

國 立 清 華 大 學

碩士論文

單光子展頻

Spread Single Photon Spectrum

系 所：物理研究所

學 號：105022555

研 究 生：陳奕丞 (Chen, Yi-Cheng)

指導教授：褚志崧 教授 (Prof. Chuu, Chih-Sung)

中 華 民 國 一〇八 年 七 月

Todo list

| | |
|----------------------------------|----|
| ■ 補上型號，確定共振腔的物質，與偏振的關係 | 13 |
| ■ 重畫，調整座標軸 | 22 |
| ■ 補上另一條紅色的線 | 29 |

單光子展頻

摘要

我們運用對單光子波包的操控，讓單光子免於被躍遷頻率同其頻率的原子吸收或「偵測」，達到隱形斗篷的效果。

關鍵字：關鍵字, 論文, 樣板, 讓我畢業

Spread Single Photon Spectrum

Abstract

Write your English abstract here.

Keywords: Keyword, Thesis, Template, Graduate me

誌謝

謝謝天謝謝地

目錄

| | 頁次 |
|----------------------------------|-----|
| 摘要 | iii |
| Abstract | iv |
| 誌謝 | v |
| 目錄 | vi |
| | |
| 一、 實驗背景與動機 | 1 |
| 1.1 古典通訊展頻 | 1 |
| 1.2 量子通訊展頻 | 1 |
| | |
| 二、 基本原理介紹 | 2 |
| 2.1 展頻技術 | 2 |
| 2.2 相位調製 | 2 |
| 2.2.1 數學形式 | 2 |
| 2.2.2 單頻波 | 3 |
| | |
| 三、 理論模擬 | 5 |
| 3.1 展頻及壓縮 | 5 |
| 3.2 ^{87}Rb 原子氣體吸收..... | 7 |
| 3.2.1 展頻對吸收率的影響 | 7 |
| 3.2.2 吸收對頻譜還原的影響 | 8 |

| | | |
|-------|------------------------------------|----|
| 四、 | 實驗儀器與優化流程 | 10 |
| 4.1 | 隨機訊號產生器 | 10 |
| 4.2 | 電光調製器 | 11 |
| 4.3 | 高頻電訊號放大器 | 12 |
| 4.4 | 法布立－培若干涉儀 | 12 |
| 4.5 | Etalon 干涉儀..... | 13 |
| 五、 | 實驗架設與結果討論 | 14 |
| 5.1 | 光源製備 | 14 |
| 5.1.1 | 雷射光 | 14 |
| 5.1.2 | 單光子 | 14 |
| 5.2 | 雷射頻譜量測 | 17 |
| 5.2.1 | 2 Gb/s 隨機訊號之相位調製 | 19 |
| 5.2.2 | 10 Gb/s 隨機訊號之相位調製..... | 20 |
| 5.3 | ^{87}Rb 經相位調製後的原子吸收譜..... | 21 |
| 5.4 | 單光子相位調製對原子吸收之影響 | 22 |
| 5.5 | 雷射光相位調製對原子吸收之影響 | 25 |
| 5.6 | 不同展頻頻寬對吸收率之影響 | 25 |
| 5.7 | 單光子頻譜壓縮 | 26 |
| 5.8 | 雷射光頻譜壓縮 | 28 |
| 5.9 | 誤差分析與模擬修正 | 29 |
| 六、 | 總結 | 32 |

圖目錄

| | 頁次 |
|--|----|
| 2.1 窄頻雷射頻譜 | 4 |
| 3.1 隨機訊號 $PRBS(t)$ | 5 |
| 3.2 展寬後頻譜模擬圖 | 6 |
| 3.3 $\Delta t_p > \Delta t_{RF}$ 時壓縮頻譜 | 7 |
| 3.4 ^{87}Rb 原子吸收譜 | 8 |
| 3.5 不同隨機訊號的展頻對穿透率之影響 | 8 |
| 3.6 展頻後吸收對壓縮之影響 | 9 |
| 4.1 隨機訊號眼圖 | 10 |
| 4.2 偏振角度不對 | 11 |
| 4.3 放大後的隨機訊號眼圖 | 12 |
| 4.4 Fabry-Perot 干涉儀透射頻率 | 13 |
| 5.1 糾纏光子對之 $G^2(\tau)$ 量測 | 15 |
| 5.2 調整溫度測量雙光子產生率 | 16 |
| 5.3 調整溫度測量雙光子產生率 (加上濾波器) | 16 |
| 5.4 經過 Etalon 濾波後光子之吸收 | 17 |
| 5.5 雷射頻譜量測光路圖 | 17 |
| 5.6 雷射頻譜 | 18 |
| 5.7 2 Gb/s 訊號之展頻頻譜 | 19 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.9 | 偽隨機訊號週期與展頻頻譜震盪之關係 | 20 |
| 5.10 | 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜 | 20 |
| 5.11 | 初始頻譜與壓縮頻譜放大比較圖 | 21 |
| 5.12 | 經過放大器，進入 EOM 用以調製的兩組隨機訊號眼圖 . . | 21 |
| 5.13 | 調製後的鉀原子吸收譜 | 22 |
| 5.14 | 單光子量測光路圖 | 23 |
| 5.15 | 單光子通過 ^{87}Rb 氣體管之 $G^2(\tau)$ 量測 | 23 |
| 5.16 | 展頻單光子被部分吸收後 $G^2(\tau)$ 量測 | 24 |
| 5.17 | 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 | 24 |
| 5.18 | 雷射光相位調製對穿透率之影響 | 25 |
| 5.19 | 改變展頻頻率對吸收率之影響 | 26 |
| 5.20 | 加上濾波器之單光子量測光路圖 | 27 |
| 5.21 | 加上 Etalon 濾波器之單光子 $G^2(\tau)$ 量測 | 28 |
| 5.22 | 原子吸收對單光子壓縮比較圖 | 28 |
| 5.23 | 原子吸收對雷射光壓縮品質比較圖 | 29 |
| 5.24 | PRBS 輸出之訊號眼圖（放大前） | 30 |
| 5.25 | PRBS 輸出之訊號眼圖（放大後） | 30 |

一、實驗背景與動機

1.1 古典通訊展頻

展頻技術 (Spread Spectrum Technology) 在古典通訊上已行之有年，

1.2 量子通訊展頻

在量子通訊中，若以單光子作為攜帶資訊的媒介，展頻技術也可以降低環境對於單光子的影響，還能將展頻後的單光子藏匿於人工外加的雜訊之中，並在接收端將其還原成原始訊號的模樣。

二、 基本原理介紹

2.1 展頻技術

展頻技術 (spread spectrum technology) 是一種可將原訊號的頻譜打散分佈到比原始頻寬更寬的技術。在我們的實驗上，能窄頻雷射 (narrow-band laser) 與單光子的頻寬從約 10 MHz 展至 10 GHz，其作法為，以 PRBS 產生高頻隨機訊號，使用光電調製器 (EOM) 對入射光進行相位調製，此在時域上的操作，經傅立葉轉換後等效於增加其他頻率成分，以達到展寬頻率的效果。

2.2 相位調製

2.2.1 數學形式

此小節介紹相位調製的數學形式。設入射 EOM 的雷射波函數為 $E_0(t)$ ，調製函數 (modulation function) 為 $M(t)$ ，經調製後的波函數 $E_m(t)$ 可表示成：

$$E_m(t) = E_0(t)e^{iM(t)} \quad (2.1)$$

若對此式做傅立葉轉換，根據 convolution theorem，可得：

$$\mathcal{F}\{E_0(t)e^{iM(t)}\} = \tilde{E}_0(\omega) * \mathcal{F}\{e^{iM(t)}\} \quad (2.2)$$

$\tilde{E}_0(\omega)$ 為入射光之頻譜，所以在頻譜數學分析上，我們可以把入射光頻譜與相位調製的部分分開處理，個別將兩項計算好後再做摺積即可得到調製後的頻譜。

2.2.2 單頻波

若入射光的頻譜為中心頻率在 ν_0 的勞倫茲分佈 (lorenz distribution)，調製函數為頻率 ν_m 的單頻波，意即輸入的電訊號強度隨時間的函數可表示為 $\phi_0 \sin(2\pi\nu_m \omega t)$ ，則可將 (2.2) 改寫為：

$$\mathcal{F}\{E_0(t)e^{i\phi_0 \sin(2\pi\nu_m \omega t)}\} = \tilde{E}_0(\omega) * \mathcal{F}\{e^{i\phi_0 \sin(2\pi\nu_m \omega t)}\} \quad (2.3)$$

其中 $\tilde{E}_0(\omega)$ 為勞倫茲分佈，另一項傅立葉轉換的結果為第一類貝索函數 (Bessel function of the first kind)：

$$\mathcal{F}\{e^{i\phi_0 \sin(2\pi\nu_m \omega t)}\} = J_n(\phi_0) \quad (2.4)$$

或在時域上看，將調製項做傅立葉級數展開：

$$e^{i\phi_0 \sin(2\pi\nu_m \omega t)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\phi_0) e^{i2\pi n \nu_m t} \quad (2.5)$$

可從上式看出，調製項的頻譜是由頻率為 $n\nu_m$ 的狄拉克函數 (Dirac function) 組成， $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ，強度分佈為 $J_n(\phi_0)$ 。

以 $\phi_0 = \pi$ 為例，從 (2.3) 可知，將入射光（圖）與調製項的頻譜做摺積可得調製後的結果，如圖：

兩者比較可明顯看出，時域上相位調製能讓改變頻率的分佈。

待放圖片

圖 2.1: 窄頻雷射頻譜

三、理論模擬

3.1 展頻及壓縮

從上一章單頻波的例子可看出，相位調製可將原先頻率集中於 ν_0 的光，分散至 $\nu_0 \pm \nu_m, \nu_0 \pm 2\nu_m, \dots$ 。若調製函數改用時間寬度為 ΔT 的隨機方波 $PRBS(t)$ （如圖），則可將 (2.2) 的右式寫成：

$$\tilde{E}_0(\omega) * \mathcal{F}\{e^{iPRBS(t)}\} \quad (3.1)$$

經計算，展寬後的頻譜如圖：

待放圖片

圖 3.1: 隨機訊號 $PRBS(t)$

其包絡線接近 sinc 的平方，展開的寬度為 $\pm \frac{1}{\Delta T}$ ，在我們實驗中使用的隨機訊號的產生率為 10 Gb/s，單一位元的時間寬度為 100 ps，相當於能將頻譜從數 MHz 展至 10 GHz 寬。

經展頻後的訊號，在傳輸的過程中可以降低環境的影響，避免光子

待放圖片

圖 3.2: 展寬後頻譜模擬圖

被特定原子團吸收，但若想還原光子初始相位的資訊，則需要做一個反向的相位調製，讓光子再經過第二台 EOM，輸入的電訊號必須為與 $PRBS(t)$ 互補的 $\overline{PRBS}(t)$ ，這兩個訊號要滿足以下關係：

$$PRBS(t) + \overline{PRBS}(t) = 0 \quad (3.2)$$

或

$$e^{iPRBS(t)} \times e^{i\overline{PRBS}(t)} = 1 \quad (3.3)$$

若光子在兩台 EOM 行經的時間間距為 Δt_p ，兩個電訊號抵達的時間差為 Δt_{RF} ，當 $\Delta t_p = \Delta t_{RF}$ 時，理論上可以對相位進行反向的調製，將展頻後的訊號壓縮，還原成原本的頻率分布，但若 $\Delta t_p > \Delta t_{RF}$ ，則無法完全還原頻譜，比較如圖 3.3，所以在實驗架設上，必須要能精確的控制電路與光路的長度，讓兩個電訊號匹配，才能達到最好的還原效果。

待放圖片

圖 3.3: $\Delta t_p > \Delta t_{RF}$ 時壓縮頻譜

3.2 ^{87}Rb 原子氣體吸收

3.2.1 展頻對吸收率的影響

在光通訊中，以光作為資訊的載體，在空氣中傳輸的過程中光子會與原子產生交互作用，當光子的頻率接近原子的躍遷能階時有很大的機率會被吸收。以波長約為 795 nm 的窄頻雷射為例，將此道光打入溫度約 87 度的 ^{87}Rb 原子氣體管，調整入射光頻率測量穿透率即可掃出 ^{87}Rb 的吸收譜，結果如圖 3.4，從圖中可知，在頻率 105 GHz 與 112 GHz 的頻率位置分別約有 2 GHz 與 1 GHz 寬的吸收區域，其吸收的中心頻率是被原子的能階給決定，可從飽和吸收光譜 (saturated absorption spectroscopy) 得知；吸收的寬度則是與原子蒸氣壓和溫度有關，不同的原子運動速度分佈會有不一樣的寬度，此為效應都卜勒增寬 (Doppler broadening)。

為降低環境對光子的影響，我們可用上述之展頻技術，對光進行相位調製，將頻譜展寬，減少光對原子的吸收率。我們分別使用 1 Gb/s、5 Gb/s、10 Gb/s 與 20 Gb/s 的隨機訊號去模擬，在有展頻的狀態下，中心頻率與穿透率之關係，結果如圖 3.5，未經調製的光在 105 GHz 與 112 GHz 附近會被完全吸收，若將光的頻譜展寬則能顯著的降低吸收率，

待放圖片

圖 3.4: ^{87}Rb 原子吸收譜

隨機訊號的頻率越高，原子對光子的影響越小。

待放圖片

圖 3.5: 不同隨機訊號的展頻對穿透率之影響

3.2.2 吸收對頻譜還原的影響

如前所述，對已調製過的光進行反向的調製，理論上可將頻譜壓窄，完美還原成調製前的分佈。但若先將已展頻的光通入原子團使其被部分吸收，再進行反向的調製，則還原回來的頻譜會與原先有些微的差異，比較如圖 3.6。

待放圖片

圖 3.6: 展頻後吸收對壓縮之影響

四、實驗儀器與優化流程

4.1 隨機訊號產生器

由於實驗上無法產生真正的隨機訊號，只能使用偽隨機訊號產生器 (Pseudo Random Bit Sequence, PRBS)，儀器型號為 Anritsu 的 MP1763C，可以產生 0.5 至 12.5 Gb/s 的訊號。偽隨機訊號實際上為週期訊號，會重複出現特定的隨機序列，其週期可以調整，為了達到最接近隨機的效果，我們選擇使用最長的隨機序列，一個週期內共有 $2^{31} - 1$ 的隨機位元。

我們實驗上實際使用的頻率為 10 GHz（或 10 Gb/s），每秒能產生 10×10^9 個隨機位元，以示波器去測量該訊號的眼圖 (eye diagram) 則可以知道訊號的品質，量測結果如下：

待放圖片

圖 4.1: 隨機訊號眼圖

可見實際訊號與理論（圖）有蠻大的差異，有著相對大的上升與下

降時間，圖形上下也不太對稱，這都會影響到展頻與壓縮的效果，造成實驗與理論的誤差。

4.2 電光調製器

電光調製器 (Electro-Optic Modulator, EOM) 可使用電訊號對光進行調製，一般而言可以分成三種，分別為振幅、相位與偏振的調製，在我們的實驗中需要調製的是相位。使用的儀器為 EOSPACE 的 SN73717 與 SN73718，分別為頻譜的窄寬與壓縮用。

相位調制器由鈮酸鋰 ($LiNbO_3$) 雙折射晶體製成，因泡克耳斯效應 (Pockels effect)，外加電場能線性的改變快軸上的折射率，進而達到改變相位的效果，且我們稱能將 45 度線偏旋轉至 -45 度的電壓為 V_π 。

由上介紹可知，實際使用上需優化進光的偏振以及電訊號的振幅，以達到預期的相位調製效果。

我們使用半波片 (half-wave plate) 調整入射 EOM 偏振的方向，若偏振方向不對的話，調製效果會不佳，如圖，所以實驗上優化的方式為，看著調製後的頻譜，將偏振旋轉到最接近理論模擬時的角度。

待放圖片

圖 4.2: 偏振角度不對

4.3 高頻電訊號放大器

由於我們使用的隨機訊號產生器僅能輸出 0.2 至 $2V_{pp}$ 的訊號，EOM 的 V_{π} 為 2.3 V，需再經過放大器才能提供足夠的電壓去進行相位調製。同樣的，也用示波器去測量眼圖，看放大後的訊號品質，如圖 5.12

待放圖片

圖 4.3: 放大後的隨機訊號眼圖

由於兩台放大器連接 EOM 使用的 SMA 線的材質與長短不同，會有不一樣的頻率響應與耗損，使兩個訊號無法互補，這會對頻譜壓縮與還原的效果造成負面的影響。

4.4 法布立－培若干涉儀

古典光可以用法布立－培若 (Fabry-Perot) 干涉儀來掃出頻譜，我們使用的儀器為 THORLABS 的 (型號)，FSR 為 10 GHz。此干涉儀的主體為一個共振腔，由兩面高反射率的鏡子所組成。當光垂直入射腔體時，須滿足以下共振條件的光才能會有建設性干涉，能透射共振腔：

$$2nL = m\lambda \quad (4.1)$$

n 為共振腔的折射率， L 為腔長，頻率與透射率做圖，其中 ν_F 稱為 FSR (Free Spectrual Range)，此參數決定了這個干涉儀適用的掃頻範圍，調

整腔長 L 的大小能改變允許透射的頻率，所以若在其中一面鏡子黏上 Piezo，輸入電壓即可微調腔長，達到掃頻的效果。

待放圖片

圖 4.4: Fabry-Perot 干涉儀透射頻率

此外，另一個重要的參數為 F (Finesse)，為精細度，定義如下：

$$F = \frac{\pi R^{1/2}}{1 - R} \quad (4.2)$$

此共振腔的頻寬（解析度） $\delta\lambda$ 與 F 成反比，關係如下式，所以鏡面反射率越高， F 越大，解析度越好，此次實驗使用的干涉儀解析度約為 30 MHz。

$$\delta\lambda = \frac{\nu_F}{F} \quad (4.3)$$

4.5 Etalon 干涉儀

與 Fabry-Perot 干涉儀為相同的原理，只是共振腔使用的鏡子反射率較低，所以頻寬較大（約為 60 MHz），若固定腔長 L ，則可做為濾波器使用，僅讓頻率寬度在 60MHz 這區間內的光通過，中心頻率則 ν 可以由溫度 T 改變腔長 $L(T)$ 來調整。

補上型號，確定共振腔的物質，與偏振的關係

五、實驗架設與結果討論

5.1 光源製備

5.1.1 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

5.1.2 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 (5.1)。

$$G^2(\tau) = \frac{4\Gamma_s\Gamma_i}{\Gamma_s + \Gamma_i} \begin{cases} e^{\Gamma_s\tau} & , \tau < 0 \\ e^{-\Gamma_i\tau} & , \tau > 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

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 5.1，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 5.1: 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 5.2 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 5.2 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 5.3，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 5.4，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 5.2 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。

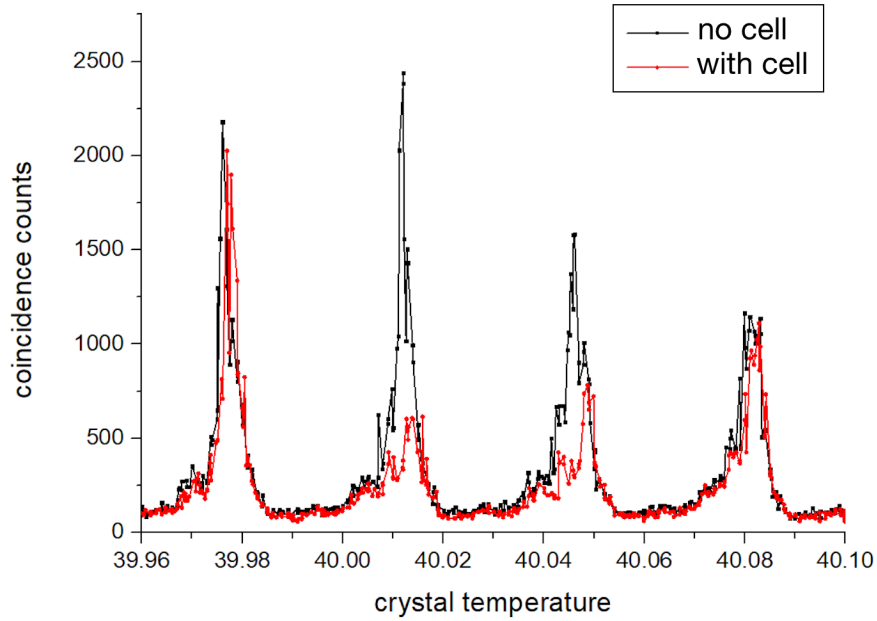


圖 5.2: 調整溫度測量雙光子產生率，黑線為直接對雙光子進行量測；紅線為先讓其中一顆單光子通過 ^{87}Rb 氣體管再測量，其中第二和第三個模態有部分吸收。

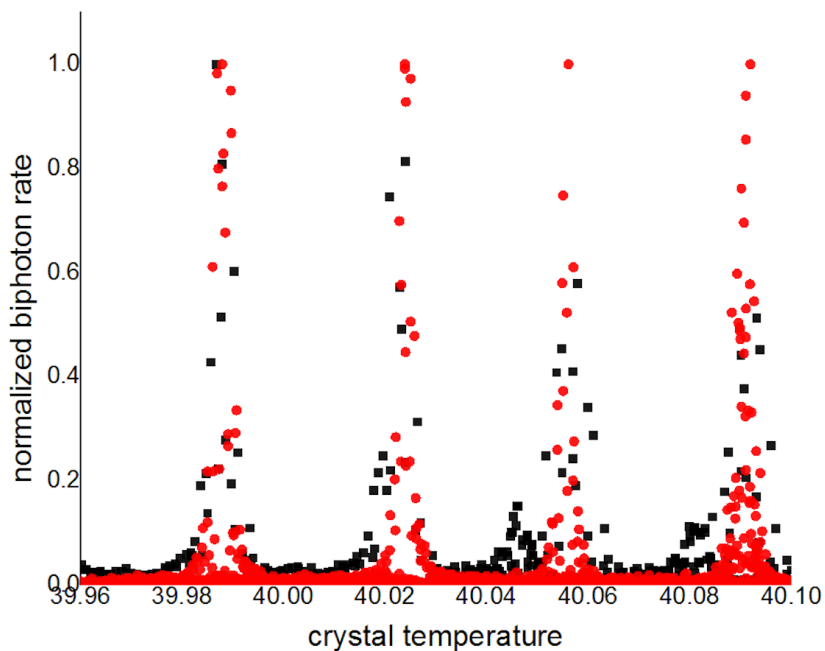


圖 5.3: 黑色為無濾波器時測量之訊號，在二與三個模態附近測量到一些明顯的訊號，表示我們的單光子非單模；紅線為經過濾波器測量到的訊號，此時就只允許特定頻率透射。

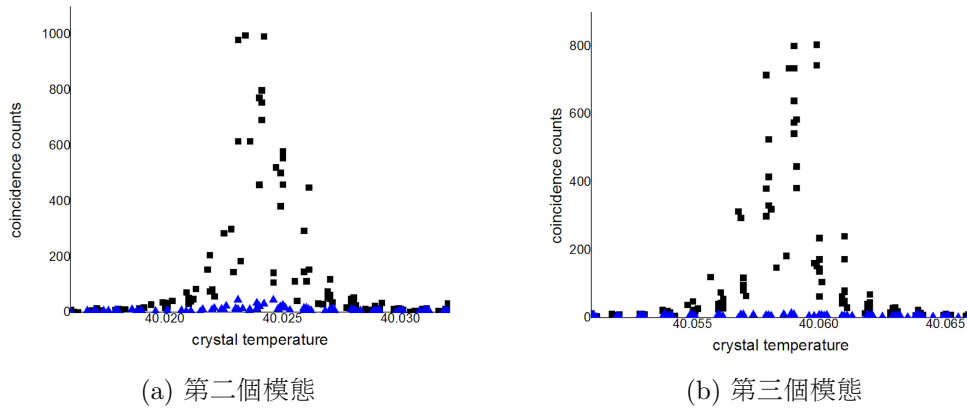


圖 5.4: 經過 Etalon 濾波後光子之吸收

5.2 雷射頻譜量測

實驗光路架設如圖 5.5，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 5.5: 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

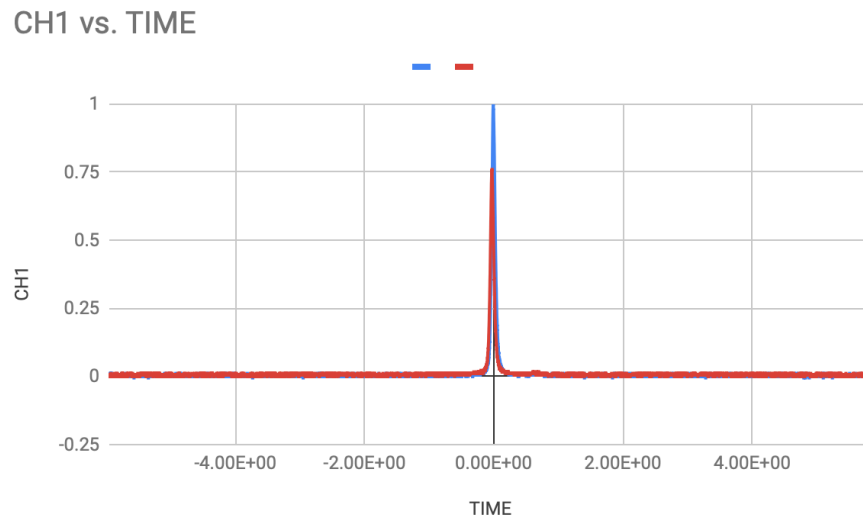


圖 5.6: 以頻寬 60MHz 的 Fabry-Perot 干涉儀掃出之雷射頻譜

的訊號來測試展頻的結果是否符合理論模擬。

5.2.1 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。

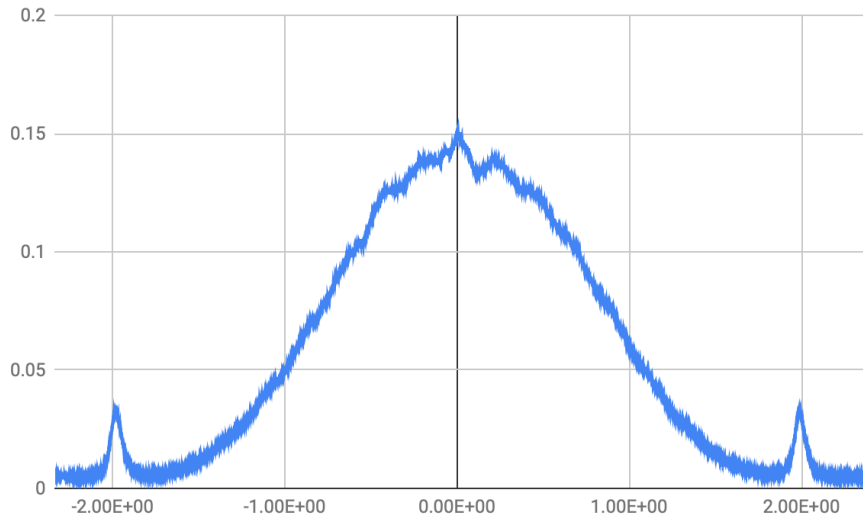
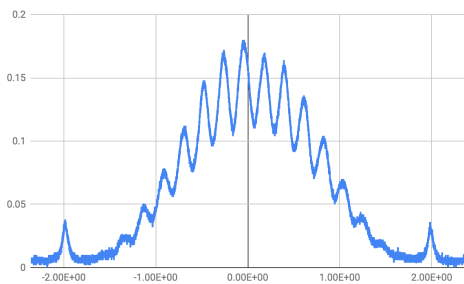
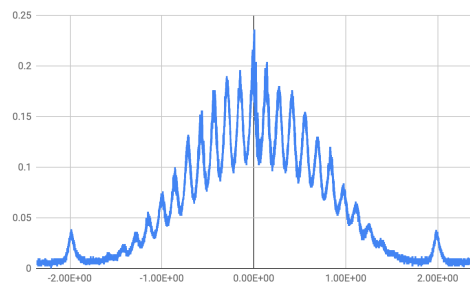


圖 5.7: 2 Gb/s 訊號之展頻頻譜

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 5.9。

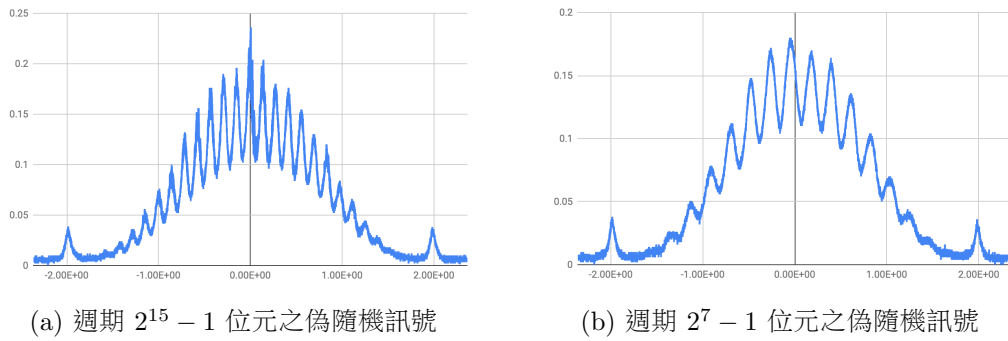


圖 5.9: 偽隨機訊號週期與展頻頻譜震盪之關係

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。

5.2.2 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 5.10 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 5.11）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 5.12），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。

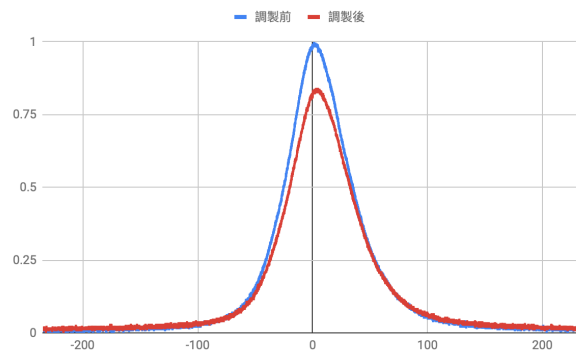


圖 5.10: 10 Gb/s 訊號壓縮後頻譜

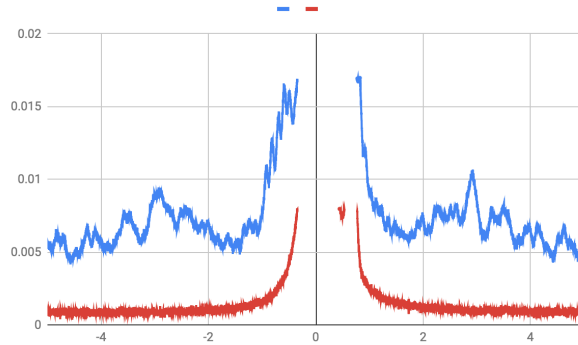


圖 5.11: 放大後之電訊號，紅線為未經調製的雷射頻譜，黑線為兩次調製後的訊號，雖能大致上將頻寬從 10 GHz 壓回 60 MHz，但從圖中可發現，中心以外的頻率仍能測到一些訊號。

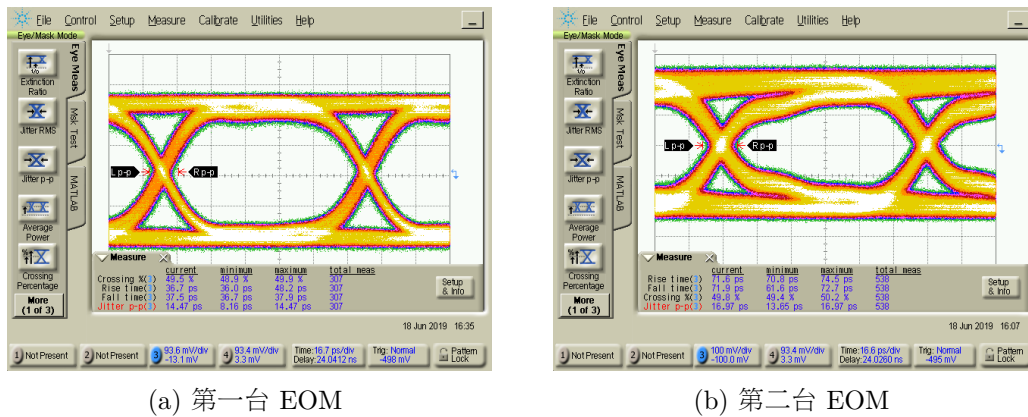


圖 5.12: 經過放大器，進入 EOM 用以調製的兩組隨機訊號眼圖

5.3 ^{87}Rb 經相位調製後的原子吸收譜

如章節 3.2.1 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 5.5 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 5.13 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 5.13 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。

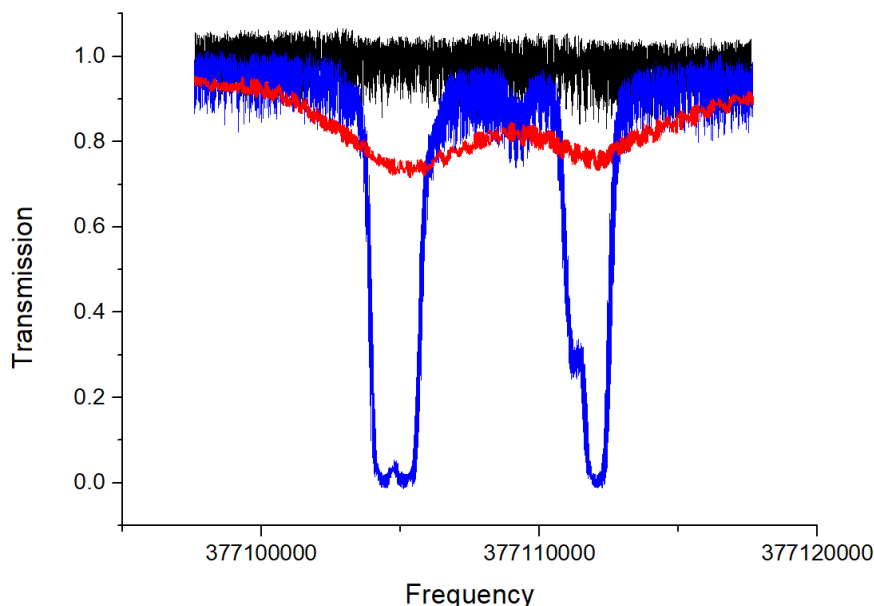


圖 5.13: 調製後的如原子吸收譜，黑線為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時的訊號；藍線為調製前 ^{87}Rb 原子氣體管的吸收譜；紅線為展頻後的吸收譜。

重畫，調整座標軸

5.4 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 5.14 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 5.15，原因如章節 5.1.2 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 5.14: 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。

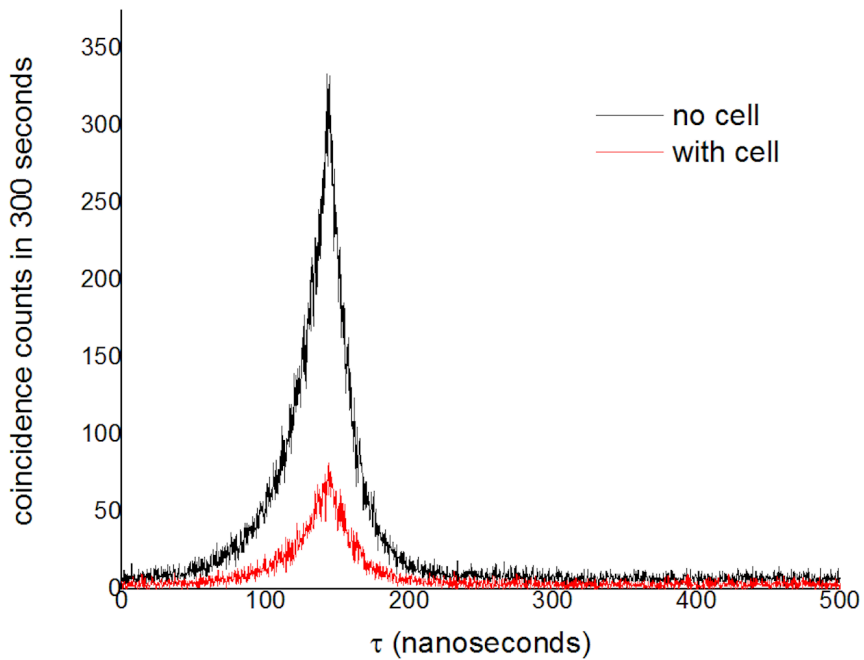


圖 5.15: 單光子通過 ^{87}Rb 氣體管之 $G^2(\tau)$ 量測，黑線為沒放氣體管時測到的訊號，放了氣體管後，其他模態的光因不在吸收頻率附近而能透射原子團不吸收，所以會測到紅線的訊號。

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 5.16，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 5.17，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。

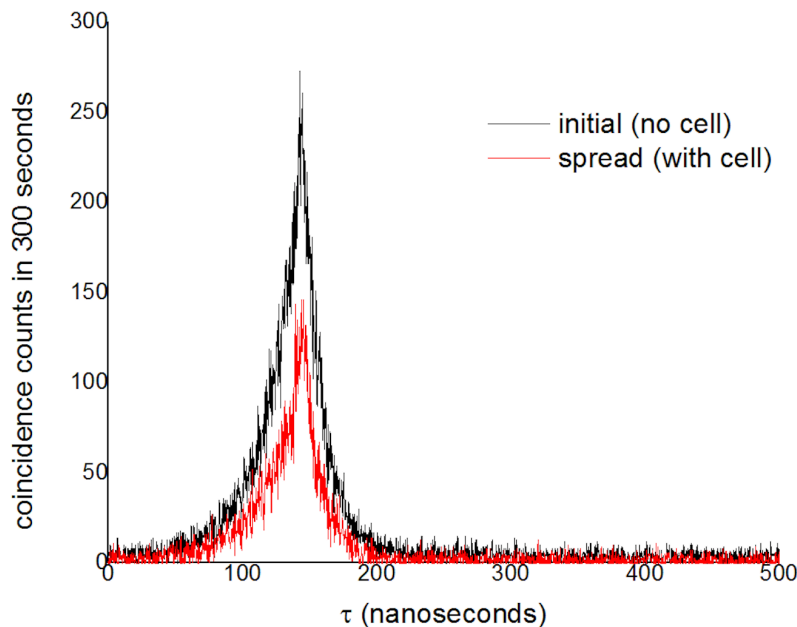


圖 5.16: 黑線為沒被放氣體管也沒調製時的 $G^2(\tau)$ 量測，紅線為展頻光子被部分吸收後之訊號，可以以兩者 coincidence counts（也就是圖下面積）的比值來計算透射率，約為 76%

待放圖片 待放圖片

(a) 調製前

(b) 調製後

圖 5.17: 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。

5.5 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 5.14 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 5.18，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。

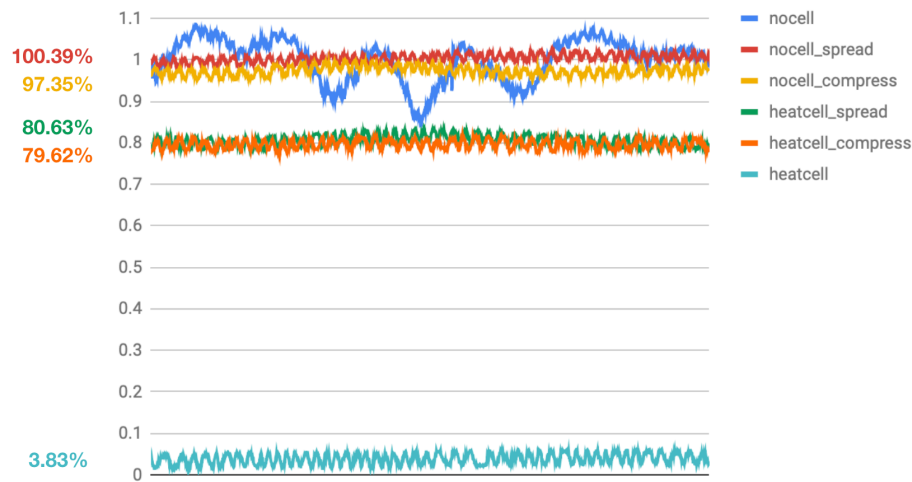


圖 5.18: 雷射光相位調製對穿透率之影響，最上面三條線（藍、紅與黃色）為沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測，無論是展頻還是壓縮，相位調製皆不會影響光強；中間兩條線（綠色與橘色）為展頻後通過氣體管所測得的訊號，約 80% 的光能因相位調製而穿透原子團而不被吸收；最下面的藍線為兩台 EOM 關閉時測到的訊號，未經調製的光會幾乎都被原子吸收。

5.6 不同展頻頻寬對吸收率之影響

由章節 3.2.1 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 5.19，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。

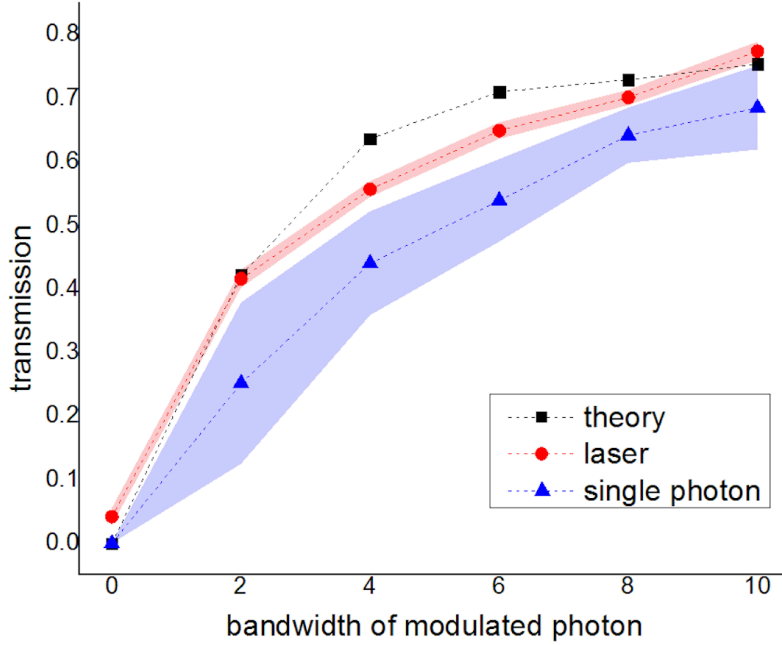


圖 5.19: 黑色為數值模擬；紅線與藍線分別為雷射光與單光子的實驗測量結果，數據點的值為數次測量的平均，帶狀的寬度為測量的標準差。單光子的標準差較大是實驗穩定度不佳造成的。

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。

5.7 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 5.14 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 5.21，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 5.20: 加上濾波器之單光子量測光路圖

以圖 5.21 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 5.21a。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 5.21b，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 5.22 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%。

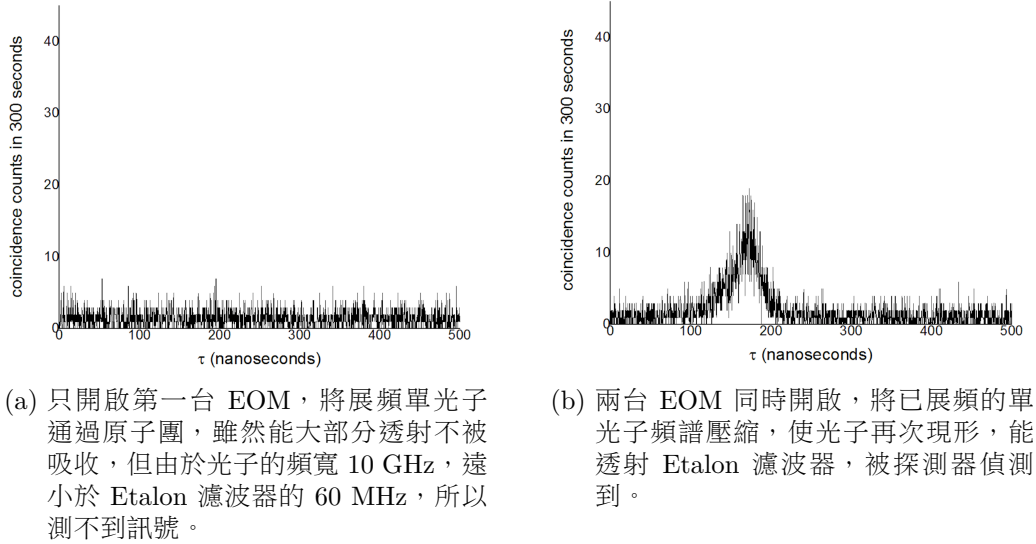


圖 5.21: 加上 Etalon 濾波器之單光子 $G^2(\tau)$ 量測

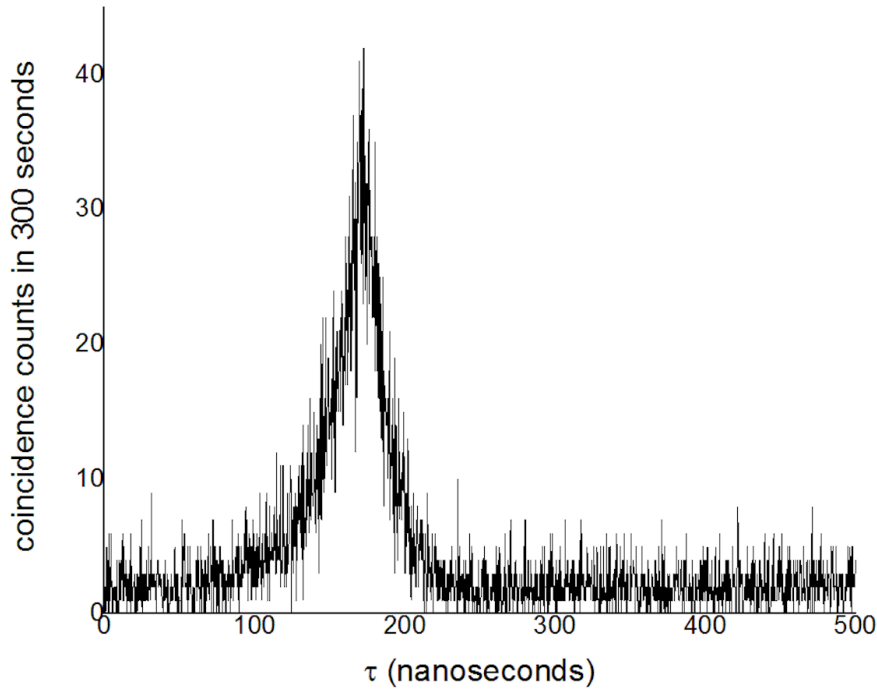


圖 5.22: 在兩台 EOM 同時開啟時測量 $G^2(\tau)$ ，黑線為沒經過 ^{87}Rb 原子氣體管時之量測；紅線為透射 ^{87}Rb 原子氣體管之訊號。

5.8 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 5.23，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

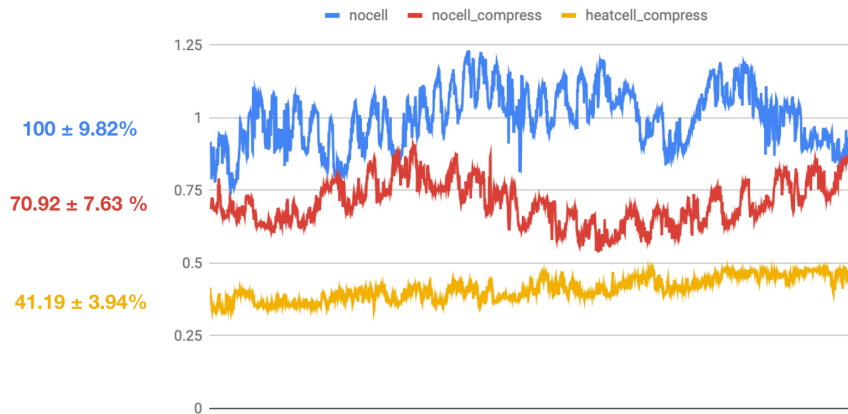


圖 5.23: 原子吸收對雷射光壓縮品質比較圖

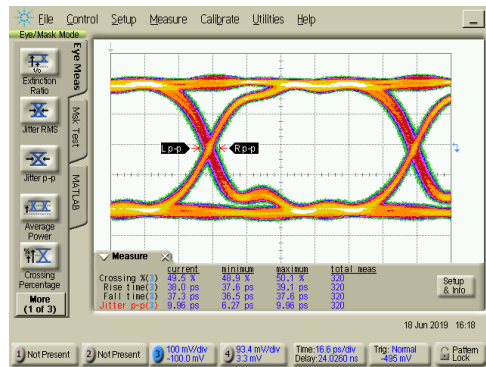
補上另一條紅色的線

5.9 誤差分析與模擬修正

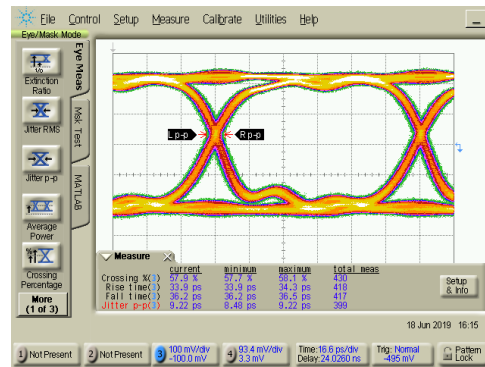
由相位調製的基本原理可知，若輸入兩台 EOM 的隨機訊號符合式 () 的條件，則能完美的將光的相位與頻譜還原成最初的狀態，在我們實驗中所使用的窄頻雷射與單光子，頻寬皆遠小於 Etalon 濾波器的頻寬，在沒原子團吸收的狀況下，被展頻再壓縮的光應該要能 100% 通過 Etalon，這與實驗測量的結果不符，我認為主要的可能原因為隨機訊號的品質不佳所致，兩個訊號從 PRBS 輸出時的波形如圖 5.24，兩者形狀不一致，且上下不對稱，若在經過延長線與高頻訊號放大器波形則變為圖 5.25，兩者變得更不一致，有著不一樣的波形、穩定度、上升時間、下降時間與交叉位置 (crossing)，這些因素都會使兩台 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 5.25 的測量結果，修正

五、實驗架設與結果討論

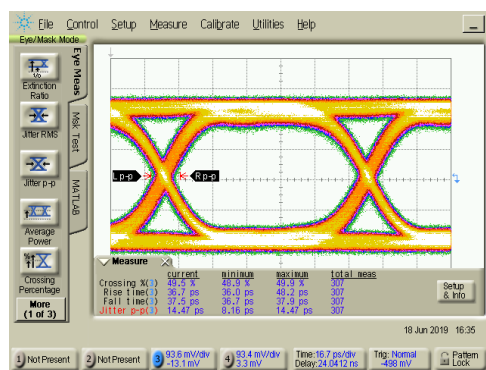


(a) 第一台 EOM

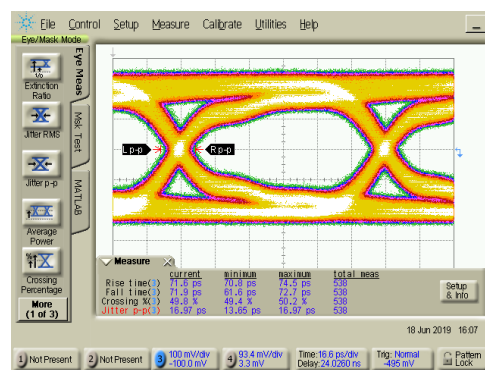


(b) 第二台 EOM

圖 5.24: PRBS 輸出之訊號眼圖 (放大前)



(a) 第一台 EOM



(b) 第二台 EOM

圖 5.25: 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 5.1，並將實驗結果與理論模擬整理成 表 5.2

表 5.1: 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 5.2: 展頻吸收

| | 修正前理論 | 修正後理論 | 雷射光實驗 | 單光實驗 |
|-------|-------|-------------|-------|------|
| EOM 1 | 14 ps | $\pm 7.7\%$ | 38 ps | 123 |

六、 總結

展頻好棒棒是一個想起來很簡單，做起來很靠腰的一個實驗