

淺談固態藍/綠光雷射之發展

黃升龍
中山大學光電工程研究所
e-mail : shuang@mail.nsysu.edu.tw

固態藍/綠光雷射由於應用廣泛，近年來發展的相當快速，利用半導體雷射直接產生藍/綠光雷射，或以半導體雷射經各式頻率轉換技術產生藍/綠光雷射的相關技術是本文的重點。

一、前言

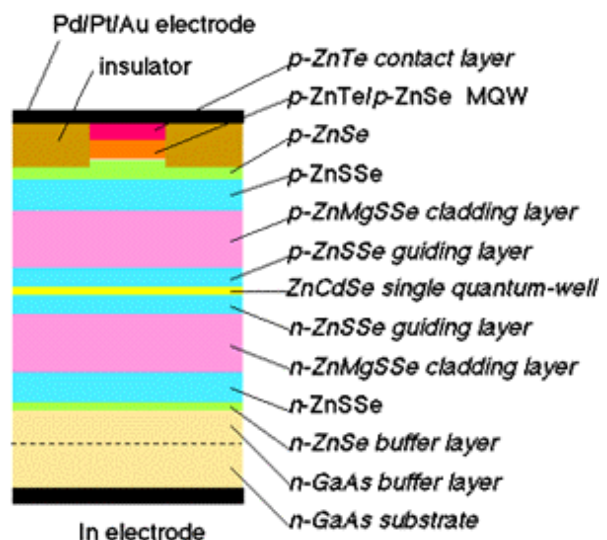
在可見光的三原色（紅、綠、藍）中，目前只有在紅光波段可以半導體雷射提供體積小、生命期長且價格低廉之商業化產品，藍、綠光波段則以氣體雷射為市場上之主流，因此，如何能開發出較低廉且維持小體積及長生命期之藍、綠光雷射是光電領域相當重要之課題，因為藍/綠光波段之雷射，應用領域相當廣，如：資料儲存、雷射顯示器（如：大螢幕電視、投影機、雷射劇院）、微細加工、精密定位、高解析度印刷等^{[1],[2]}。

目前在固態藍/綠光雷射技術的發展上相當多元化，雖尚未有最佳之解決方案，但各項技術均有其長處，本文將介紹其中進展較快的幾個方向，包含：寬能隙半導體雷射、半導體雷射做準相位匹配（quasi-phase-matching）直接倍頻之雷射、半導體雷射激發之腔內倍頻雷射及半導體雷射激發之上轉換雷射之近況。

二、寬能隙半導體雷射

以半導體雷射直接產生藍/綠光雷射，長久以來，一直是被熱切期待的，不論學術界或產業界，

均投入大量人力，直到 1990 年美國 3M 公司成功製作出摻氮原子之 p 型 ZnSe，因而首度展示了以 II-VI 族硒化鋅（ZnSe）為基底之半導體綠光雷射，不過當時的工作條件為液態氮之溫度 77° K 且為脈衝式的驅動，到了 1993 年 SONY 公司成功的在室溫下產生 490 及 523 奈米之藍/綠光雷射，其結構如圖一所示，可說是 ZnSe 材料之高峰期，之後由於生命期較短的問題，使得此材料逐漸退燒，至 1998 年時亦只有約 400 小時之生命期，比起商業化產品所至少需要之 10,000 小時生命期尚有一段距離。



圖一：ZnSe-based 藍/綠光半導體雷射結構圖。

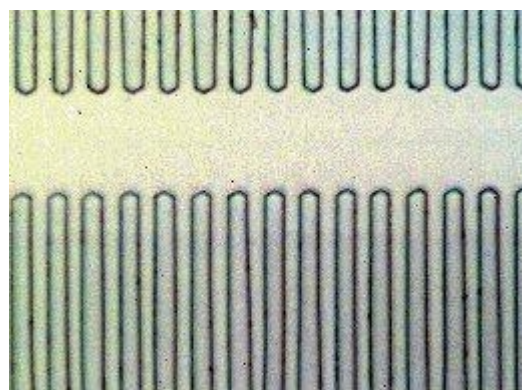
與此同時，III-V 族氮化鎵（GaN）為基底之半導體發光二極體，由於 p 型摻雜的困難在 1988 年由 Akasaki 教授得到初步的解決，使得氮化鎵材料快速發展，1991 年首先由日本日亞公司（Nichia Chemical Industries）的 Shuji Nakamura 生長出低電阻高品質之 p 型摻雜 GaN 展示了雙極性之發光二極體【註：單極性之 GaN 發光二極體在 1968 年就已由 RCA 公司研製出，但效率非常低。】，並於 1996 年成功的在室溫下展示了藍紫光半導體雷射^[3]，並在 1998 年成功的達到上萬小時生命期，可做商業化生產。目前日亞公司（網址：www.la.mesh.ne.jp/nichia/index-e.htm）已可提供 30 毫瓦，410 奈米的藍紫光雷射，不過尚無法突破至藍/綠光雷射波段，這主要是由於較長波長的 GaN 半導體基材，需與鎵形成三元化合物，較高之鎵比例雖可使能隙減少，波長朝長波長偏移，但較高之鎵比例由於原子大小之不匹配等因素又使得晶體品質劣化，只能作為發光二極體這種非同調光源，卻不能產生雷射，此項難題，尚有待克服。最近美國的 Cree 公司亦宣布能在碳化矽（SiC）基板上生長氮化鎵基材，並產生室溫工作之連續光輸出，在 3 毫瓦的功率下，可有大於 100 小時之生命期，後續發展值得注意^[4]。

三、準相位匹配倍頻之藍/綠光雷射

相位匹配是一般雷射要產生倍頻，所需滿足之條件，以使得基頻光與倍頻光能以相同之速度前進，建設性地產生倍頻光，以提昇效率。利用非線性晶體的雙折射效應達到相位匹配是一般常用之方法，但缺點是非線性晶體的最大非線性係數無法被利用到，且無法使用較長之晶體而且維持最高之基

頻光功率密度及方向一致性，而準相位匹配可避免以上缺點。

準相位匹配的觀念中，早在 1962 年就由 N. Bloembergen 教授提出，用以克服材料的色散問題，利用週期性區域反轉的方式，達成準相位匹配，但是直到 1991 年才由 Myer 教授在矽玻璃材質達到 1 pm/V 之非線性係數，之後此領域便進展快速，1993 年 Sony 公司成功的以脈衝式電壓導致區域反轉技術應用在鋰酸鋰基板達成高達 600%/W-cm² 之轉換效率，到了 1995 年，Byer 教授以液態電極取代金屬電極，以避免介電崩潰效應，如圖二所示為液態電極所做之週期性換極鋰酸鋰 (periodically poled lithium niobate, PPLN) 晶片。之後鋰酸鋯 (LiTaO₃)，磷酸鈦化鉀 (KTP) 等材料陸續被成功的做出週期性區域反轉。此技術的缺點，則是對基頻光的要求相當高，不但要單橫模 (single transverse mode) 亦需單縱模 (single longitudinal mode) 才能有效的倍頻，一般的 F-P 半導體雷射達不到要求，需以 DBR 半導體雷射才可有效倍頻，因而價格較高。



圖二：週期性換極之 酸鋰晶片。

利用週期性換極的鋰酸鋰，已可將 Nd:YAG 倍頻產生大於 2 W 之綠光^[5]，而用週期性換極之磷酸

鈦化鉀(PPKTP) 則已可產生 740 毫瓦之 473 奈米藍光^[6]。這種技術比利用雙折射作相位匹配的體積非線性晶體，確實有獨到之好處，同時，除了鉍酸鋰及磷酸鈦化鉀之外，尚有相當多鐵磁性非線性材料，因此其他波段之週期性換極材料，將有可能在短期內大量出現。

四、半導體雷射激發之腔內倍頻雷射

腔內倍頻的固態雷射，是先利用高功率紅外光（通常約為 800 奈米波長）半導體雷射激發固態晶體產生約 1 微米之紅外光固態雷射，再在共振腔內以非線性晶體倍頻。此紅外光固態雷射之頻寬及發散角均遠小於半導體雷射且垂直及水平發散角相同，因而倍頻效率可高於半導體雷射的直接倍頻，同時亦不需昂貴的單縱模半導體雷射，只要一般的 F-P 型半導體雷射即可。此外由於雷射共振腔內的功率可輕易的比腔外高出上百倍，因而腔內倍頻效率可遠高於腔外倍頻效率。

這種以半導體雷射激發的小型固態雷射與一般雷射類似，其主體主要由下列四部分構成，分別是激發光源、增益介質、非線性介質及共振腔。近年來這四部分均有非常快速的發展，因而帶動了學術界及產業界之開發熱潮，使得這種雷射體積愈來愈小，生命期愈來愈長，效率也愈來愈高

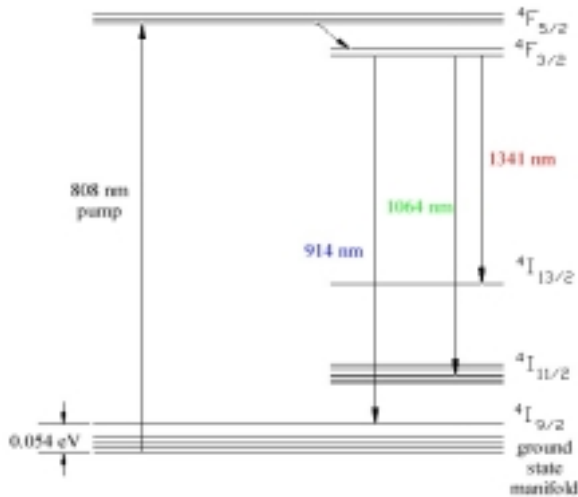
以半導體雷射激發之固態雷射，可以結合半導體雷射輕、薄、短、小的特性，及固態雷射的高品質輸出橫向、縱向模態、高峰值功率等優點。傳統的閃光燈激發固態雷射及氣體、染料雷射由於效率低、體積大、或者需要高壓、水冷，因此在許多應用領域均可由半導體雷射或以其激發之固態雷射取代。

早在 1964 年，半導體雷射激發之固態雷射就被實現，工作溫度是 4° K，可惜當時的半導體雷射技術相當不成熟且功率也低，因此，此一領域停頓了很長一段時間，直到 1980 年代後半期半導體雷射技術成熟後，才開始重新受到重視，到了 1990 年代初，商品化之高功率半導體雷射非常成熟且價格低廉，更是帶動了半導體雷射激發之固態雷射的蓬勃發展，各家公司紛紛推出各式產品已取代閃光燈或氣體雷射激發之固態雷射。目前，在固態雷射中用的最廣的釔石榴石（Yttrium Aluminum Garnet，YAG）晶體亦是在 1964 就被合成出來。在非線性的頻率轉換晶體上，亦有極大之突破，使得由可見光至 UV 光均可由頻率轉換得到。在體積非線性晶體（bulk nonlinear crystal）的發展上，近 20 年來有長足之發展，由 1976 年的 KTP 適用於綠光^[7]，到 1983 年的β-BBO^[8]，1989 年的 LBO 適用於藍光^[9]。

小型固態雷射的激發光源-高功率半導體雷射，在近年來不但在生命期及亮度上均有相當大之突破，不論三元化合物或四元無鋁化合物之活性區均可達到 1 萬小時以上之生命期，四元無鋁化合物更可達到大於 18 MW/cm² 之損害閾值，而在亮度的提昇上也有不少進展，由以往 100 微米活性區寬度可產生 1 瓦到目前的約 4 瓦。在雷射陣列（laser diode array）的發展上，也由 1 公分寬陣列出 10 瓦，到目前的約 60 瓦。在使用的半導體雷射波長上，大多是介於 630 至 1100 奈米的範圍，主要由增益介質之活性離子決定，例如：鉻（Chromium）為 670 奈米附近，釹（Neodymium）為 800 奈米附近，而鐿（Ytterbium）則為 940 奈米附近。

在紅、綠、藍全彩雷射的開發上，小型固態雷射更具有極大之優越性，以 Nd: YVO₄ 為例，如圖三

所示，只要這一種晶體，經由倍頻便可產生紅（670.5 奈米），綠（532 奈米）藍（457 奈米）三原色，



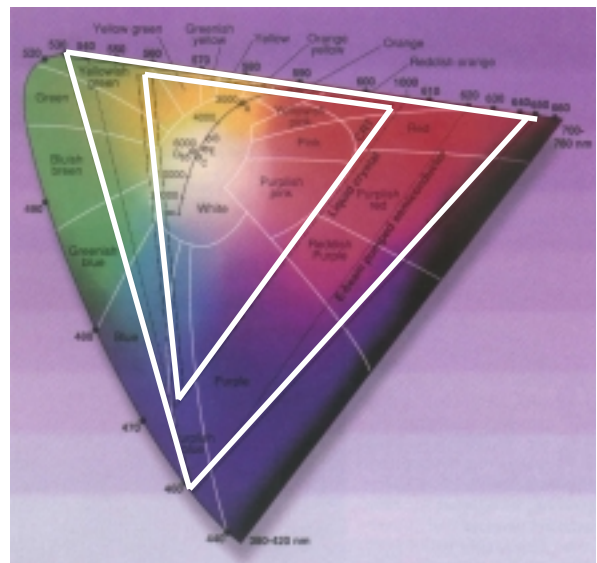
圖三：摻 釩酸 雷射晶體用以產生倍頻之紅、綠、藍三原色的能階示意圖。

且激發用的半導體雷射也只要 808 奈米一種波長，因此相當容易可經由三個發光區的雷射陣列而整合在一起，形成一小型的全彩雷射。對 40 吋以上之彩色顯示器，這種小型固態雷射不但具有較高的色彩飽和度(如圖四所示)，較高的解析度，且比起其他大螢幕顯示技術，非常具有價格上的競爭力。在紅、綠、藍全彩雷射的開發上，除了以增益介質的紅外光輸出加以腔內或腔外倍頻外，另一發展趨勢便是使用自倍頻晶體，如 Nd:YAB，Nd:YCOB，或 Nd：GdCOB，利用增益介質的的基材直接產生倍頻光，如此光學系統可簡化不少，但此類增益介質，或因生長不易，或因散熱不佳，或因 Nd 參雜濃度不易提昇，因而尚在研發材料階段，離實用化還有一段距離。

以小型固態雷射來產生紅、綠、藍三原色，其

中以藍光的部分較為困難，因為對紅光及綠光而言，均是四階雷射，而對藍光而言則是準三階雷射，使得雷射閾值較高，且需要較佳之溫控，此外晶體鍍膜也因為要同時對多個波段有特別之反射率要求而較困難。

小型固態雷射的光輸出模態佳，波長涵蓋範圍廣，峰值或平均功率大，可說是非常理想的光源，主要的缺點是價格較高，其中半導體雷射激發光源、增益介質晶體、非線性介質晶體是主要的成本來源，將固態雷射晶體抽成光纖狀，如此便可大幅節省雷射晶體材料及改善雷射技術中很難解決的散熱問題^{[10]-[12]}。

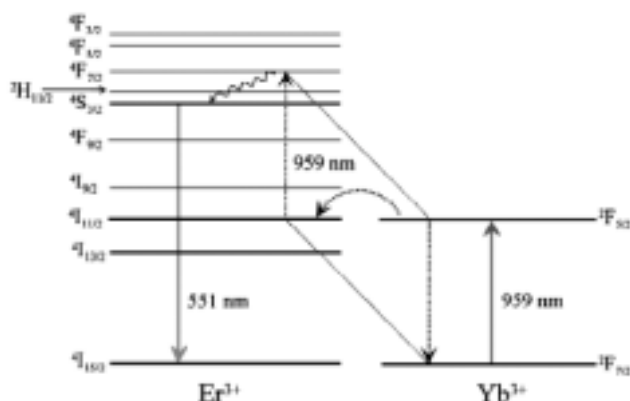


圖四：傳統電視與雷射電視之色彩飽和度比較：內三角形為陰極射線管電視所能涵蓋之色彩範圍，而外三角則為雷射電視所能涵蓋之色彩範圍。

五、上轉換雷射

顧名思義，上轉換雷射輸出頻率高於幫浦光源的頻率，有別於一般雷射的基態能階吸收，上轉換

雷射還要利用激發能階的吸收 (excited-state absorption) 至更高能階來產生雷射。以圖五為例，959 奈米之幫浦光源被 Yb^{3+} 之 $^2F_{7/2}$ 能階吸收使電子躍遷至 $^2F_{5/2}$ 能階，在經由能量轉換過程達到 Er^{3+} 之 $^4I_{11/2}$ 能階並再度吸收幫浦光源而產生至 $^4F_{7/2}$ 能階之躍遷，最後經由非輻射性的躍遷過程停留在 $^4S_{3/2}$ 長生命能階，經由共振腔的回饋產生 551 奈米之雷射。



圖五：上轉換雷射之能階躍遷示意圖。

這種雷射早在 1971 年就由貝爾實驗室首度展示綠光雷射^[13]，到了 1990 年由 Poignant 以氬離子雷射幫浦摻鈹之氟化物光纖而產生 455 及 480 奈米之藍光^[14]，之後摻鈦之氟化物光纖也被用來產生綠光雷射。很快地，到了 1995 年就由 SDL 公司(現已為 JDS Uniphase 公司所併購)以半導體雷射激發產生大於 100 毫瓦之 480 奈米之藍光^[15]。這類上轉換雷射之主材 (host material) 通常為氟化物光纖或晶體^[16]，因為其激發態能階的生命期較長，易於貯能而產生雷射，而活性離子則以鈦、鉬、釷用來產生綠光雷射，或以鈹、釷產生藍光雷射。上轉換雷射的優點它對半導體激發雷射的波長要求不高，用一般的 F-P 雷射即可，但缺點則是效率較低，且不易做的太小，長期穩定性也有待提升。

六、結語

本文介紹的幾種固態藍/綠光雷射技術，其起源大致都可追溯至 1960 至 1970 年間，歷經許許多多科學家的努力而有今日的輝煌成果，未來的發展雖不可預測，但可預期的是藍/綠光雷射的應用將逐步進入大眾的生活，或許是數位光碟、或許是雷射電視，亦或許是現在尚無法想像到的新奇應用，希望本文的介紹可做為未來有志於此的同學閱讀的起點，進入藍/綠光雷射的多彩世界。

參考文獻：

- [1] D. Hargis and A. Earman, *Laser Focus World*, **7**, 145 (1998).
- [2] H. Jones-Bey, *Laser Focus World*, **36**(1), 133 (2000).
- [3] S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers*, (1997).
- [4] Nitride News, *Compound Semiconductor*, **6**, 11 (Nov. 2000).
- [5] S. C. Tidwell, J. Seamans, and P. Roper, *Conference on Lasers and Electro-Optics*, post-deadline paper CPD25 (1997).
- [6] M. Pierrou, F. Laurell, H. Karlsson, T. Kellner, C. Czeranowsky, G. Huber, *Optics Letters*, **24**, 205 (1999).
- [7] F. C. Zumsteg, J. D. Bierlein, T. E. Gier, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4980 (1976).
- [8] 陳創天、吳柏昌、江愛東、尤桂銘、史子康、陳長章、黃清鎮、盧紹芳、唐鼎元、黃奕川、黃文、林琦，新型極性晶體 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ，中國科學院福建物質結構研究所(1983).
- [9] C. Chen, Y. Wu, A. Jiang, B. Wu, G. You, R. Li, and S. Lin, *J. Optical Society of America B*, **6**(4), 616 (1989).

- [10] H. Z. Cheng, P. L. Huang, S. L. Huang, and F. J. Kao, *Optics Letters*, **25**, 542 (2000).
- [11] S. L. Huang, W. L. Wu, and P. L. Huang, *Applied Physics Letters*, **73**(23), 3342 (1998).
- [12] S. L. Huang, F. J. Kao, H. S. Hsieh, and C. S. Hsu, *Applied Optics*, **37**(12), 2397 (1998).
- [13] L. F. Johnson and H. J. Guggenheim, *Applied Physics Letters*, **19**(2), 44 (1971).
- [14] S. G. Grubb, K. W. Bennett, R. S. Cannon, and W. F. Humer, *Electronics Letters*, **28**, 1243 (1992).
- [15] S. Sanders, R. G. Waarts, D. G. Mehuys, and D. F. Welch, *Conference on Lasers and Electro-Optics*, post deadline paper CPD23 (1995).
- [16] P. E.-A. Mobert, E. Heumann, G. Huber, and B. H. T. Chai, *Optics Letters*, **22**, 1412 (1997).