

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Spectral Broadening With  
Multipass Cell

利用多通腔體拓寬雷射頻譜

專題領域：光電領域

組 別：B623

指導教授：陳柏翰

組員姓名：陳冠臻、黃宗予

研究期間：114年 2月 1日至 114年 12月 22日止，共 10個月

## Abstract

This study employs a multi-pass cell (MPC) to spectrally broaden laser pulses in order to realize a high-power-efficiency femtosecond light source. The core objective is to systematically analyze how the initial pulse energy and repetition rate jointly influence the overall power efficiency, where an increase in repetition rate effectively corresponds to an increase in average power. This work aims to identify the upper limits of pulse energy and repetition rate that allow efficient operation within the current experimental architecture, and to investigate the key physical mechanisms that constrain these limits. The results will provide guidelines for future system optimization and for overcoming existing performance limitations.

## 摘要

本研究利用多通腔 (Multi-pass Cell) 對雷射脈衝進行光譜展頻，以實現高功率效率之飛秒光源。研究核心為系統性地分析初始脈衝能量與重複率對功率效率的相依性，重複率的提升等效於平均功率之提升。本研究旨在確定當前實驗架構下高效率運作的能量與重複率之上限，並深入探討造成此限制的關鍵物理因素。研究結果將為未來優化系統表現與克服現有缺陷提供準則。

# 1. 背景介紹

## A. 光譜展頻原理：克爾效應 (Kerr Effect)

實現高峰值功率最有效的方法之一，是在保持脈衝能量恆定的情況下縮短脈衝持續時間。一種成熟的方法是利用光學克爾效應 (Optical Kerr Effect)，在這種效應中，介質的折射率 $n(I)$ 會依賴於瞬時光強度  $I$ ：

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

其中  $n_0$  是線性折射率， $n_2$  是非線性折射率， $I$ 是光強度。這種非線性會引起一個隨時間變化的相位位移，稱為自相位調變 (Self-Phase Modulation, SPM)，可表示為：

$$\Delta\phi(t) \propto n_2 I(t)L$$

其中  $L$  是交互作用長度[4]。由於瞬時相位與強度相關，光學頻率會被動態調變，從而產生新的頻率成分。時域的前端會引起較大的藍移（頻率增加），而時域的后端則會紅移（頻率降低），最終在頻域上展寬。

根據傅立葉對偶性 (Fourier duality)，對應於更短的轉換極限(Transformer-limited) 脈衝持續時間。

## B. 展頻方法比較(說明多通腔之優勢)[3]

現今學界有許多不同的展頻方法，其中比較主要的方法分為固態波導、氣態波導，以及塊狀介電質 (bulk dielectric)。光纖為主要固態波導的所使用的材料，其主要適用的出射脈衝能量低於  $3\text{ uJ}$  的脈衝，由於固體能夠承受的最大功率較低，因此若使用較高能量的脈衝進行入射，容易將介質打壞。

氣態波導則主要使用毛細管(capillaries)，於其中充氣態介質，但此種方法與光纖存在相反的問題。實驗的最終目的是產生高峰值功率的雷射，但由於毛細管的面積要比光纖要大得多，並且非線性相位 $\Delta\phi$ 與脈衝的峰值強度  $I$  成正比，因此使用毛細管要產生相同的非線性相位，需要較高的入射脈衝能量(>100uJ)。毛細管有一個很大的問題，就是當入射功率過高時，光會產生抖動，沒有辦法很好的將光源耦合進波導，展頻的品質也有很大的問題，可能過十分鐘頻譜形狀便會改變，因此不適合長時間的使用，在實際應用上便會遇到問題。

既然一個能量太低、一個能量太高，因此便有人想到了將以上兩種方法結合在一起，使用了充氣的空心纖維(hollow-core fiber)作為展頻的介質，可以使用面積較小的纖維，同時不會有毛細管的能量損耗問題，但是實驗中這個方法最高產生的功率只有 76W。

而使用塊狀介電質最大的好處就是可以省略波導，不會有耦合的問題，但是同樣會有能量損耗的問題。由於一次累積了大量非線性相位 $\Delta\phi$ ，又 $\Delta\phi \propto l$ ，光束中央較強的地方便會與邊緣的地方產生不同程度的展頻，形成高階模態(High Order Modes, HOM)。而這種展頻的不均勻性，便會使展頻後的脈衝壓縮產生問題，使光束品質下降。為了解決這個問題，便需要空間濾波 (spatial filtering) 將邊緣差距較大的部分去除。此過程會產生相當巨大的能量損耗。

多通腔則是讓脈衝每次都累積一點點的非線性相位，隨後在自由空間 (free space) 中傳播一段時間後再次通過非線性介質。在多次通過介質後，累積達到所需的非線性相位。這是因為高階模態的相位累積速度與基態不同，因此在數十次自由傳播與非線性效應交替的過程中，前次穿過介質時產生的高階模態便有機會與後一次產生的模態發生破壞性干涉，從而緩解通過介質所產生的不均勻性。且多通腔能夠使脈衝的功率超過 300W，遠大於空心纖維的 76W。

多通腔提供了一種緊湊且穩定的替代方案。僅使用兩面鏡子和一個非線性介質，它們就能提供長的有效交互作用長度、高相位累積，並且不像波導對光束指向有很高的要求。為求簡便，在我們的設置中，我們在大氣環境下操作多通腔，並使用空氣作為非線性介質。

## 2. 研究目的

短脈衝雷射目前在許多領域上都有應用，包括材料加工、腫瘤治療[1]、基礎科學驗證及高能粒子加速等。材料方面的應用主要為細微加工[2]，包括了陶瓷、金屬、生物組織、角膜等等，加工的範圍極為廣泛，並且能夠達到原子尺度的極低粗糙度。其中最具代表性的就是眼科方面的手術，例如屈光矯正手術、白內障手術、角膜移植及青光眼手術等。如今，每年已有超過一百萬名患者受惠於飛秒雷射的醫療。

而此實驗的目的就是要找出如何得到更高效率的短脈衝雷射，藉由不同面向去分析其效率下降的原因，期望在未來能夠在峰值功率、持續時間、效率三方面皆得到近一步的提升。

## 3. 研究方法

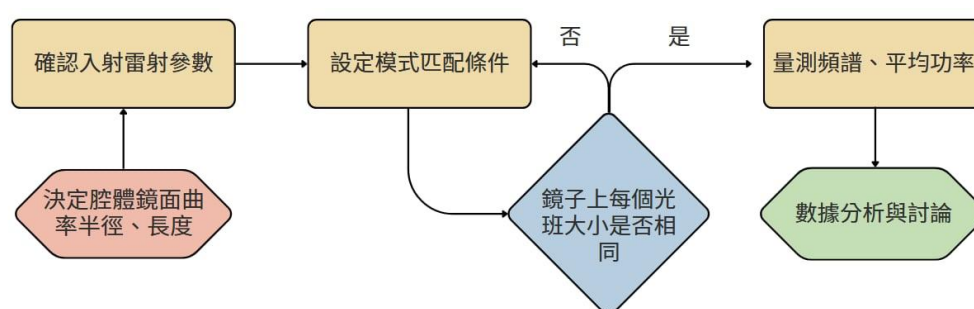


圖 1 研究步驟簡易圖

## A. 反射路徑條件設計

Herriott 型多通腔的幾何設計被模擬以滿足重入 (re-entrant) 條件，此條件最初由 Herriott 推導得出： $\frac{L}{R} = 1 - \cos\left(\frac{\pi k}{N}\right)$  [1]，其中  $L$  是鏡面間距， $R$  是鏡面的曲率半徑， $N$  是總通過次數， $k$  是一個小於  $N$  的整數， $k=1, 2, \dots, N-1$ 。我們使用了一對  $R = 30 \text{ cm}$  的介電凹面鏡。雖然較大的  $N$  能使光線通過非線性介質的次數增加，提供更大的非線性相位累積，但當光斑在鏡面上分布得過於密集，要將光從腔體中導出時，用於導出光斑的平面鏡可能會切到其他光斑。因此在本實驗的架設中，我們選擇  $N=9$ 。除此之外，當  $k$  設定得越小，腔體的長度  $L$  也會越小，使得發散距離不足，鏡面上的光斑大小過小，強度過高；當打在鏡子上的光強度過高，鏡子有可能會暫時或永久性地損壞，嚴重降低功率效率。由於此實驗的目的之一是要產生高功率的短脈衝，因此我們設定  $k$  為理論上的最大值  $k=N-1$ ，得出  $L \approx 58.2 \text{ cm}$ 。

## B. 模式匹配計算

為了讓多通腔中每次反射的光束縮放狀況都相同，輸入光腰  $w_0$  需要滿足特定的匹配條件。理論上的腔內光束腰  $w_0''$  由下式決定：

$$w_0'' = \frac{R\lambda}{2\pi} \sqrt{C(2-C)} [6],$$

其中  $C = \frac{L}{R}$  [2]。由此，計算出目標光束腰為  $w_0' \approx 0.013 \text{ cm}$ 。使用

$$w_0' = \frac{\lambda f}{\pi w_0''}$$

可得  $w_0' \approx 0.101 \text{ cm}$ 。考量到原始光斑半徑為  $0.23 \text{ cm}$ ，

$$\frac{-f_2}{f_1} = \frac{w_0'}{w_0} = 0.44.$$

為在腔體內部形成所需的光斑大小，我們使用了一個由焦距  $f_1 = 25 \text{ cm}$ ,  $f_2 = -10 \text{ cm}$ ,  $f_3 = 40 \text{ cm}$  組成的三透鏡系統，以進行模式匹配。

## C. 實際頻譜量測

藉由分別改變初始脈衝能量及重複率，以產生峰值功率和平均功率的變化，並觀察頻譜有何變化，最後藉由 MATLAB 去模擬經壓縮後之理想脈衝寬度，將量到的頻譜寬度和模擬的脈衝寬度與理論值比較。

## D. 效率分析

分別以脈衝能量 50uJ、100uJ、200uJ 做三種重複率的變化，並觀察在每種條件下效率的差異，最後分析造成此差異的原因。值得注意的是，這裡的三種重複率在每個能量下不同，這是因為為了要讓平均功率在每一種能量下都固定在同樣的值，以方便做比較。

## 4. 研究結果

### A. 頻譜展寬與脈衝壓縮

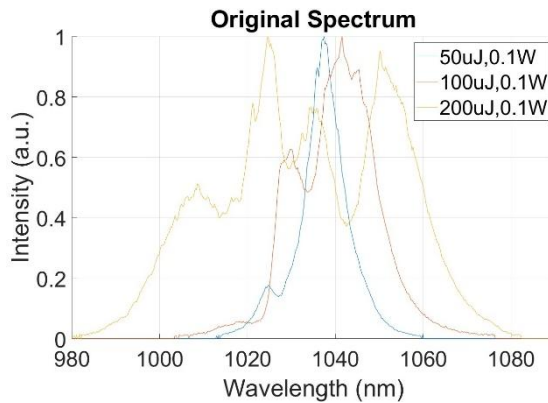


圖 2 不同脈衝能量產生頻譜

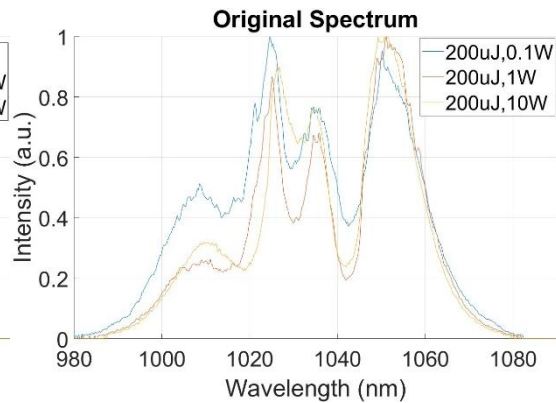


圖 3 不同平均功率產生頻譜

從圖 2 中可以發現，在平均功率相同的條件下，較高的脈衝能量顯著地產生更明顯的展頻效果。這是因為在較高的脈衝能量下，如果時域上的寬度固定的話，雷射的尖峰功率也會較高，因此非線性相位會累積的更多，造成更加明顯的頻率展寬。另一方面，在圖 3 中可以看到，雖然並不明顯，但在脈衝能量相同的條件下，越高的平均功率下產生的頻譜反而越窄。這是因為在尖峰功率相同的情況下，當平均功率上升，在空氣中累積的熱也會越多。當空氣受熱膨脹、密度變低，便會導致非線性折射率  $n_2$  下降，進而使非線性相位的累積變少，最後使展頻效果變弱。當頻域的寬度越寬，轉換出的時域脈衝便會越窄，因此，較大的脈衝能量搭配較小的脈衝重複率，能夠產生最短的時域寬度。在本實驗中，最短的脈衝在 200uJ, 0.1W 的條件下產生，其寬度為 39.5fs。

### B. 功率效率

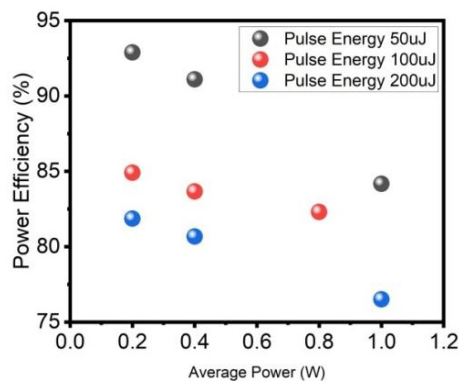


圖 4 不同脈衝能量下平均功率 v. s. 功率效率

從圖 4 中可以明顯看到在相同的脈衝能量下，總體功率效率隨著輸入脈衝重複率的增加而下降。此外，高脈衝能量也會顯著降低效率。當脈衝能量上升，克爾效應會增強，隨之引起的透鏡效應 (Kerr-induced lensing) 會更嚴重地扭曲高斯光束輪廓[6]，降低光束品質，並導致能量通過散射而損失。這種效應凸顯了在空氣填充的多通腔中，非線性相位累積與光束穩定性之間的權衡。

另一方面，當脈衝重複率上升，雖不會直接導致克爾效應的增強，但由於平均功率變高，空氣和反射鏡上的熱效應會逐漸變的顯著。在空氣中，越靠近雷射光束中心，加熱效果就越強，因此在光束中心的空氣折射率變小，外側折射率相對大，便產生了凹透鏡的效果，使光發散、功率下降。除此之外，當鏡子上出現熱累積，鏡子可能會發生熱膨脹，使鏡面曲率改變，造成重入條件的改變，進而讓光束品質下降。

## 5. 結論

我們展示了使用空氣填充的多通腔進行非線性脈衝壓縮，實現了顯著的光譜展寬，並展示了在高能量與高重複率下，效率與非線性失真之間的權衡。未來在壓縮技術、非線性介質和診斷方面的改進，將使這種緊湊且功率可擴展的雷射源能夠朝向更短的脈衝、更高的效率和更廣泛的應用發展。

## 6. 參考資料

- [1]. A.-L. Viotti, M. Seidel, E. Escoto, S. Rajhans, W. P. Leemans, I. Hartl, and C.M. Heyl, “Multi-pass cells for post-compression of ultrashort laser pulses,” *Optica* 9(2), 197 (2022).
- [2]. G. Mourou, “Nobel lecture: extreme light physics and application,” *Rev. Mod. Phys.* 91, 030501 (2019).
- [3]. J. Weitenberg, A. Vernaleken, J. Schulte, A. Ozawa, T. Sartorius, V. Pervak, H.-D. Hoffmann, T. Udem, P. Russbüldt, and T. W. Hänsch, “Multi-pass-cell-based nonlinear pulse compression to 115 fs at 7.5  $\mu$ J pulse energy and 300 W average power,” *Opt. Express* 25(17), 20502–20510 (2017).
- [4]. R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, 3rd ed. (Academic Press, 2008).
- [5]. A. E. Siegman, *Lasers* (University Science Books, 1986)
- [6]. K. Fritsch, M. Poetzlberger, V. Pervak, J. Brons, and O. Pronin, “All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs,” *Opt. Lett.* 43, 4643–4646 (2018).
- [7]. Weiner, A. M. (2009). *Ultrafast Optics*. John Wiley & Sons.

## 7. 心得感想

在正式開始這份專題之前，我對超快光學的了解幾乎是零。在大學階段，我們並沒有修習任何與光學直接相關的課程，對飛秒雷射、多通腔展頻、脈衝壓縮等概念也完全陌生。起初面對大量的英文期刊論文，許多專業名詞與實驗方法都令人感到相當吃力。然而，隨著每週在 meeting 中不斷地閱讀、準備報告、以及聆聽同儕分享，我開始逐漸在腦中建立起一套對超快光學的基本概念。雖然理解的過程緩慢，但每一次「終於讀懂一點點」的瞬間，都讓人覺得成就感十足。

在這段時間裡，除了文獻上的學習，實驗室安排的一次次實驗訓練更是我收穫的主要來源。從最初連調一條雷射路徑都要花上一整天，到後來能逐漸掌握調整反射鏡、光纖耦合、量測光譜等技巧，在不斷重複練習的過程中逐漸累積成為真正能「動手做」的能力。這些操作看似簡單，但實際執行起來需要的細心與耐心遠超想像，而過程中的錯誤與失敗則讓我學到更多。特別是在多通腔的操作上，對齊光路、理解光線在腔內的路徑、檢查每一片鏡子的角度，都讓我深刻感受到超快實驗並不是僅靠理論就能完成的領域。

除此之外，我也在專題中首次嘗試將自己對物理現象的理解以數學模型的方式寫成程式，進行模擬、擬合與數據分析。雖然這些程式並不複雜，但能把腦中想像的模型透過數學語言與程式真正「跑起來」，並與實驗數據互相比對，那種「模型變成現實」的感覺讓人覺得非常有趣也很興奮。這段經驗也讓我更加確信程式與物理模型化能力在未來研究中的重要性。

我很感謝教授願意讓我們進入實驗室學習，並在每週 meeting 中不厭其煩地向我們講解基本的光學觀念，協助我們釐清閱讀論文時的盲點。教授除了給我們方向，也讓我們能以自己的步調探索與理解，讓這份專題不僅是任務，更是一段成長的過程。

此外，我也非常感謝陳彥宏學長在一次次實驗中的耐心協助。許多儀器的操作、架設與維護若沒有學長指導，我們可能不但效率低下，甚至還會因操作錯誤而損壞更多設備。能在安全且高效率的環境下學習，是我們非常幸運的事。

最後，這份專題讓我真正體會到研究並不是一條平坦、照著 SOP 走就能成功的道路，而是充滿不確定性與挑戰的探索旅程。從完全不熟悉的領域開始，到如今能理解實驗背後的邏輯並親手操作裝置，這段學習經驗讓我獲得了遠超預期的成長。未來無論是否繼續走超快光學這條路，這一年中累積的知識、技能與對研究的態度，都會成為我寶貴的資產。