

Catch the Pulse: A Journey into FROG's Hidden Challenges

短脈衝捕捉：揭開 FROG 隱藏的測量難點

專題領域：光電領域 組別：B480 指導教授：楊尚達 組員姓名：高盈禧、王郁婷

1. 報告摘要

在進入實驗室訓練的過程中，我們觀摩並學習了 Frequency-Resolved Optical Gating(FROG)的操作，並通過閱讀相關文獻和參考資料，深入理解了該測量方法的基本原理。FROG 技術因其操作簡單且精確度高，成為超短脈衝測量的重要工具。然而，在多次的專題討論和實際應用中，我們發現這項技術的測量結果易受多種因素影響，例如光路距離的微小差異、光束在傳遞過程中的交疊情況、機械設備的步進精度、以及光路能否保持平行與準直等。這些影響因素的存在引發了我們對提升 FROG 測量精度的研究興趣。為了了解如何減小誤差，我們選擇從多項可能變因中進行篩選，最終確定將 BBO 晶體的厚度與光束入射透鏡的間距作為本次研究的核心主題。

在研究的初期，我們選擇了對光路調整需求較低的部分作為切入點，設計實驗以不同厚度的 BBO 晶體進行脈衝寬度的測量。根據色散效應和二階非線性光學的理論推導，BBO 雖然在 FROG 中主要用於增強訊號並生成 autocorrelation，但其內部對不同頻率光束的折射率差異可能導致這些光束在時域和空間域上的偏移，進而影響測量到的脈衝寬度。我們希望通過實驗驗證並量化這種偏移對測量精度的具體影響，以評估不同厚度 BBO 在實際應用中的容忍範圍。

隨後，我們進一步改動實驗的光路結構，包括調整面鏡的位置以及透鏡、BBO 與感測器的相對距離，嘗試模擬光束交疊角度變化可能對測量結果造成的誤差。在事前的理論分析中，我們通過繪製模擬圖和參考相關資料了解到，光束交角的大小對 delay 的解析度具有一定的影響。具體而言，光束交角越大，可能測量到的 delay 結果越多，進而影響量測的精準度與解析度，然而，對於 delay 解析度如何進一步影響最終的脈衝寬度測量，尚無明確結論。因此我們希望通過實驗進一步驗證這一現象，並提供更直觀的結果。

本研究的最終目的是探討 FROG 測量中各種微小因素對量測結果的影響，並嘗試透過數據的觀測更詳細地了解這些因素對 FROG 量測所帶來的誤差，並為提升 FROG 技術的測量精度提供實驗依據和改進方向。同時，通過深入分析 BBO 厚度和光束交疊角度等因素的影響，我們希望進一步拓展 FROG 在實際應用中的適用範圍，為超短脈衝測量技術的發展提供更多參考資料與技術支持。

2. 背景簡介

飛秒雷射技術的快速發展為科學研究和應用帶來了革命性變革，其在光譜學、生物醫學影像、材料加工以及量子信息科學等領域得到了廣泛應用。然而，飛秒脈衝的超短時間尺度以及高頻譜寬度使得其時域與頻域的如何精確測量成為一項挑戰。較為傳統的光學測量方法，難以解析這類超短脈衝的完整結構，因此我們需要更精確的測量技術。

頻率解析光閘（Frequency-Resolved Optical Gating, FROG）是一種基於自相關(Autocorrelation)和光譜分析的非線性光學技術，能夠同時分析測量飛秒脈衝的強度與相位資訊，並提供完整的時頻分佈。尤其是二次諧波頻率解析光柵（SHG-FROG）因其操作簡單且靈敏度高，更是被廣泛應用於雷射脈衝的寬度測量。

3. 研究目的

上述提到 SHG-FROG 被廣泛應用，但其準確性會受限於多種因素，其中晶體厚度和入射光間距都是影響非線性信號生成的重要參數。因此我們的最終目的是找出品體厚度和入射光間距跟測量結果之間的相關趨勢，以便優化 SHG-FROG 測量技術的參數設置，提升雷射脈衝測量的準確性與靈敏度。

4. 研究方法

4.1. 基礎 SHG-FROG 鏡組設計

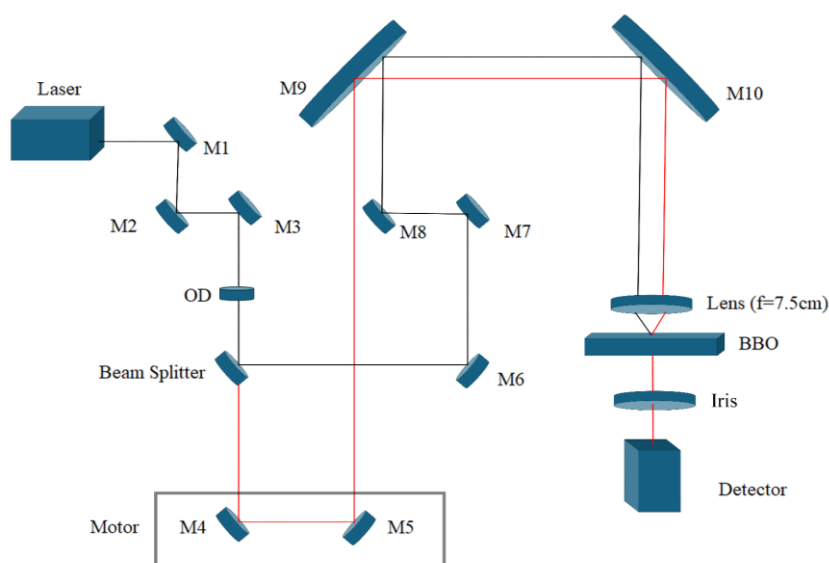


Fig. 1 光學鏡組架設示意圖



Fig. 2 過 BBO 有產生 autocorrelation 的光斑

雷射從 Fig.1 左上方導入平面鏡 M1 與 M2，此兩面鏡子是為方便雷射準直，進入 M3 通過 OD(為防止能量過強，測量時發生 saturation 或將方線性晶體打壞)，進入分光鏡，Fig.1 的紅色光路通過馬達上方的 M4、M5 與進入 M6、M7、M8 的光產生光程差，各自通過 M9、M10 並進入 Lens 聚焦(這邊選用焦距 7.5cm 透鏡)，在焦點附近放置 BBO 並找到 delay，產生三束光(如 Fig.2)，並利用 Iris 濾掉兩側原光，留下中間的光斑進入 detector 量測數據。

4.2. FROG-調整 BBO 厚度

在 SHG-FROG 鏡組的基礎上，我們透過調整 Fig.1 示意圖右下角的 BBO 厚度，搭配 Detector 和馬達進行對雷射脈衝的觀測。實驗中我們使用的晶體皆是 BBO type 1 長 6mm*寬 6mm，而厚度分別是 2.0mm、1.0mm 及 0.5mm 三種。

4.3. FROG-調整入射光間距

在一樣的 SHG-FROG 鏡組的基礎上，我們將 BBO 的厚度固定在 0.5mm，向右微調 Fig.1 中編號 M8 的鏡子，藉此改變入射到 lens 上的兩道光點間隔。需注意的是改變入射光的軌道有可能導致最後兩入射光的中心偏離鏡心，因此還需要將 lens 以後 iris、detector 等物件一同向左平移，才能保證測量準確。

5. 研究結果

5.1. 改變晶體厚度

Table 1 不同 BBO 厚度對應分析之脈衝寬度與 error

BBO 厚度 \ 分析結果	0.5mm	1.0mm	2.0mm
脈衝寬度	170.9fs	165.3fs	166.4fs
error	0.0024142	0.0034384	0.0018177

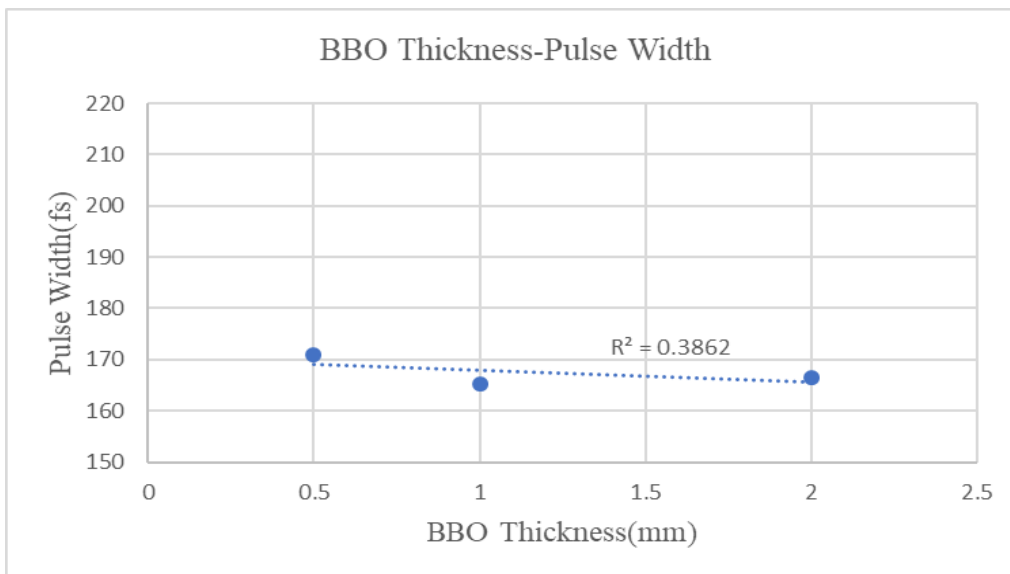


Fig.3 BBO 厚度-脈衝寬度

5.2. 改變入射光間距

Table 2 不同入射光間距對應分析之脈衝寬度與 error

入射光間距	7.90mm	8.72mm	9.70mm
分析結果			
脈衝寬度	170.9fs	183fs	207.3fs
error	0.0024142	0.0022555	0.0047025

這邊 7.9mm 數據採用 3.1 BBO 厚度 0.5mm 之數據。

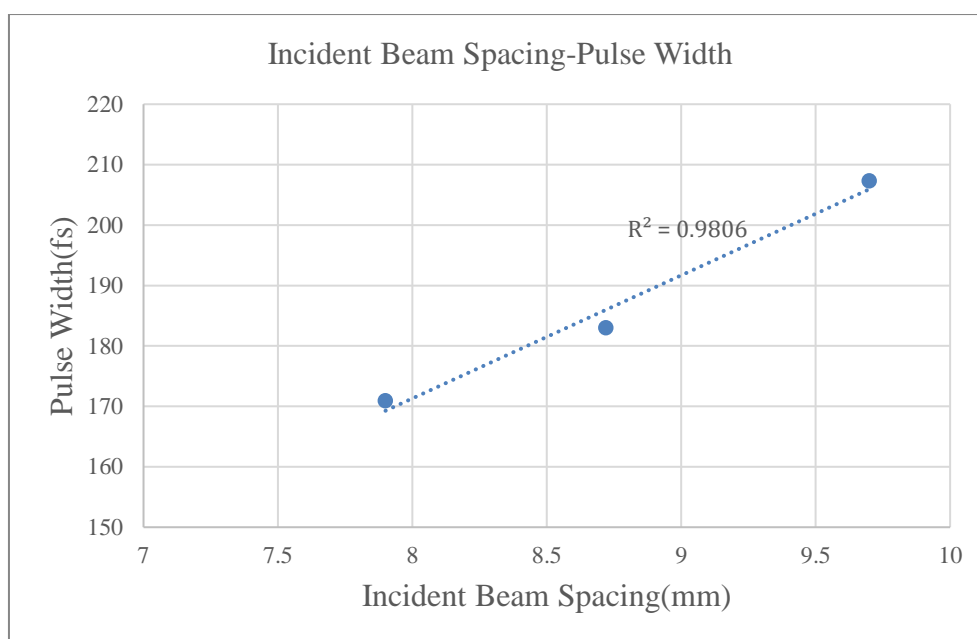


Fig.4 雷射入射間距-脈衝寬度

6. 總結

6.1. 不同厚度 BBO

此實驗總共使用三種 BBO 厚度，量測到的三筆數據經過分析 Table 1 error 值都低於 0.005，從 Fig.3 可以看到三筆數據之脈衝寬度與 BBO 厚度的 R square 為 0.3826，無明顯變化趨勢，三者脈衝寬度差距小，根據計算實驗本身可容忍最大的 BBO 厚度單位到上萬公尺，因此推論原因是為實驗本身可容忍最大的 BBO 厚度太大，造成色散效應與二倍頻傳波疊加的效應容忍度大。因此 BBO 厚度雖會造成影響，但實驗中 1.5mm 的最大厚度差體現出的效應微量到無法被精準測量，甚至於其他環境因素造成的擾動都可能大過於 BBO 厚度造成的效應。

6.2. 不同入射光間距

根據 Table 2 實驗數據可以發現間距越大，脈衝寬度有越大的跡象，從 Fig.4 可以看到 R squared 值落在 0.9806，兩者呈現正相關。符合我們對於前述 Geometric time smearing 對於脈衝寬度的推論，間距越寬效應越強，誤差 delay 增加導致測量脈衝寬度增加。

7. 心得感想

本次的專題和以往參與的課程有著巨大的差異，除了可以在學年的末尾交出專屬自己的一份研究成果外，最特別的是教學方式的差別。在第一個學期，我們主要的目標在學習研究所需的背景知識，教授會定期向我們出題，而我們則須在指定時間內查閱資料，並將自己的答案在專題會議上回報給教授。會議上我們會繼續詢問解題過程中碰到的難點，而教授會在回答之餘從中挑選出一些題目繼續補充延伸的知識。這種引導式的教學不僅能加深學習的印象，還幫助我們將學習到的知識用更口語的方式表達出來。

第二學期我們首先進入實驗室正式學習各項儀器及元件的操作，搭配上學期學習到的理論知識，並在前輩們的指導與幫助下透過架設 knife edge、Mach-Zehnder 干涉儀學習光路準直、元件的組合與清潔、matlab 與 labview 的使用等基本技能，這些技能不僅奠定了我們完成專題研究的基礎，也讓我們對光電實驗的精細程度有了更深刻的體會。

之後確立專題報告題目，我們開始著手進行實驗設計與架設，過程中遇到許多瓶頸，包含不確定想法正確與否或是在實行時碰到與想像中不一樣的難點像是空間架設的限制，慶幸的是實驗室的學長姐與教授都十分熱心地在我們遇到困難停滯時能夠適時給予建議，讓我們的專題能夠有效率的持續推進。

參加本次的專題研究讓我們看見了不一樣的學習方式，讓我們對光電領域和研究方法有了更進一步的了解，當然也磨練我們發想與解決問題的能力、培養我們遇到困難面對挫折的心態。當然過程中感謝專題參與實驗的這些儀器們，在乖乖的供養下都能完成工作。最後感謝悉心指導我們的楊尚達教授，以及過程中不辭辛勞為我們提供建議與協助的師長與學長姐們，正是因為有他們的支持與幫助，這段學習旅程才得以如此充實與難忘。