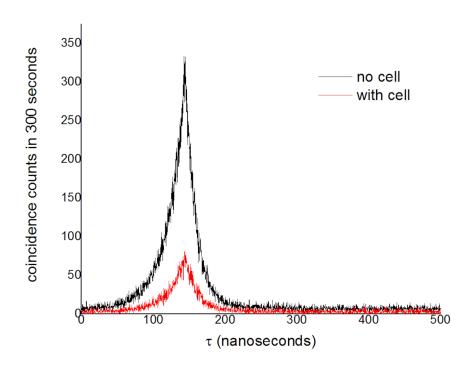


圖 1.15: 單光子通過  $^{87}Rb$  氣體管之  $G^{2}(\tau)$  量測,黑線為沒放氣體管時測到的訊號,放了氣體管後,其他模態的光因不在吸收頻率附近而能透射原子團不吸收,所以會測到紅線的訊號。

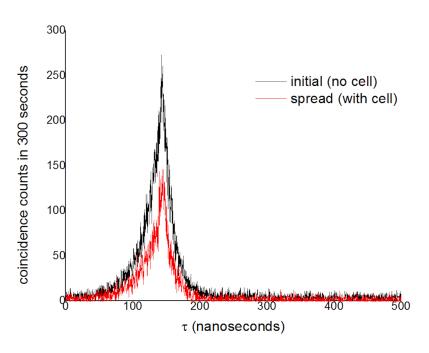
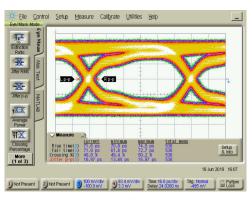
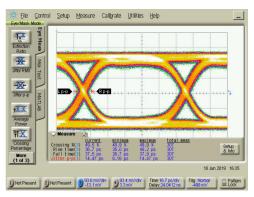


圖 1.16: 黑線為沒被放氣體管也沒調製時的  $G^2(\tau)$  量測,紅線為展頻光子被部分吸收後之訊號,可以以兩者 concidence counts(也就是圖下面積)的比值來計算透射率,約為 76%





(a) 調製前

(b) 調製後

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

#### 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??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。

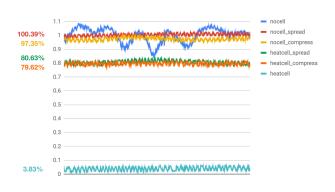


圖 1.18: 雷射光相位調製對穿透率之影響,最上面三條線(藍、紅與黃色)為沒放 <sup>87</sup>RB 原子氣體管時之量測,無論是展頻還是壓縮,相位調製皆不會影響光強; 中間兩條線(綠色與橘色)為展頻後通過氣體管所測得的訊號,與最下面那條 線相比,有約 80% 的光能因相位調製而穿透原子團而不被吸收。

#### 1.6 不同展頻頻寬對吸收率之影響

由??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??,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。

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。

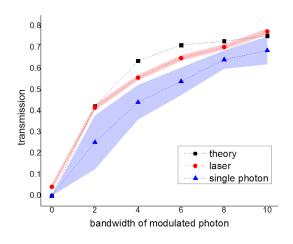


圖 1.19: 黑色為理論計算;紅線為古典光量測結果;藍線為單光子量測結果,數據點的 值為數次測量的平均,帶狀的寬度為測量的標準差。單光子的標準差較大是實 驗穩定度不佳造成的。

#### 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,或者要讓光子與 <sup>87</sup> 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,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??,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,因而測不到明顯的訊號,結果如??。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??

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

### 待放圖片

圖 1.20: 加上濾波器之單光子量測光路圖

### 待放圖片 待放圖片

(a) caption 1

(b) caption 2

Etalon 的透射率,測量的結果比較如??,有 25% 的單光子可以在被部分 吸收後,重新將頻譜壓縮回 60 MHz 內。

## 待放圖片

圖 1.22: 原子吸收對單光子壓縮品質比較圖

#### 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??,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 1.23: 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??,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。

## 待放圖片

圖 1.24: PRBS 輸出之訊號

## 待放圖片

圖 1.25: 經放大器之隨機訊號

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: