

一、 實驗架設

本章會簡單介紹實驗上會用到的關鍵儀器，說明其特性與相關設定，並描述元件使用的優化方式與可能造成誤差之原因。

1.1 偽隨機訊號產生器

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 MP1763C (Anritsu)，可以產生 0.5 至 12.5 Gb/s 的偽隨機訊號，裝置如圖 1.1。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偽隨機訊號產生率 10 Gb/s，每秒能產生 10×10^9 個隨機位元，以示波器 (Infiniium DCA-J 86100C, Agilent，使用的模組為 86112A, Agilent) 去測量該訊號的眼圖 (eye diagram) 可以看出訊號的品質，量測結果如圖 1.2，可見實際訊號與理論?? 有很大的差異，實際的訊號會有不小的上升與下降時間，圖形的上下也不太對稱，這都會影響到展頻與壓縮的效果，造成實驗與理論的誤差。

描述眼圖能幹嘛



圖 1.1: 高頻偽隨機訊號產生器裝置圖

一、實驗架設

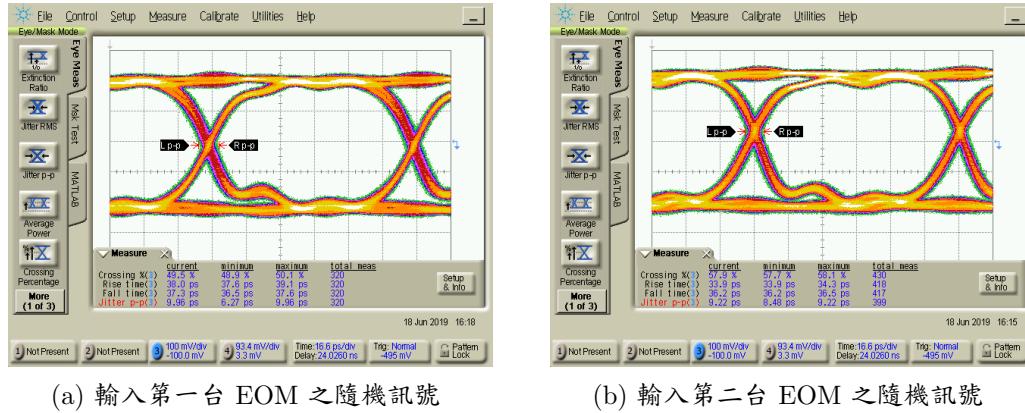


圖 1.2: PRBS 輸出之訊號眼圖（放大前）

1.2 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，分別為頻譜的展寬與壓縮用，裝置如圖 1.3。

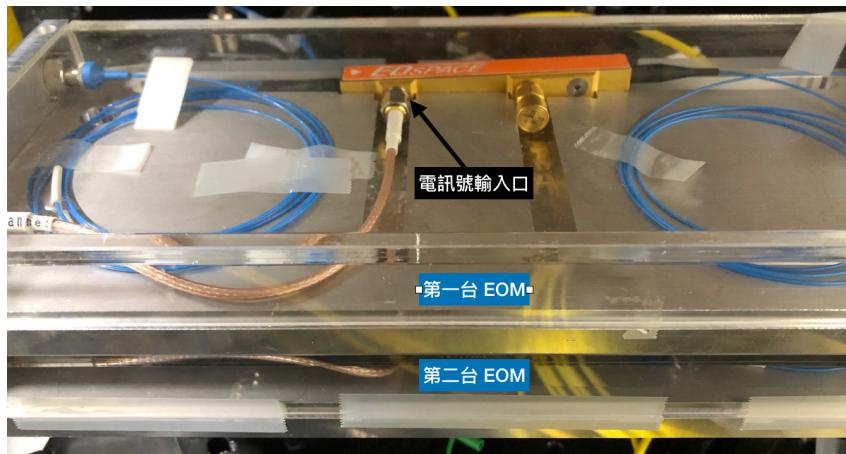


圖 1.3: 我們分別將兩台 EOM 置於盒中提供保護，並以塔狀堆疊節省光路空間。

相位調制器由鋇酸鋰 ($LiNbO_3$) 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作用方向上之晶體折射率，進而達到改變相位的效果，我們定義能入射光相位改變 π 之電訊號電壓為 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。所以我們會在 EOM 前放置一個偏極片 (Polarizer) 半波片 (half-wave plate)，如圖 1.4，藉由調整兩者的角度，使光能以最佳的線偏角度入射 EOM。

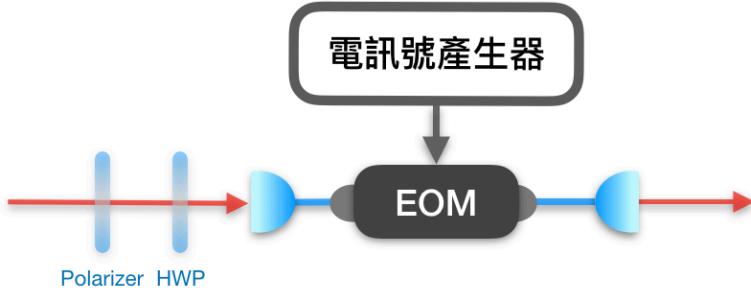


圖 1.4: EOM 及相關元件架設。使用上我們會先讓光通過一偏極片，確定光為線偏振，再以半波片旋轉偏振的角度，優化調製之效果。

1.3 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 $2 V_{pp}$ 的訊號，而 EOM 的 V_π 高於 2 V，所以需再經過放大器才能提供足夠的電壓去進行相位調製。

我們使用的放大器型號為 OA3MVM (Centallax)，輸入的訊號會經過三階段的放大，每一階段各需要兩個電壓去驅動，分別為 V_g 與 V_d ，這組電壓的大小會影響放大的大小與速度，因此我們做了一個穩壓電路，能一次輸出 3 個 V_g 與 3 個 V_d ，裝置如圖 1.5。

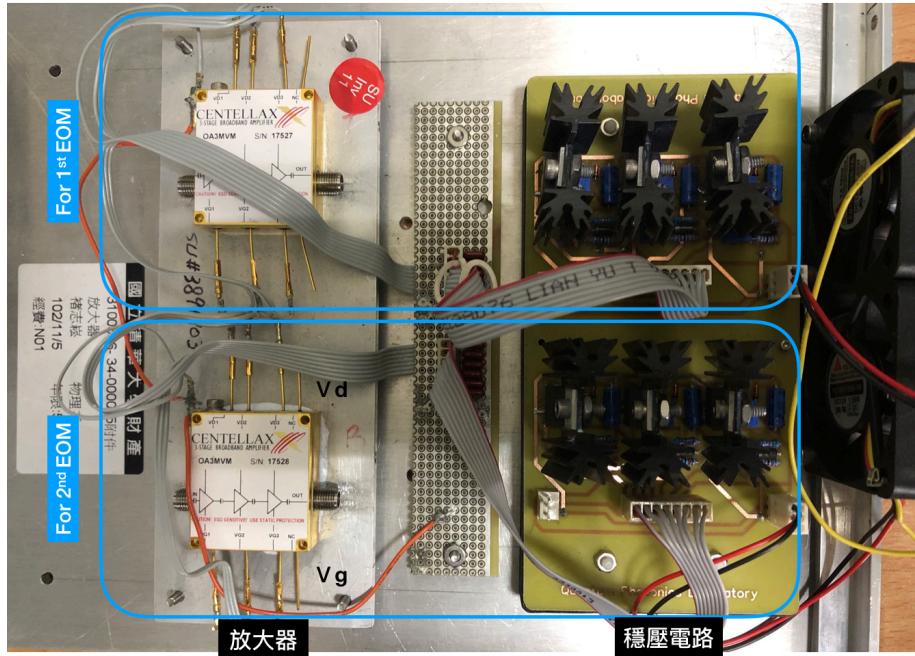


圖 1.5: 放大器與穩壓電路

同樣的，也用示波器去測量眼圖，架設如圖 1.6，觀察經放大後的訊號品質，如

一、實驗架設

圖 1.7，可明顯看出訊號變得更不穩定，且兩台 EOM 使用的電訊號形狀也不同，這是由兩邊使用的連接線（SAM-to-SMA）的長度與材質均不同，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。

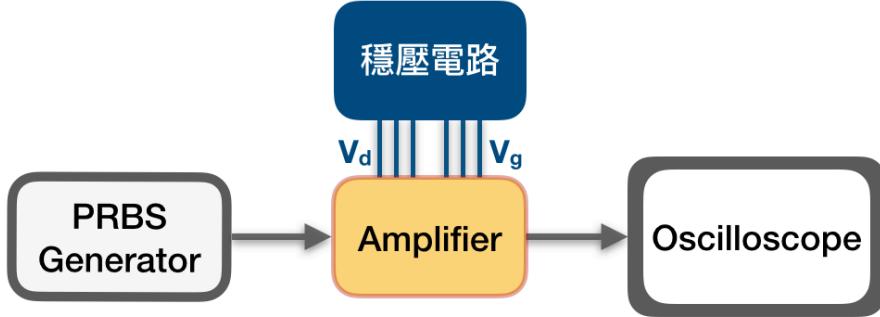


圖 1.6: 將隨機訊號經過放大器並以示波器測量眼圖之電路架設

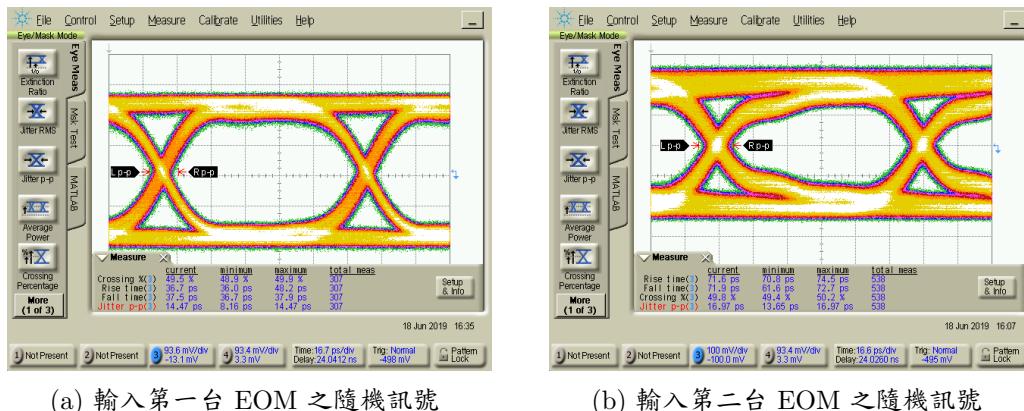


圖 1.7: PRBS 輸出之訊號眼圖（放大後）

我們可從眼圖的測量結果去量化訊號品質，放大前後的比較如表 1.1，從圖和表中能觀察到，輸入第二台 EOM 用的訊號在放大後變得很不穩定，這是因為那端使用的電線長度很長（長邊約 400 公分，短邊約 80 公分），且那條線材已經放了十年，傳輸品質會下降，會有較大的損耗以及較明顯的色散現象，使訊號失真，這會降低我們頻譜壓縮的效果。

表 1.1: 訊號失真與不穩定之量化指標

	jitter	amplitidu	rising & falling
輸入第一台 EOM 用之隨機訊號			
放大前	10 ps	±5.8%	38 ps
放大後	14 ps	±7.7%	38 ps
輸入第二台 EOM 用之隨機訊號			
放大前	9 ps	±6.5%	35 ps
放大後	17 ps	±16.7%	74 ps

1.4 電訊號相位延遲器

如?? 所述，想要對已展頻的光做反向的調製，必須精準的控制兩台 EOM 電訊號的時間差，所以我們會在其中一邊的電路加上一個相位延遲器，其型號為 Model 981 (api technologies corp.)，如圖 1.8，可以藉由調整側邊拉桿的長度來微調電訊號的相位。根據其規格書上的標示，此相位延遲器最多能讓 1 GHz 的訊號延遲 60 度的相位，相當於 1.67 ns 的時間差。若電訊號的傳輸速度以三分之二光速來計算的話，此時時間差等同於 3.33 公分的電路長度差。



圖 1.8: 電訊號相位延遲器

1.5 光源製備

1.5.1 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,

一、實驗架設

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 的雙光子。

1.5.2 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)，波長約為 795 nm，產生出來的光須滿足能量守恆與動量守恆，如式 (1.1)，我們稱其為準相位匹配條件 (quasi phase matching condition)，其中 \vec{k}_m 。

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1.1)$$

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，從圖 1.9 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 chuu2012miniature。除此之外，還會在晶體兩端都鍍上 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 wu2017bright，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 (polarization beam splitter)，將訊號分為 signal 和 idler，以 idler 做為觸發訊號，先對 idler 進行測量，這時另一顆光子 signal 被稱為前驅單光子 (heralded single photon)，此為我們實驗使用之單光子源，會再讓其經過 ^{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 $G^2(\tau)$ PhysRevLett.101.103601 的測量， $G^2(\tau)$ 的定義如 (1.2)。

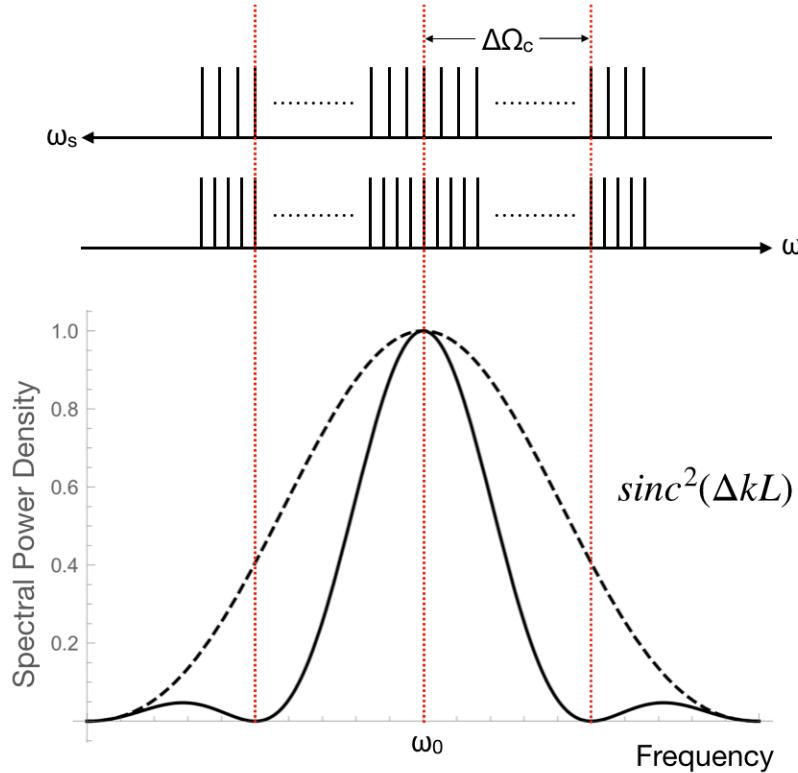


圖 1.9: 雙光子產生機制，下半部為晶體之增益曲線；上半部為共振模態， ω_s 與 ω_i 互相重疊的部分為符合能量守恆條件的模態。僅有在增益曲線內且符合能量守恆的模態會被產生。

$$\begin{aligned}
 G^2(\tau) &= \langle a_i^\dagger(t + \tau) a_s^\dagger(t) a_s(t) a_i(t + \tau) \rangle \\
 &= R^2 + \frac{4\Gamma_s \Gamma_i}{\Gamma_s + \Gamma_i} \begin{cases} e^{\Gamma_s \tau}, & \tau < 0 \\ e^{-\Gamma_i \tau}, & \tau > 0 \end{cases} \quad (1.2)
 \end{aligned}$$

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，式 (1.2) 中的 R^2 項為不具時間關聯之單光子，在激發強度弱的時候它會遠小於雙光子的訊號，所以實驗上我們可以將式 (1.2) 簡化成 式 (1.2) 來分析。在符合準相位匹配條件時能最有效率的產生雙光子，實際測量結果如圖 1.10，此光子之間波包寬度約為 50 ns，將波包雙邊的衰減時間 Γ_s 及 Γ_i 帶入式 (1.4) chuu2012miniature，可計算出光子的頻寬約為 4.5 MHz。

一、實驗架設

$$G^2(\tau) = \frac{4\Gamma_s\Gamma_i}{\Gamma_s + \Gamma_i} \begin{cases} e^{\Gamma_s\tau} & , \tau < 0 \\ e^{-\Gamma_i\tau} & , \tau > 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\Delta\omega = [(\sqrt{\Gamma_s^4 + 6\Gamma_s^2\Gamma_i^2 + \Gamma_i^4} - \Gamma_s^2 - \Gamma_i^2)/2]^{1/2} \quad (1.4)$$

準相位匹配條件的說明和式子

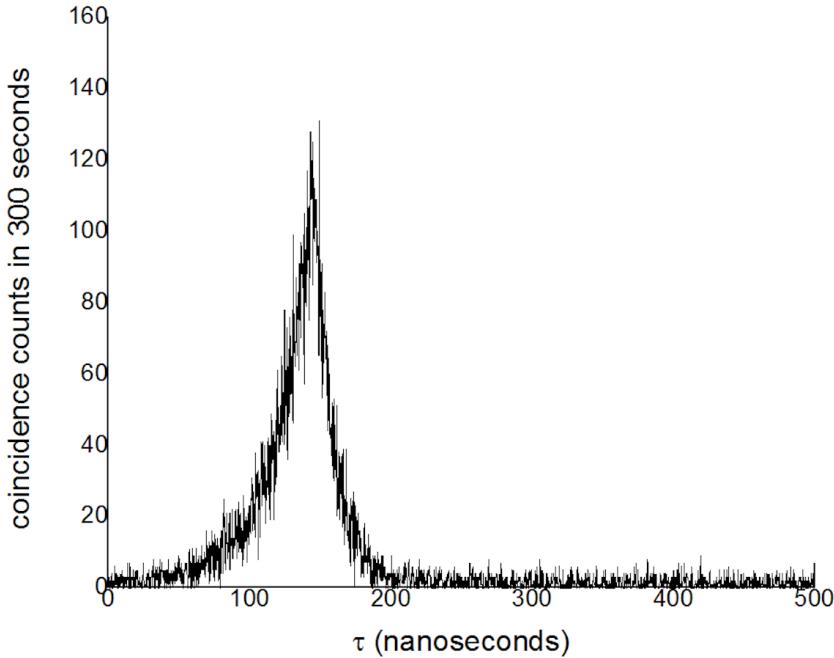


圖 1.10: 紛纏光子對之 $G^2(\tau)$ 量測

為了找到符合準項未匹配條件的入射光波長與晶體溫度，實驗上會以圖 1.11 的光路架設，將入射紅光的頻率固定在 3771054890 MHz，改變 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率 (biphoton rate)，結果如圖 1.12，在 $39.91^\circ C$ 至 $40.10^\circ C$ 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。

以我們使用之晶體的長度與折射率估計，FSR 約為 5 GHz，所以兩個模態的頻率差一定大於 5 GHz，我們可在 ^{87}Rb 氣體管前面加上一個頻寬為 60 MHz 的 Etalon 濾波

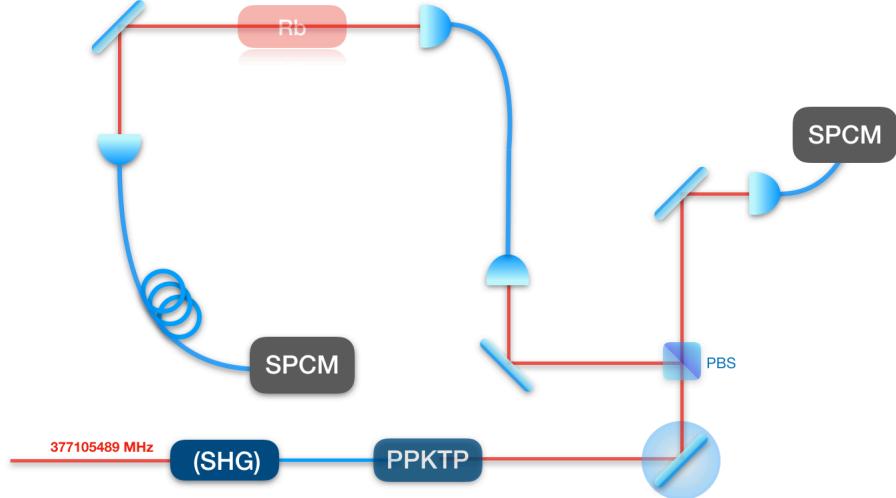
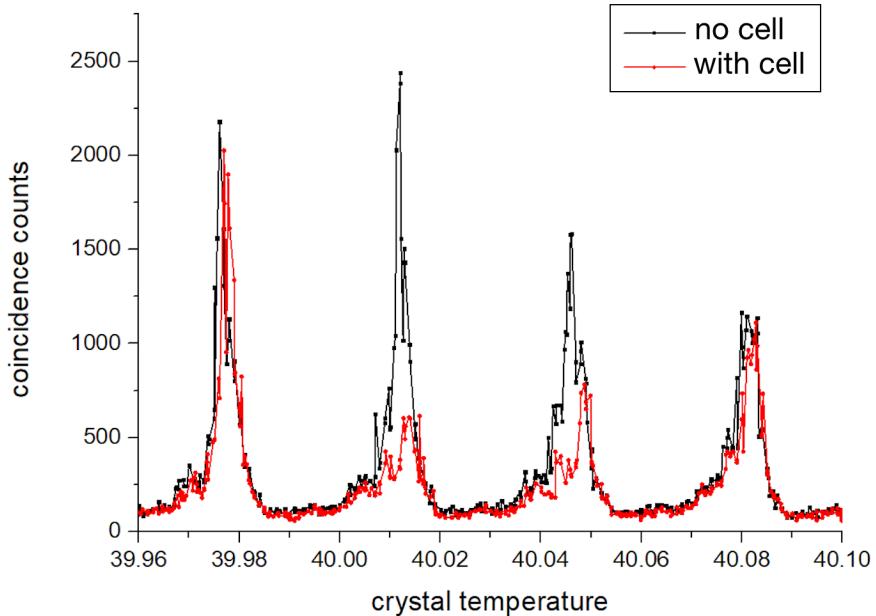


圖 1.11: 固定入射光頻率，調整 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率

圖 1.12: 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。

器（參見??），只允許特定頻率附近的光通過，實驗架設如 圖 1.13，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，如圖 1.14，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，結果如圖 1.15 藍線，濾波後的光幾乎完全被 ^{87}Rb 原子吸收，與圖 1.12 相比可明

一、實驗架設

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。

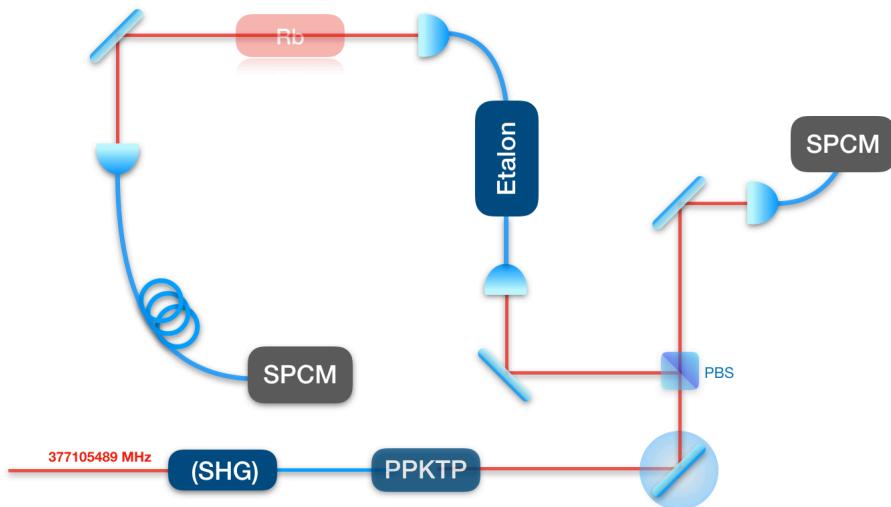


圖 1.13: 固定入射光頻率，調整 PPKTP 晶體溫度測量雙光子的產生率（加上 Etalon 濾波器）

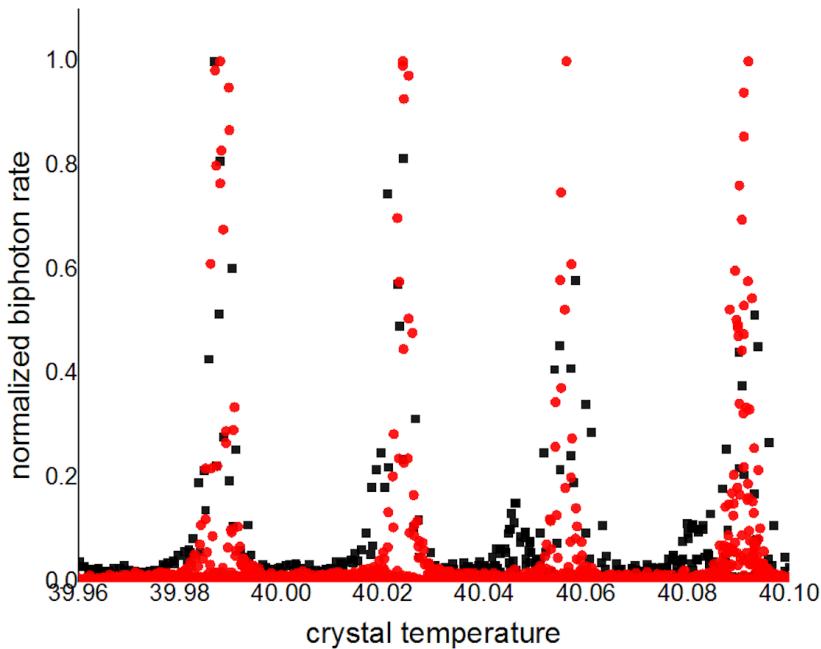


圖 1.14: 在沒放 ^{87}Rb 原子氣體管時之測量。黑色為無 Etalon 濾波器時測量之訊號，紅線為有加上 Etalon 濾波器測量到的訊號，兩者相比可看出，加上 Etalon 濾波器後測量到的頻寬較小，代表有部分的光被濾掉了

重畫圖

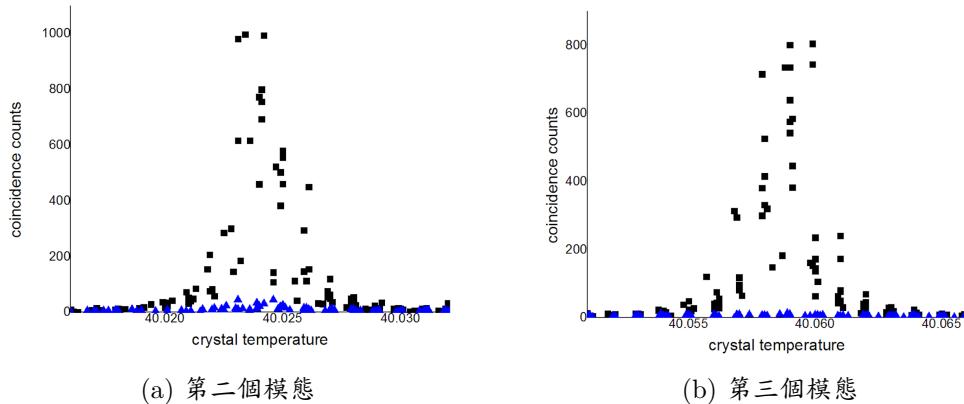


圖 1.15: 加上 Etalon 濾波器之後，測量光子對原子之穿透率。黑色為未放 ^{87}Rb 原子時測量到的訊號，藍色為放了 ^{87}Rb 原子後測量到的訊號，光幾乎完全被 ^{87}Rb 吸收。