

小型鈦藍寶石光梳雷射

劉子維、吳建明、鄭王曜

國立中央大學

物理學系

桃園市中壢區 32001 中大路 300 號

本文提供一個新的技術，使得頻寬廣，脈衝短的鈦藍寶石光梳雷射可以比之前有效的縮小體積。其中最重要的技術關鍵有二，其一在於用光纖雷射作為幫浦(pump)雷射，不單省空間，也省錢。我們示範了，利用一個三十瓦的光纖雷射，不但可以同時幫浦二台超短脈衝雷射，其雷射品質甚至可被應用為兩台光梳子雷射(dual-comb laser system)。另外，我們製作了手掌大小的穩頻半導體雷射作為光梳雷射之參考頻率。所有系統，含兩台鈦藍寶石雷射，幫浦雷射以及穩頻半導體雷射，只佔有 50 公分見方的面積。

關鍵字：光梳雷射、超短脈衝、光纖雷射、穩頻雷射、鈦藍寶石雷射、半導體雷射。

鈦藍寶石雷射是目前人類所使用的雷射中，頻寬最寬，能夠做到的脈衝最短，重複率最高，以及功率最大的雷射。即使做為連續波的用途，在橘光到近紅外光的範圍，也是廣受歡迎的雷射，主要在於連續可調的頻寬非常寬。然而，此雷射最主要的缺點在於體積大，幫浦雷射昂貴。早期使用氫離子雷射 488-nm 光來幫浦鈦藍寶石雷射，但水與電的消耗太大。目前最普遍使用的是半導體雷射幫浦之固態雷射(Nd:YVO₄)，即，diode pumped solid-state laser (DPSSL)。這種雷射光的波長為 1064-nm，仍無法用來幫浦鈦藍寶石雷射，必須經由倍頻晶體，而晶體本身必須放在光學共振腔中，加強倍頻光的強度，才能有足夠的綠光(532 nm)。這種方法產生的綠光，十分"乾淨"，因為光學共振腔出來的光有空間濾波的妙用，同時光強度噪音也小。但是，內含高功率光源的光學共振腔維護不易且造價昂貴。

本文首次證實，利用光梳雷射倍頻到綠光是可以用來幫浦超短脈衝雷射的，同時產生的綠光一樣乾淨。不同於DPSSL雷射系統的是，我們不需要光學共振腔，只要一個摻雜氧化鎂之週期極化晶體(LiTaO₃)(MgO:sPPLN)，在三十瓦的幫浦下，可以有九瓦的綠光。我們並且成功的造成穩定的二套超短脈衝鈦藍寶石雷射系統。但是，對於要做出光梳子雷射，幫浦雷射強度的穩定度，要求是更加嚴格的。例如，我們從MPG光纖雷射公司借給我們使用的光纖雷射(model YFL-P-20-1120)，所幫浦出來的鈦藍

寶石超短脈衝雷射的重複率線寬與雷射模線寬，是IPG公司的雷射(YLR-30-1064-LP-SF)所幫浦下的十倍。二台光纖雷射的功率相同的情況下，主要的差別在於MPB的雷射強度噪音約為IPG公司的 3.5 倍。看似略微大的噪音，對於光梳雷射，卻有莫大的差異。我們的研究發現，些微的幫浦噪音，會造成鈦藍寶石晶體折射率的些微改變。這個改變，除了造成雷射共振腔長的改變外，也會造成脈衝的啾頻現象(chirping)，而加大雷射模線寬。

鈦藍寶石光梳雷射的縮小化，也是整個雷射體積縮小的主因。我們的兩套雷射系統，改裝自 Gigaoptics 公司，型號 GIGAJET TWIN 20c/20c。如圖一所示，我們將原雷射三稜鏡拿掉，重新調整光路。這是因為，如果有三稜鏡，在控制 PZT1 及 PZT2 以控制雷射重複率時，光路易有橫向的改變，造成脈衝相位的極端不穩，非常不利於作成光梳雷射。共振腔中大多使用啾頻鏡片來補償色散，因此可以做到很小，也因此有 1 GHz 的高重複率。請留意，當鎖模成功時，雷射光為單一方向之行進波，因此圖一中之 beam 2 會消失。

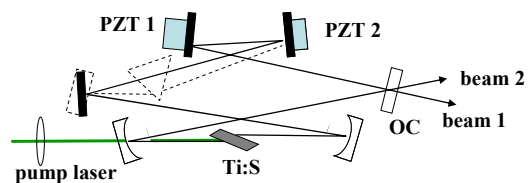


圖 1 我們的兩個鈦藍寶石雷射的結構。PZT:pizo-electric transducer; OC: output coupler

另外一個造成鈦藍寶石光梳雷射體積縮小的重要因素是，我們不使用傳統的自參考(self-reference)的方法做光梳雷射。自參考的方法，又叫做 1f-2f 干涉儀。它需要非常多的光學過程才能做到。例如，需要有光子晶體光纖來展開頻譜，需要有倍頻晶體來倍頻。然後需要很好的對光才能將展頻過的脈衝與倍頻後的脈衝重疊在一起。

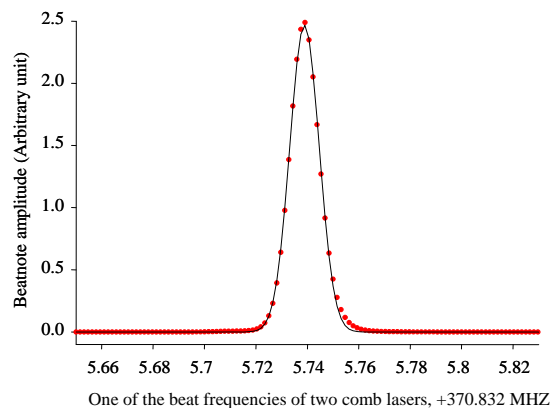


圖 2 兩台光梳雷射的拍頻，線寬大約 20 kHz。因此推得同調時間約為 50 μ s。

我們使用一個，在我們實驗室已經量測過絕對頻率的手掌大小的穩頻半導體雷射，同時來控制兩台鈦藍寶石雷射的絕對頻率，以達成光梳雷射。這樣不但節省空間，節省經費，同時也使兩台光梳雷射有很好的同調性。圖二為，我們用一個巧妙的方法，量得二個光梳雷射拍頻的線寬，因而推得二台雷射的同調時間(coherent time)為五十毫秒(50 μ s)

雷射的重複率則由實驗室中的波形產生器來鎖頻。圖二加上圖三證明了，在 IPG 公司的雷射幫浦下，我們確實可以產生兩台品質非常優良的光梳雷射，而且更省造價，更省空間。

(a)

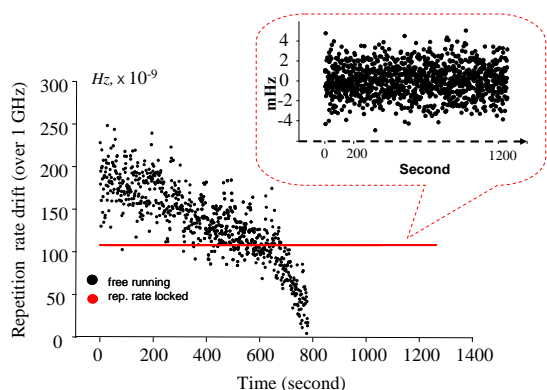


圖 3 黑色點，為雷射重複率未鎖頻前，隨意飄移的情況，在 800 秒的時間內可以飄到 250 Hz。鎖頻後為紅點，頻率穩定在 8 mHz 的範圍內。

光梳雷射的頻率是否客觀，穩定，可以重複，跟手掌大小的參考雷射有關。圖四中，我們利用兩個穩頻雷射的拍頻，來觀察參考雷射頻率的重現性。發現，在兩個星期的量測中，標準差為 1.3 kHz。

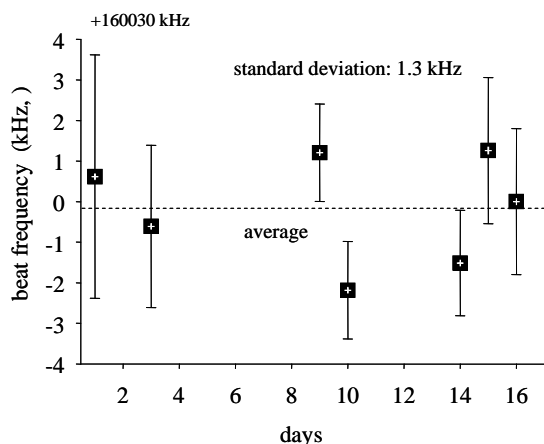


圖 4 手掌大小的參考雷射的頻率客觀性之研究。

這樣性質優良的雙光梳系統，將送到化學實驗室，中央研究院原子分子研究所，做為高解析，快速，寬頻雙光梳分子光譜的重要儀器。

Original Paper

Tze-Wei Liu, Chien-Ming Wu, Yen-Chu Hsu, Wang-Yau Cheng*, "Dual Ti:sapphire comb lasers by a fiber-laser pumping scheme and a hand-sized optical frequency reference", Appl. Phys. B 117, 699 (2014). DOI 10.1007/s00340-014-5885-z

主要作者簡介

鄭王曜現職為中央大學物理系副教授。1999 年畢業於國立清華大學 (National Tsing Hua University)，取得物理博士學位。目前研究領域為雷射光譜、電磁精密量測、原子物理。個人文章曾獲得美國光學學會選為亮點文章 (Spotlight on Optics, 2013 年)。曾獲有庫科技論文獎(2014 年)。

