

綜觀高功率光纖雷射及其相關技術

Review of High Power Fiber Lasers and Related Technologies

翁俊仁、許巍耀、施至柔、黃升龍

Chun-Jen Weng, Wei-Yao Hsu, Jyh-Rou Sze, Sheng-Lung Huang

光纖雷射具有諸多優點，特別是在高功率輸出時仍可保持高效率、接近繞射極限之光束品質等優點，因此被美譽為 21 世紀的雷射系統。高功率單模態光纖雷射已進入千瓦功率等級 (~kW) 之里程碑，未來將繼續保持高度成長，朝 10 kW 之輸出功率邁進。本文將介紹高功率光纖雷射發展沿革、相關技術之發展，整理光纖雷射發展高功率輸出時所遭遇的挑戰及解決之道。

Fiber lasers are unique optical sources that offer a variety of advantages, especially for high efficiency and excellent beam quality at high power operation. Therefore, fiber lasers are often called the lasers of the 21st century. High power fiber lasers are entering the realm of kilowatt continuous-wave powers with diffraction limited beam quality. In this article, we review the progress of fiber laser development in terms of technology breakthrough and challenges. Potential approaches to move the fiber laser technology forward will also be discussed. It is expected that 10 kW will be obtained in the near future.

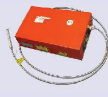



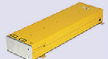
一、前言

光纖雷射具有能源轉換效率高 (high efficiency)、光束品質佳 (good beam quality)、產品輕薄短小 (compact)、營運成本低 (low running cost) 及壽命長 (long lifetime) 等優點，近來挾其先天上諸多優點快速崛起，被美譽為 21 世紀的雷射 (lasers of the 21st century)⁽¹⁾，最近十年光纖雷射之輸出功率每年成長幅度達 3 dB，亦即高功率光纖雷射以每年功率倍增之速度快速成長。由於高功率光纖雷射具備卓越的光束性能，致使其在焊接

(welding)、切割 (cutting)、標記 (marking)、鑽孔 (drilling) 及精密微細加工 (precise micro-machining) 等雷射加工應用上有近乎完美的表現。

一般常見之高功率雷射加工光源包括：光纖雷射 (fiber laser)、摻釹鈮鋁石榴石雷射 (Nd:YAG laser)、碟片雷射 (disc laser)、二氧化碳雷射 (CO₂ laser) 及高功率光纖耦合之半導體雷射 (direct diode fiber pigtailed laser)，前三者統稱為固態雷射 (solid state laser, SSL)。除了二氧化碳雷射為 10.6 μm 之中紅外線波段外，其他雷射輸出波長皆為 ~1 μm 左右之近紅外光。二氧化碳雷射主要應用於加工金

表 1.
高功率雷射性能之比較。

雷射種類	Fiber laser	Nd:YAG	Disc	Direct diode	CO ₂
特性					
能源轉換效率	~30%	~5%	~15%	~40%	~10%
CW 輸出功率	最高 50 kW	12 kW	4 kW	11 kW	20 kW
光束品質 (mm × mrad)	~5 @ 10kW	~25	~8	~250	~6
二極體壽命 (小時)	100,000	10,000	10,000	100,000	N.A.
冷卻方式	氣冷 / 水冷	水冷	水冷	氣冷 / 水冷	水冷
所佔平面空間	< 1 m ²	6 m ²	> 4 m ²	< 1 m ²	3 m ²
營運成本 (每小時台幣)	745	1,350	1240	500	850
維修頻率	很少	偶而	偶而	很少	經常

屬材料，由於加工的機制係材料吸收光波能量導致溫度升高而熔化，所以與材料的硬度無關，因此常用於鋼及鎢等高硬度金屬之切割加工，近來也廣泛應用於平面顯示器玻璃基板之切割。固態雷射光源適合應用於切割、焊接、鑽孔、刻製及標記等類型的加工，尤其是高功率之輸出，甚至逐漸取代二氧化碳雷射切割鋼、鋁板，近來也常用於陶瓷材料、印刷電路板、矽晶圓等加工。高功率光纖耦合之半導體雷射由於光束品質較差，因此大都應用於熱處理 (heat treatment)、塑膠接合 (plastic welding) 等對加工精度要求不高的應用上。關於更多高功率雷射應用資訊請參考文獻⁽²⁾ 之整理。表 1 是各種高功率雷射之性能比較⁽³⁾，從表中可看出與其他雷射相比光纖雷射具有以下之優點。

1. 高能源轉換效率：光纖雷射增益介質長度較長，具有較高的單次增益 (single pass gain)，通常摺鏡光纖雷射斜率效率 (slope efficiency) 可達 85%，整體之電光轉換效率 (electric-optical efficiency) 約在 30% 左右。
2. 高功率輸出仍可保持良好之光束品質：傳統圓柱型 (rod type) 固態雷射由於散熱不易，易產生熱致透鏡效應 (thermal lensing effect)，導致高功率輸出光束品質不佳。然而光纖雷射在 1 kW 單模態輸出時光束參數乘積 (beam parameter product) 可達 1 mm × mrad 左右，此時 M² 值約為 1.4，接

近於繞射極限，在雷射功率 10 kW 時光束參數乘積也僅約 5 mm × mrad 左右，優於其他種類之高能雷射。

3. 超高壽命：光纖雷射壽命通常決定於激發用之半導體雷射光源，若使用寬帶半導體雷射 (broad area single emitter) 作為激發光源，其壽命通常可達 100,000 小時。
4. 卓越之散熱性能：由於光纖雷射的轉換效率高，通常只有 15% 的輸入能量轉為熱，與其他固態雷射相比，光纖又具有極高之表面積對體積比 (ratio of surface-to-active volume)，因此光纖雷射易於散熱，通常只需採用氣冷 (air cooling) 方式冷卻。
5. 產品具有輕薄短小之特色：縱然光纖雷射長度較長 (通常 1–10 公尺)，然而可藉由盤繞等構裝技術，大幅縮減所佔體積，另外，由於直接使用氣冷裝置而免於搭配其他笨重之冷卻設備，因此整體體積並不太大 (平面空間 < 1 m²)，通常可用於桌上型系統 (desktop system)。
6. 低營運及維修成本：由於能源轉換效率高，可大幅節約長工作時間運轉之耗電；所需反射鏡片數較少，若使用光纖光柵作為反射鏡則不需任何外加鏡片作為共振腔，因此具備高度穩定性能。

二、光纖雷射沿革與現況

光纖雷射以其優越的性能崛起，成為近年來雷射產業應用的焦點，回顧光纖雷射的發展沿革，整理於圖 1 所示。光纖雷射首先於 1964 年由 Snitzer 等人提出⁽⁴⁾，當時使用摻釹鋇冕牌玻璃光纖 (neodymium-doped barium crown glass fiber) 作為增益介質，輸出功率約在幾毫瓦左右。等到 1970 年代克服玻璃光纖 (silica-based fiber) 高損耗的問題後^(5,6)，自此光纖雷射使用玻璃光纖作為媒介。然而光纖的核芯 (core) 很細，當時成熟的激發源係使用氣體放電燈 (lamp)，難以有效率的聚焦到核芯中，因此效率不高，仍未受到重視，導致往後的二十年間輸出功率並無大幅成長。隨著半導體雷射技術發展帶動光纖通訊產業蓬勃發展，於 1987 年由英國南安普頓大學 (University of Southampton) 及美國貝爾實驗室 (Bell Laboratories) 證明摻鉕光纖放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 的可行性⁽⁷⁾，其採用半導體雷射激發摻鉕單模態光纖對輸入光信號放大，現在這種摻鉕光纖放大器已經成為光纖通信

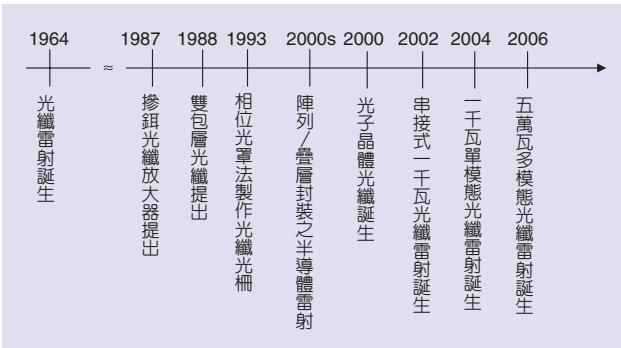


圖 1. 光纖雷射發展沿革圖。

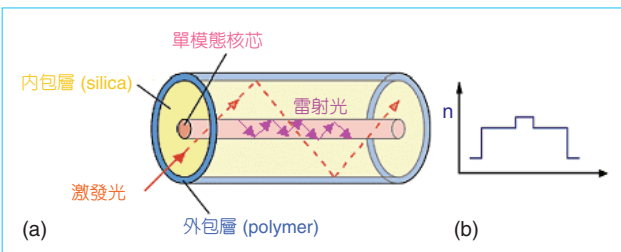


圖 2. 雙包層光纖示意圖，(a) 架構示意圖，(b) 折射率分布。

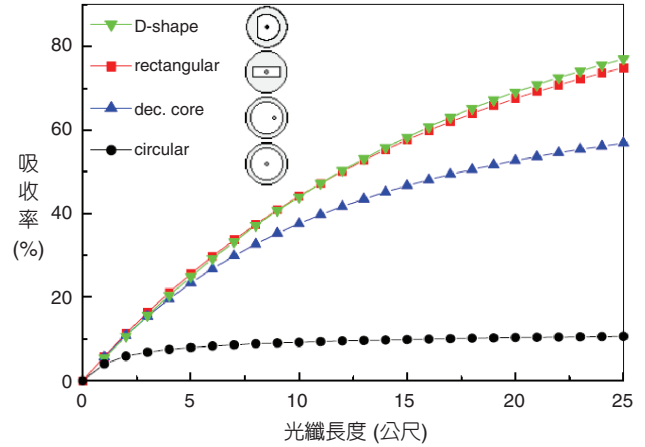


圖 3. 雙包層光纖幾種幾何外形之吸收率比較圖。

中不可缺少的重要器件。由於摻鉕光纖放大器的成功帶動了其他摻稀土元素之玻璃光纖朝向低損耗之研究，然而有效率地將半導體雷射耦合入單模態光纖之核芯 (光通訊波段一般直徑小於 $10 \mu\text{m}$)，必須使用單模態之半導體雷射，受限於單模態之半導體雷射功率僅約 1 W 輸出，使得單模態摻鉕光纖放大器難以實現高功率之輸出。

1988 年再度由 Snitzer 等人提出雙包層光纖 (double-clad fiber, DCF)⁽⁸⁾，如圖 2(a) 所示，具有兩層的包層結構，分別為玻璃材質之內包層 (inner cladding) 及高分子材質 (polymer) 之外包層 (outer cladding)，並且具有如圖 2(b) 雙階梯之折射率分布，激發光可在直徑較大的內包層 (一般約 $125 \mu\text{m}$) 內全反射傳播，經過摻稀土元素之核芯處激發出信號光 (signal) 而於核芯傳播。此種結構可以有效率將高功率多模態半導體雷射 (multi-mode LD) 耦合入內包層，提昇輸入激發光之功率，然而可保有單模態信號光之輸出。

另外，透過內包層光纖的幾何外形調整，更可以提昇激發光之吸收率 (absorption)，如圖 3 所示，分別有下列幾種外形：D 字形 (D-shape)、長方形 (rectangular)、核芯位置偏移 (decent core) 及傳統圓形 (circular)。傳統圓形內包層由於完美的對稱性，使得激發光之吸收效率不高 (通常約低於 10%)，新型態的內包層外形中以 D 字形之吸收效率最高，比傳統圓形外形內包層效率提昇 8 倍。1993 年 Hill 等人使用相位光罩法使得光纖光柵的

量產可行性大幅提昇⁽⁹⁾，使用光纖光柵作為光纖雷射的共振腔，由於光纖本身就是共振腔，無需外加其他的光學鏡片，使得光纖雷射的組裝困難度大為降低，並且由於光柵的優越選頻作用，因此可產生窄線寬、低噪聲的雷射信號。

1990 年代開始，半導體雷射激發光源不但在壽命及亮度上均有相當大的突破，不論三元化合物或四元無鉛化合物之活性區均可達到一萬小時以上之壽命，四元無鉛化合物更可達到大於 18 MW/cm^2 之損害閾值，而在亮度的提昇上也有不少進展，單顆半導體雷射 (single emitter) 由以往 $100 \mu\text{m}$ 活性區寬度可產生 1 W 到目前約 8 W。2000 年後雷射陣列 (laser diode bar) 的發展上，也由一公分寬陣列輸出 10 W，到目前高於 80 W 之輸出，如圖 4(a) 為 Bookham 公司所推出之 80 W 輸出之雷射陣列。另外透過將幾個發光區垂直疊層 (stack) 的包裝更可高達 480 W，如圖 4(b) 為 JDSU 公司推出之垂直疊層產品外形。因此使用高功率半導體雷射結合有效率的激發技術，使得光纖雷射的輸出功率得以往上攀升，於 2002 年日本 Ueda 等人利用串接多根光纖技術達成 1 kW 輸出之光纖雷射⁽¹⁰⁾。然而受到熱問題 (thermal loading)、光學損壞 (optical damage) 及非線性交互作用 (nonlinear effect) 壓抑了採用模態區域 (mode area) 較小的單模態光纖雷射的輸出功率，使用大模態區域 (large mode area, LMA) 核芯光纖及光子晶體光纖 (photonic crystal fiber, PCF) 可成功克服此類問題，有效地提昇輸出光功率。而於 2004 年英國南安普頓大學 Jeong 等人發表單根光纖一千瓦 (1 kW) 之輸出功率⁽¹¹⁾，這是高功率光纖雷射發展一個重要的里程碑。

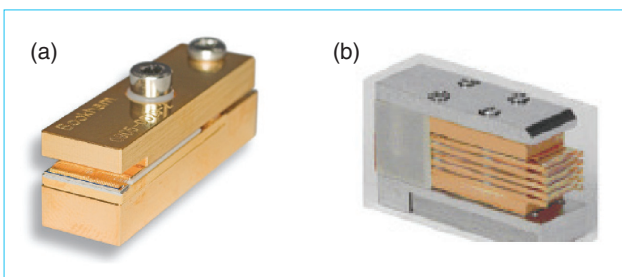


圖 4. 高功率半導體雷射光源，(a) 80 瓦陣列封裝，(b) 480 瓦垂直疊層封裝。

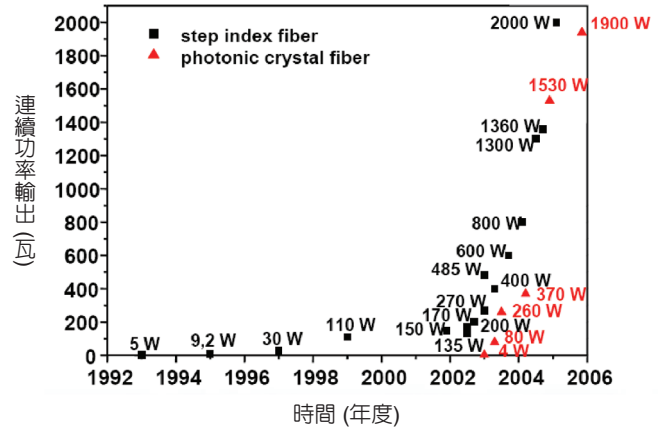


圖 5. 光纖雷射功率成長之歷史。

雙包層光纖的出現無疑是光纖雷射的一重大突破，結合近來半導體雷射功率大幅提昇及有效的激發技術，使得高功率光纖雷射得以被實現，於是展開了一場高功率光纖雷射競賽。圖 5 為光纖雷射最高連續功率成長之歷史紀錄，過去幾年以階梯式光纖 (step index fiber) 之光纖雷射幾乎以每年功率輸出倍增之速度成長，然而光子晶體光纖雷射更只花三年就已經突破 1 千瓦之輸出，未來發展動向值得注意。

以半導體雷射激發之光纖雷射，可以結合半導體雷射之輕、薄、短、小及壽命長特性，加上固態雷射的高品質輸出橫向縱向模態特性，在許多領域應用中逐漸取代傳統氣體及固態雷射。透過拉曼串接 (Raman cascading) 及頻率轉換 (frequency conversion) 等非線性效應⁽¹²⁻¹⁴⁾，使得光纖雷射幾乎可以產生從可見光到中紅外波段雷射光輸出，進一步拓展光纖雷射應用的領域。光纖雷射與一般固態雷射類似，其主體由下列三部分構成，分別是共振腔 (cavity)、激發光源 (pump light) 及增益介質 (gain medium)，圖 6 為光纖雷射架構之示意圖。光纖雷射使用高反射率鏡片 (HR coated mirror) 或光纖光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 作為共振腔，尤其使用光纖光柵作為共振腔，由於不需額外的鏡片，不需精準對準可以使得光纖雷射更為穩固。光纖雷射之激發光源使用高功率半導體雷射，波長大多是介於 800 至 980 nm 的範圍，主要由增益介質之活性離子決定，其中釹 (neodymium, Nd^{3+}) 為 808 nm、

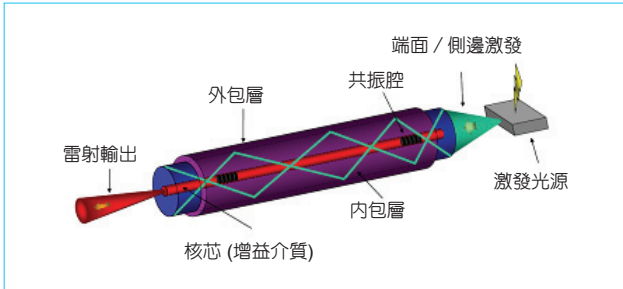


圖 6. 光纖雷射架構示意圖。

鎵 (thulium, Tm^{3+}) 為 800 nm、鐿 (ytterbium) 為 940 nm/975 nm 附近、鉕 (erbium, Er^{3+}) 則為 980 nm 附近。

光纖雷射使用摻稀土元素 (rare-earth-doped) 之玻璃光纖作為增益介質，常見摻雜之稀土元素為釹、鐿、鉕及鎵。釹離子屬於固態雷射中典型的活性介質，摻釹光纖雷射 (neodymium doped fiber laser, NDFL) 主要的發光波長 λ_g 為 1064 nm，屬於四能階雷射 (4-level operation) 系統，具有低雷射閾值 (low threshold) 之特性，目前已被成功發展出 1 kW 的功率輸出⁽¹⁰⁾。然而摻釹光纖適合的激發波段範圍卻相當窄 (吸收波長 $\lambda_p \sim 808$ nm)，導致必須使用高穩定性控溫之半導體雷射光源，且受限於自抑限制 (self-quenching limit) 無法大幅提昇釹之摻雜濃度，因此難以製作長度較長、模態區較大的核芯，以維持單模態輸出之高功率光纖雷射。另外，其量子缺陷 (quantum defect) 較大 $\lambda_p/\lambda_g = 0.76$ 。受

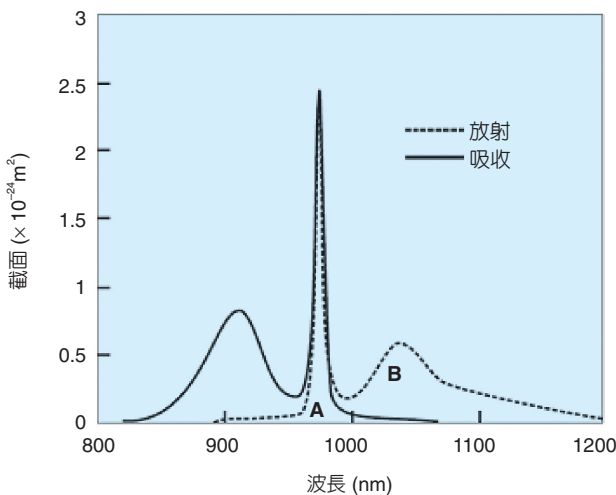


圖 7. 鐿離子摻雜於玻璃基材時之吸收與放射譜線。

限於上述原因，導致商用之摻釹高功率光纖雷射並不常見。相較之下，目前鐿離子乃為高功率光纖雷射主要之摻雜活性離子，如圖 7 為鐿離子摻雜於玻璃基材 (ytterbium doped fibers) 時之吸收與放射譜線，圖中實線代表鐿離子之吸收譜線。鐿離子具有相當寬廣的吸收光譜線，主要為 ~ 850 nm – 1 μ m，可以使用的激發光源包括 AlGaAs (800 – 850 nm) 與 InGaAs (980 nm) 半導體雷射。圖中虛線顯示鐿離子之放射頻譜具有一個寬帶之譜線，介於 0.97 – 1.2 μ m 間，常用來產生高功率光纖雷射的波長主要是 1060 nm 波段，屬於準四能階系統 (quasi-four-level system)。如圖 8 之能階示意圖，鐿離子只有一個基態 (ground state $^2F_{7/2}$) 及一個亞穩態 (metastable state $^2F_{5/2}$)，間隔約為 10000 cm^{-1} ，其他能階都屬於紫外光波段 (UV region)。由於沒有其他更高能階因此可降低多光子弛張效應 (incidence of multi-photon relaxation) 及激態吸收現象 (excited state absorption phenomenon)，所以可以提高鐿離子於玻璃基材之摻雜濃度來提升吸收效率，一般用於產生高功率光纖雷射時摻雜濃度可高達數千 ppm⁽¹¹⁾，目前單模態輸出之摻鐿光纖雷射 (ytterbium doped fiber laser, YDFL) 約可產生 2 kW。

然而，在波段 1.5 – 1.7 μ m 之間，被稱為眼睛安全波段 (eyesafe wavelength) 之高功率雷射具有許多重要應用，例如雷射雷達 (laser radar/LIDAR)、(laser vibrometry)、醫療美容 (尤其是飛梭雷射 Fraxel™ laser) 以及作為非線性頻率轉換 (nonlinear frequency conversion) 至中紅外線之起始光源。適合產生此波段的稀土元素為鉕，摻鉕光纖雷射

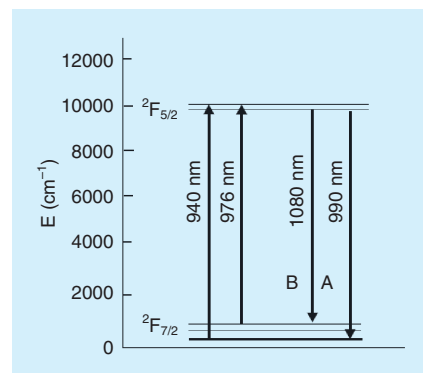


圖 8. 鐿離子摻雜於玻璃基材時之能階分布示意圖。

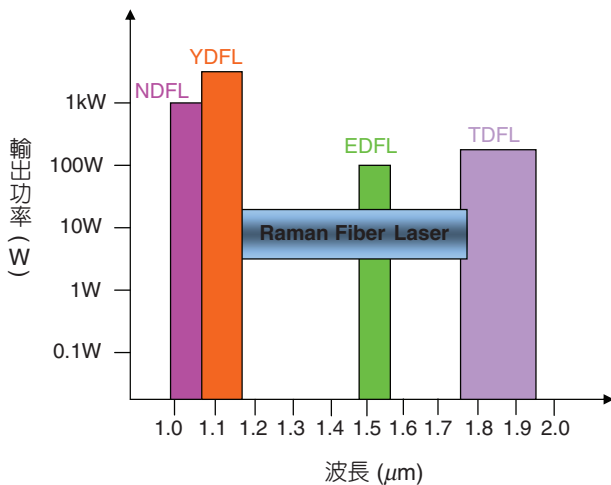


圖 9. 幾種單模光纖雷射之輸出功率比較圖。

(erbium doped fiber laser, EDFL) 一般使用 λ_p 為 980 nm 之半導體雷射作為激發光源，主要發光波段為 $\lambda_g = 1550$ nm，量子缺陷 $\lambda_p/\lambda_g = 0.63$ 導致電光轉換效率不高。另外由於聚簇傷害效應 (detrimental clustering effects)，無法於玻璃基材摻雜高濃度鉕離子，進而無法提昇吸收效率，導致摻鉕光纖雷射輸出功率不高。使用鉕-鏡共摻雜光纖 (Er:Yb co-doped fibers) 可克服此問題，鏡離子可以高度摻雜於光纖將激發光吸收，然後藉由非輻射 (non-radiation) 將能量傳遞給鉕離子，搭配共振產生 1.55 μm 波長之雷射輸出，目前共摻雜鉕-鏡光纖雷射 (Er:Yb co-doped fiber laser, EYDFL) 約可產生 100 W 之單模態雷射輸出⁽¹⁵⁾。藉由雜摻鋁之光纖雷射 (thulium doped fiber laser, TDFL) 則可產生 1.8–2.1 μm 之中紅外波段，目前的輸出功率在 150 W 之間，其他在 1–2 μm 波段則可透過拉曼光纖雷射 (Raman fiber laser, RFL) 的技術達成，輸出功率也可有高於 20 W 之輸出。將上述之分析資料整理，可得不同技術之單模態光纖雷射輸出功率圖，如圖 9 所示。就輸出功率而言，目前仍以摻鏡光纖雷射最高，因此在許多需高功率的雷射加工應用上，大都使用摻鏡光纖雷射。

國內外許多研究單位及公司已投入光纖雷射之研發，茲將主要單位整理列於表 2 中。目前高功率光纖雷射主要技術掌握在國外大廠，尤其是 IPG、SPI、JDSU、Nufen、Hamamatsu 及 Keosys 等公

司，其中以 IPG 與 SPI 為市場之領導廠商，兩間公司原先專注在光纖通訊領域，於 2000 年後轉而研發光纖雷射而成為領導者。國內部分也正積極開發光纖雷射，包括培養知識搖籃的大學如台灣大學與交通大學等正積極投入，研究單位則有儀器科技研究中心、工業技術研究院南分院與金屬工業研究發展中心等單位投入研發資源，產業則有卓越光纖等公司積極拓展光纖雷射之業務，若能透過國內產學研之積極投入並有效統合，台灣將有機會在光纖雷射世界舞臺中嶄露頭角。

三、激發技術介紹

隨著雙包層光纖之發明、高功率半導體雷射之發展，使得高功率光纖雷射得以被實現，然而如何有效地將高功率半導體雷射耦合入雙包層光纖中則是另一個重要的課題。提昇耦合效率之激發技術，可概分為兩大類：端面激發 (end pumping) 及側邊激發 (side pumping)，其架構如圖 10 之示意圖。端面激發是指激發光從端面耦合入光纖，因此最多只有兩個輸入埠 (input port, P_R, P_L)，然而側邊激發係將激發光由側邊耦合入光纖，因此側邊激發可以有許多輸入埠 (multi-port inputs, $P_{1R}/P_{1L}, P_{2R}/P_{2L}, \dots, P_{NR}/P_{NL}$)，一般輸入埠的數目由光纖的長度所決定。以下就兩大激發方式進行說明。

1. 端面激發

端面激發為最直接的激發方式，一條光纖有兩個端面，雙邊都可以成為激發輸入埠，如圖 11 為端面激發之實驗架構，為了獲得高功率之輸出，因此大都使用陣列式或層疊式封裝之高功率半導體雷

表 2. 國內外開發光纖雷射之單位。

	國內	國外
研究單位	儀科中心 工研院南分院 金屬中心	南安普頓大學 (英國) 席勒大學 (德國) 密西根大學 (美國)
大學	台大 交大	電氣通信大學 (日本) 雪梨大學 (澳洲)
產業界	卓越	IPG/SPI/JDSU/Nufen/ Hamamatsu/Keosys

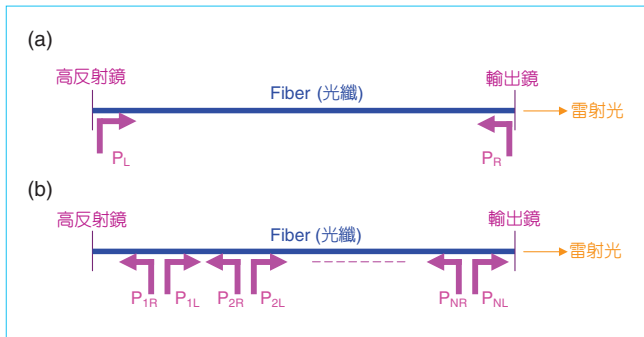


圖 10. 激發方式示意圖，(a) 端面激發，(b) 側邊激發。

射，並透過聚焦透鏡將激發光耦入雙包層光纖中。為了端面可以同時做為激發光之輸入及雷射光之輸出，必須使用雙色鏡 (dichotic mirror) 以區隔輸入輸出之雷射光。2004 年南安普頓大學已成功地展示連續式輸出功率 1.36 kW 之摻鏡光纖雷射⁽¹⁶⁾，轉換效率可達 83%，光束品質 $M^2 = 1.4$ 接近於繞射極限。使用長度 12 m、高摻鏡濃度 (~6000 ppm) 之光纖作為雷射增益介質，吸收效率約為 ~ 1.5 dB/m，為了避免非線性效應及熱破壞，因此使用 $40 \mu\text{m}$ 較大口徑核芯之設計，另外，激發光源使用一組 1.2 kW 及 0.6 kW 之 975 nm 層疊式封裝式之半導體雷射從兩側激發，耦光效率可達 90%。然而發展更高功率時，此種激發方式受限於只有兩個端面可供激發光輸入，勢必得直接提昇層疊式封裝之半導體雷射功率，因而必須加強半導體雷射的散熱，同時須搭配更大直徑的雙包層光纖，如此一來，光纖將不容易彎曲，而難以使用現有輕薄短小的封裝技術。另外，由於較多光學元件，因此在對準方面必須多著墨。由於上述的限制，導致端面激發的光纖雷射並不常見於商品化產品中。

2. 側邊激發

端面激發方式之發展主要受限於只有兩個輸入埠及有限之端面耦光區域，為了克服這些問題，遂發展出側邊激發 (side pumping) 方式。側邊激發架構具有多個輸入埠，可將激發時所產生的熱分散於整條光纖⁽¹⁷⁾，而避免端面受到高功率激發產生破壞。此種方式一般使用多組低功率半導體雷射作為激發光源，然而如何有效率地將多組激發光源耦入光纖，乃是側邊激發技術在發展高功率雷射所遭遇

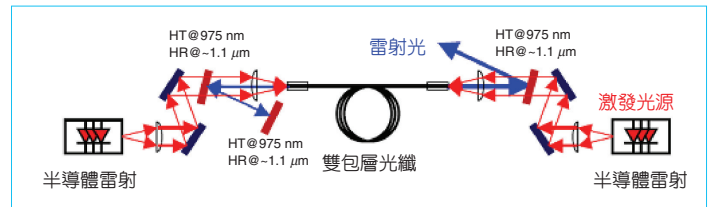


圖 11. 端面激發光纖雷射實驗架構示意圖。

的挑戰。為了克服端面激發之缺點及有效提昇耦光效率，各種側邊激發的方式便因應而生，以下就常見的方式進行說明。

(1) 光纖耦合器

光纖耦合器 (fiber coupler) 是第一個側邊激發光纖雷射的方式，也是目前商品化光纖雷射的主流之一。由於光纖通訊的高度發展，帶動光纖耦合器蓬勃發展，致使其成本降低而可大量用於光纖雷射系統中。圖 12(a) 為以光纖耦合器為基礎之側邊激發方式，首先將具有 100,000 小時長壽命之單顆寬帶半導體雷射與多模光纖對接，形成單一激發模組，然後分別將數個激發模組內之多模態光纖熔接至內包層中，由於熔接角度甚小，因此激發模組的光很容易導入內包層內，並以內全反射方式傳播，激發核芯內的稀土元素產生雷射光。就商品化產品而言，與南安普頓大學合作的 SPI 公司，使用獨創之 GTWave™ 技術，推出多款單模態高功率光纖雷射，目前輸出功率最高為 200 W⁽¹⁸⁾。IPG 公司則是這種激發方式的領導廠商，所開發之單模態光纖雷射功率可達 2 kW⁽¹⁹⁾，係透過多組光纖雷射模組連接而得，其多模態光纖雷射產品更可高達 50 kW。由於使用長壽命／免水冷之半導體雷射，因此種光纖雷射也具有壽命長與穩定性佳等優點，然而需要數目眾多的光纖激發模組以形成高功率雷射 (舉例：以 1,000 W 激發光而言，則需高達 250 組之激發模組)，因此整體系統較為複雜、昂貴，未來若能搭配高輸出功率之陣列式或層疊式半導體雷射，或許可以克服現有之難題。

(2) 內嵌式 V 溝耦合方式

1995 年由 D. J. Ripin 及 L. Goldberg 發展出內嵌式 V 溝耦合方式 (imbedded V-groove coupling,

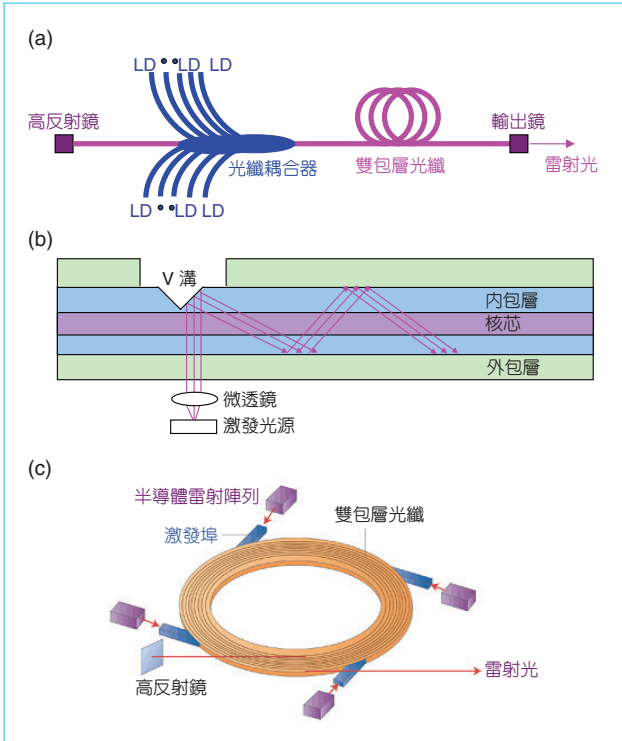


圖 12. 常見三種側面激發方式示意圖，(a) 光纖耦合器，(b) 內嵌式 V 溝耦合，(c) 光纖碟片雷射結構。

IVGC)⁽²⁰⁾，而達成 111 mW 之輸出，其架構並無需使用雙色鏡，另外，具有多個輸入埠之擴充空間。內嵌式 V 溝耦合結構如圖 12(b) 所示，使用機械研磨或二氧化碳雷射加工方式，去除內包層之玻璃後形成 90 度角度之 V 溝，深度約為 60 μm ，寬度為 120 μm ，半導體雷射透過微透鏡準直將激發光導入 V 溝，由於入射角度超過臨界角 (critical angle)，而透過無損耗之內全反射至內包層中，其效率可高達 90%。後來 Keopsys 公司以內嵌式 V 溝耦合方式為基礎，發展出所謂的 V 溝側邊激發方式 (V-groove side pumping, VSP)，透過多個 V 溝結構將多組半導體雷射耦入光纖，目前商用產品功率約為 20 W⁽²¹⁾。雖然 V 溝結構具有大於 90% 之高耦光效率、較大的誤差容忍度 (tolerance) 等優點，但目前並未開發出高於 100 W 輸出之光纖雷射。

(3) 光纖碟片雷射結構

有鑒於側邊激發方式之優越耦光性質，日本電

氣通信大學 (University of Electro-Communications) Ueda 等人於 1999 年提出光纖碟片雷射 (fiber disc laser) 結構⁽¹⁰⁾，成功地展示 240 W 之高功率光纖雷射，爾後透過串接 (cascade) 三組光纖雷射成功展示 1 kW 之光纖雷射。後來此技術由 Hamamatsu Photonics K. K. Laser Group 接手發展，其光纖碟片雷射結構如圖 12(c) 所示，將光纖環繞作一個碟片狀結構，使用上下蓋板搭配一般散熱工具，透過光子儲存環型激發 (photon storage ring pumping) 方式將各組激發光耦入碟片中，以產生高功率光纖雷射，目前光纖雷射輸出功率為 580 W，其斜率效率約為 69%，曾成功地展示切割 0.5 mm 厚度之鋼板，切割寬度為 120 μm 。光纖碟片雷射結構相當簡單而且成本低，散熱效果也相當好，然而效率較低為其主要缺點。

除了上述之主流側邊激發方式外，仍然有其他特殊的耦光技巧，包括內嵌式鏡面 (embedded mirror)⁽²²⁾ 及光柵耦光方式 (grating coupling)⁽²³⁾，這些耦光方式具有高耦光效率之特性，未來發展值得關注。雖然側邊激發方式具有高耦光效率、易於散熱等優點，由於通常必須搭配較長之光纖，因此不適合用於窄線寬 (narrow line-width) 的應用上。

四、高功率光纖雷射之挑戰

「高功率光纖雷射 (high power fiber lasers)」這一名詞係由前蘇聯 Gapontsev 等人於 1990 年提出⁽²⁴⁾，在當時高於 10 W 之輸出即稱為高功率，然而經由這幾年高功率之競賽，光纖雷射輸出功率紀錄一再被改寫，現今只有超過 100 W (甚至超過 1 kW) 輸出才稱為高功率光纖雷射。光纖雷射由於轉換效率高、具有較傳統雷射優越之散熱性質，搭配纏繞技術與散熱片 (heat sink) 整合包裝，低於 20 W 功率光纖雷射並不需特別注意散熱問題。然而光纖雷射朝超過 100 W 功率發展時，不僅存在熱破壞 (thermal damage) 問題，還必須考慮光場破壞 (optical damage) 及非線性效應 (nonlinear effect)。

高功率導致的熱破壞，會損壞鍍膜、碎裂 (fracture)，甚至於會熔掉核芯 (melting of the core)，由於外包層係由高分子材料 (polymer) 所組

成，因此熱破壞會先將外包層燒毀，如圖 13(a) 所示。然而光場破壞將導致光纖端面破裂 (fiber facet damage)，如圖 13(b) 所示，在高峰值功率之脈衝光纖雷射更容易發生端面損毀現象。由於光纖的結構中，核芯的截面積非常小 (通常直徑 $< 10 \mu\text{m}$)，如此強的光場密度將會導致強烈的非線性效應，而限制光纖雷射之輸出功率。光纖中常見的非線性效應包括自相位調變 (self-phase modulation, SPM)、受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 及受激布里恩散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS)，尤其以受激拉曼散射影響甚鉅。一般而言，只要光纖雷射功率超過 100 W 輸出時，便受限於受激拉曼散射而無法繼續提昇功率，然而 100 W ($\sim 5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$) 之功率尚不致於導致光場破壞及熱破壞，因此在發展高功率光纖雷射 (包含高峰值功率之脈衝光纖雷射)，通常必須先克服受激拉曼散射之限制。為了克服上述發展高功率光纖所遭遇的難題，各種解決方法便因應而生。

1. 尾端接續無核芯光纖

如圖 14 所示，將光纖雷射尾端接續一段無核芯光纖 (coreless fiber termination)，以便讓輸出光場得以擴束 (beam expansion) 而降低光功率密度 (optical power density)⁽²⁵⁾，如此一來即可提高光場破壞閾值 (optical damage threshold)，這是最簡單克服光場破壞的方法，廣為高功率光纖雷射使用。

2. 大模態區域光纖 (Large-Mode-Area Fiber, LMA Fiber)

解決高光場密度 (high intensity) 所導致之熱破

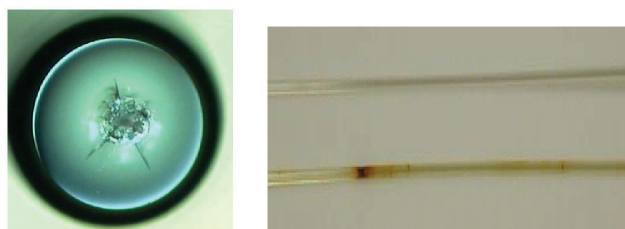


圖 13. 高功率輸出導致光纖損壞照片，(a) 端面破裂，(b) 外包層燒毀。

壞、光場破壞及非線性效應，最有效的方法就是擴大光纖的核心直徑，如此一來，光場密度就可以大為降低，同時必須降低數值孔徑 (low numerical aperture)，以保持單模態之輸出⁽²⁶⁾。透過纏繞光纖 (coiled fiber)⁽²⁷⁾、使用椎狀光纖元件 (fiber taper) 作為模態選擇 (mode selection)⁽²⁸⁾ 及控制彎曲損失 (bending loss)⁽²⁹⁾，也都可保持大核芯光纖單模態之輸出。目前使用大核芯設計之光纖雷射，已經可以產生 1.36 kW 之輸出。

3. 光子晶體光纖

隨著光子晶體光纖 (photonic crystal fiber, PCF) 技術突飛猛進，短短 4 年光子晶體光纖雷射就已經達到 1.9 kW 之輸出。光子晶體光纖結構由沿著光纖的光軸排列之多個微結構 (microstructure element) 所組成，係透過多支毛細管抽拉而得，微結構通常為空氣洞 (air hole) 組成之角形陣列 (triangular array)，因此透過排列組合可精準控制折射率之分布，控制精度可達 1×10^{-4} ，比一般的傳統階層式分布光纖小一個數量級。如圖 15 為單模態空氣包層 (air cladding) 之光子晶體光纖橫截面，六角形排列區內為核芯，外圈排列之微結構形成空氣包層，最外圍則是玻璃外包層，因此組成具有雙包層光子晶體光纖。光子晶體光纖用於高功率光纖雷射具有以下特點：(1) 容易製作單模態大核芯光纖，目前約可製作模態直徑 $60 \mu\text{m}$ 之單模態光子晶體光纖，傳統光纖僅能達 $15 \mu\text{m}$ 。(2) 空氣包層結構具有高數值孔徑，NA 值可高達 0.9 (傳統光纖 NA 僅達 0.46)，因此可增加激發光之吸收效率，減少光纖的使用長度，避免非線性效應之產生。(3) 材質皆為玻璃製成 (all glass solution)，比起傳統光纖之高分子外包層可承受更高功率。(4) 光子晶體光纖容易保持偏振輸出 (polarization maintained output)，

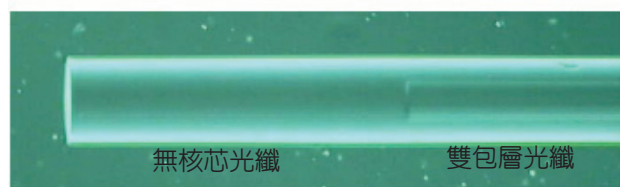


圖 14. 尾端接續無核芯光纖之照片。

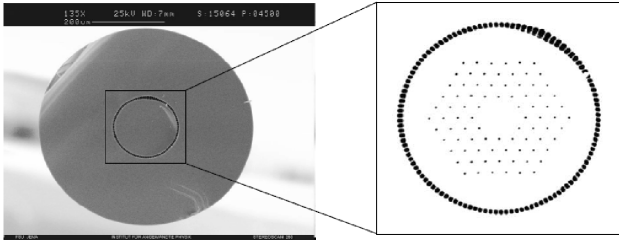


圖 15. 空氣包層之單模光子晶體光纖橫截面照片。

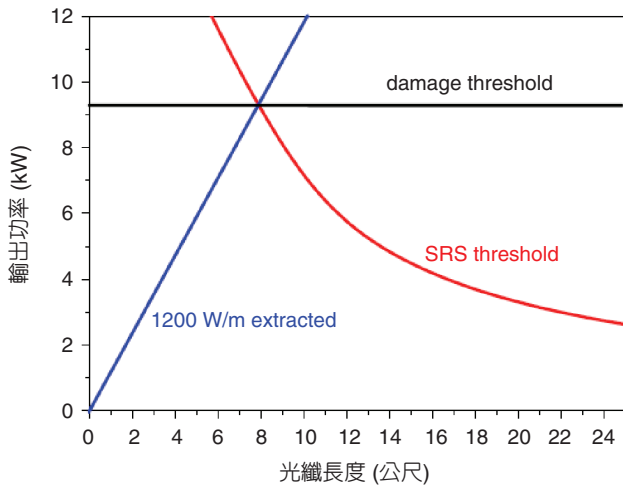


圖 16. 35 μm 模態直徑之光子晶體光纖雷射損壞功率關係圖。

不易受到環境的影響而改變偏振輸出狀態。由於光子晶體易於達成大核芯及減少光纖所需長度而抑制熱破壞、光場破壞及非線性效應產生，因此要達成高於 1 kW 輸出功率通常必須使用光子晶體光纖。

透過文獻 30 之分析，理論上單模態光纖雷射應該可以達成接近 10 kW 之功率輸出。以 35 μm 模態直徑 (mode-field diameter) 之光子晶體光纖為例，經過計算可得熱破壞、光場破壞及非線性效應 (以受激拉曼散射為例) 之臨界功率，如圖 16 所示。若要達成接近 10 kW 之輸出功率，熱破壞之臨界功率為 1200 W/m，則不可再使用氣冷方式，需改用水冷避免熱破壞。一般光場破壞臨界點約為 1 GW/cm²，當使用 35 μm 模態直徑時，約可以承受高於 9.2 kW 之輸出功率。為了避免受激拉曼散射效應，除了擴大模態直徑外，還需控制光纖的長度，要達成 10 kW 之輸出，35 μm 模態直徑之光纖長度不可超過 8 公尺。透過上述的分析，單模態光

纖雷射應該有機會挑戰 10 kW 之連續功率輸出，更高的輸出功率則必須透過光束整合技術 (beam combining) 來達成，目前已有研究團隊正在規劃 100 kW 之光纖雷射⁽³¹⁾。

五、結語

高功率光纖雷射的出現是雷射發展史上具革命性的里程碑，以其卓越的性能，在加工、醫療、雷達及測距等雷射應用中日益擴大。自從光纖雷射功率突破 10 W 等級後，自此展開高功率輸出之競賽，才歷經十年就已突破 1 kW，甚至目前已達 2 kW 之輸出，高功率光纖雷射的紀錄不斷被改寫，綜合相關文獻指出單一光纖雷射將有機會達成 10 kW 輸出，透過光束整合技術光纖雷射甚至有機挑戰 100 kW 之輸出，後續發展值得期待。

誌謝

感謝儀器科技研究中心高健薰博士與陳峰志博士所提供的寶貴經驗及協助。

參考文獻

1. J. Swiderski, A. Zajac, M. Skorczakowski, Z. Jankiewicz, and P. Konieczny, *Opto-Electron. Rev.*, **12** (2), 169 (2004).
2. 陳英靜, 陳仲宜及葉昭永, *機械工業雜誌*, **286**, 81 (2007)。
3. Martien Van Dijk, *Industrial Laser Solutions*, Jan. (2005) <http://ils.pennnet.com/>
4. E. Snitzer, *Proc. of the Third International Conference on Solid Lasers*, Paris, **999** (1963).
5. J. Stone and C.A. Burrus, *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 388 (1973).
6. J. Stone and C.A. Burrus, *Appl. Opt.*, **13**, 1256 (1974).
7. R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, *Electron. Lett.*, **23**, 1026 (1987).
8. E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, in *Proc. Opt. Fiber Sensors*, New Orleans (1988).
9. K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, *Appl. Phys. Lett.*, **62** (10), 1035 (1993).
10. K.-I. Ueda, H. Sekiguchi, and H. Kan, in *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics*, Long Beach, USA, May 19-24, (2002).
11. Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, *Electron. Lett.*, **40**, 470 (2004).
12. C. Lin and W. G. French, *Phys. Lett.*, **34**, 666 (1979).

13. V. I. Karpov, E. M. Dianov, V. M. Paramonov, O. I. Medvedkov, M. M. Bubnov, S. L. Semyonov, S. A. Vasiliev, V. N. Protopopov, O. N. Egorova, V. F. Hopin, A. N. Guryanov, M. P. Bachynski, and W. R.L. Clements, *Opt. Lett.*, **24** (13), 887 (1999).
 14. J. Nilsson, J. K. Sahu, J. N. Jang, R. Selvas, D. C. Hanna, A. B. Grudinin., in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications*, Canada:Vancouver, July 14 - 17 (2002).
 15. Y. Jeong, J. K. Sahu, D. B. S. Soh, C. A. Codemard, and J. Nilsson, *Opt. Expr.*, **30** (22), 2997 (2005).
 16. Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne, and J. Nilsson, *Opt. Express*, **12** (25), 6088 (2004).
 17. Wang Yong, Xu Chang-Qing, and Po Hong, *IEEE Photonics Techno. Lett.*, **16** (1), 63 (2004).
 18. <http://www.spilasers.com/Home.aspx>
 19. <http://www.ipgphotonics.com>
 20. D. J. Ripin and L. Goldberg, *Electron. Lett.*, **31**, 2204 (1995).
 21. <http://www.keopsys.com>
 22. J. P. Kopolow, S. W. Moore, and A. V. Kliner, *IEEE J. Quantum Electron.*, **39** (4), 529 (2003).
 23. R. Herda, A. Liem, B. Schnabel, A. Drauschke, H. Fuchs, E. Kley, H. Zellmer, and A. Tünnermann, *Electron. Lett.*, **39** (3), 276 (2003).
 24. V. P. Gapontsev and I. E. Samartsev, *OSA Proc. on Advanced Solid-State Lasers of the Topical Meeting*, Washington paper TUBS (1990).
 25. C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, J. K. Sahu, J. Nilsson, D. J. Richardson, and W. A. Clarkson, in *Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO 2001) Technical Digest*, (Optical Society of America, Washington, DC), 219 (2001).
 26. D. Taverner, D.J. Richardson, L. Dong, J. E. Caplen, K. Williams, and R.V. Penty, *Opt. Lett.*, **22**, 378 (1997).
 27. W. A. Clarkson, L. J. Cooper, P. Wang, R. B. Williams, J. K. Sahu, *Trends in Optics and Photonics*, **83**, 261 (2003).
 28. J. A. Alvarez-Chavez, A. B. Grudinin, J. Nilsson, P. W. Turner, and W. A. Clarkson, *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest*, 247 (1999).
 29. J. Sakai and T. Kimura, *Appl. Opt.* **17**, 1499 (1978).
 30. Fiber Based High Power Laser Systems, <http://www.rp-photonics.com/highpowerfiberlasers.pdf>
 31. www.crystal-fibre.com
-
- 翁俊仁先生為國立中山大學光電工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 許巍耀先生為國立中正大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 施至柔先生為國立交通大學光電工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 黃升龍先生為美國馬里蘭大學電機工程博士，現任國立台灣大學光電工程研究所暨電機工程學系教授。
 - Chun-Jen Weng received his M.S. in electro-optical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Wei-Yao Hsu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chung Cheng University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Jyh-Rou Sze received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Sheng-Lung Huang received his Ph.D. in electrical engineering from the University of Maryland, USA. He is currently a professor in the Graduate Institute of Electro-Optical Engineering and Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.