

邁向及超越十萬瓦級的高亮度連續波雷射系統與技術

High-brightness Continuous-wave Laser Systems and Technologies Toward and Beyond 100 kW

吳小華

Hsiao-Hua Wu

本文介紹可望達成及超越十萬瓦級的高亮度連續波雷射系統與技術。包括頻譜合束光纖雷射、同調合束光纖雷射、分散式增益固態雷射、及二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射。十萬瓦級以上的雷射系統可應用於火箭、火炮、無人機、或甚至飛彈等侵入威脅時的防禦與反制。亦可作為車輛、船艦、飛行器之結構板材的鑽孔、切割、與焊接等加工用途。期盼透過本文高功率與高亮度連續波雷射系統與技術研發的工作能引起政府與各界人士更多關注與支持並在不久的未來可以看到國人自製十萬瓦級雷射出現在臺灣。也期許本文在誘發更多相關文章的報導中扮演拋磚引玉的作用。

This article reviews systems and technologies with the potential to achieve—and surpass—the 100-kW class in high-brightness continuous-wave (CW) lasers. The approaches considered include spectral and coherent beam combining of fiber lasers, distributed-gain solid-state architectures, and diode-pumped alkali vapor lasers. Such 100-kW-class systems have prospective applications in defense against rockets, artillery, unmanned aerial vehicles, and missiles, as well as in industrial processing tasks such as drilling, cutting, and welding of structural panels for vehicles, ships, and aircraft. The aim is to encourage greater attention and support from government and industry for research and development on high-brightness, high-power CW lasers in Taiwan, with the goal of realizing domestically produced 100-kW-class systems in the near future. The article also seeks to catalyze further technical reporting and discourse in this field.

一、前言

自 1960 年雷射首度問世⁽¹⁾之後，與其相關的課題即不斷地推陳出新，包含新的雷射系統與技術、新的衍生科技、與新的應用。由於雷射光迥異於傳統光的某些性質—如極佳的方向性、相對高的譜亮度 (單位頻寬，單位立體角，及單位面積的功率)、與特有的同調性—雷射甚至以極富想像力的形像出現在科幻電影^(2, 3) 中。然而，在雷射科技不斷地進展之下，部

分電影中的情節正越來越可能出現在真實的世界裡。例如，以極高功率與高亮度的雷射來摧毀飛行載具或對厚金屬進行鑽孔及切割。本文將選擇四種可望達成及超越十萬瓦級的雷射系統與技術做簡單的介紹。這些系統與技術包括頻譜合束光纖雷射⁽⁴⁾、同調合束光纖雷射⁽⁵⁾、分散式增益固態雷射⁽⁶⁾、及二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射⁽⁷⁾。美國洛克希德馬丁公司、nLight Photonic 及諾斯羅普格魯曼公司、通用原子及波音公司、與勞倫斯利佛摩國家實驗室已分別利用上述系統與技術，研發邁向及超越十萬瓦級的雷射光源。

二、功率與亮度

以雷射光對金屬進行鑽孔及切割時，需具有足夠的強度（單位面積的功率）。如此，才能夠提升照射區域的溫度並將其熔解。一功率為 P ，光腰半徑為 r ，遠場發散半角為 θ 的準直雷射光束，『由於雷射光束經光學系統轉換後光腰半徑（此處為 ω_0 ）與遠場發散半角（此處為 ϕ ）的乘積「亦稱為光束參數乘積（beam propagation product, BPP）」為不變量即 $BPP = r \times \theta = \omega_0 \times \phi$ 』，經透鏡（焦距為 f ，近軸聚焦半角 $\phi \approx r/f$ ）聚焦後的光強度 $I \propto P/\omega_0^2 = P/((BPP)^2/\phi^2) \propto B\phi^2$ ，其中 $B \propto P/(BPP)^2$ 定義為雷射光束的亮度。因此，一給定聚焦角的光學系統聚焦後的光強度與準直雷射光束的亮度成正比。也就是說光源的亮度（不只是功率）決定雷射光束經光學系統聚焦後可達成的強度。而亮度與功率成正比，與光束參數乘積的平方成反比。所以，讓光束參數乘積變小即可提高雷射光束的亮度。基橫模雷射所產生的高斯光束（Gaussian beam），可達到接近繞射極限的光束品質，且具有最小的光束參數乘積 $BPP = \lambda/\pi$ ，其中 λ 為波長。也是提高雷射功率外，另一個雷射研製時所追求的目標與挑戰。

三、頻譜合束光纖雷射⁽⁸⁾

光纖雷射具有好的光束品質，高的增益與轉換效率以及長的熱負載分佈等優質特性，故常被列入高功率與高亮度雷射系統選擇時的優先考量名單。惟當光纖雷射的輸出功率，邁向萬瓦級的過程中，許多物理效應所產生的限制即陸續出現。這些效應約略可分為四類：非線性效應、散熱問題、光學損壞、與泵浦功率極限。其中，非線性效應包括受激布理淵散射（Brillouin scattering）、受激拉曼散射（Stimulated Raman Scattering, SRS）、自我相位調變、自我聚焦、四波混頻、橫模不穩定等效應。在連續波光纖雷射中，受激布理淵散射、受激拉曼散射、及橫模不穩定為造成功率上限及光束品質惡化最主要的效應。而緩解受激布理淵散射效應的主要方法，為藉由外部相位調變來增加雷射頻譜線寬^(9, 10)。縮短光纖長度與增加有效光纖模場面積⁽¹¹⁾ 則為壓制受激拉曼散射的常用方法。橫模不穩定可以降低增益光纖摻鏡濃度、增長光纖長度、及減少光纖數值孔徑⁽¹²⁾ 來緩解。事實上早期單纖衣光纖雷射的輸出功率受限於泵浦雷射的亮度與功率，只能操作在數瓦等級。高亮度雷射二極體及雙纖衣光纖的引用，推昇 2013 年連續波多模光纖雷射系統的輸出功率達十萬瓦⁽¹³⁾，及 2021 年連續波單模光纖雷射的輸出功率達六千瓦⁽¹⁴⁾。此外，2013 年報導了利用 1018 奈米波長的光纖雷射對摻鏡光纖進行同帶協力泵浦（tandem pumping）⁽¹⁵⁾，在連續波單模光纖雷射產生兩萬瓦的輸出功率。理論分析⁽¹⁶⁾ 預測，由於非線性效應和散熱問題的限制，使得雷射二極體泵浦連續波單模光纖雷射的輸出功率上限約為二萬八千至三萬八千瓦。而協力泵浦連續波單模光纖雷射的輸出功率上限約為三萬五千至五萬二千瓦。無論如何，目前單一連續波單模光纖雷射的輸

出功率尚難達到十萬瓦等級。利用多個單模光纖雷射合束，便成為在連續波操作下達成及超越十萬瓦級高亮度及高輸出功率的解方。

合束技術可分為非同調合束及同調合束兩類技術。非同調雷射合束包含空間並排合束，被動元件合束，與頻譜合束等技術。因前兩種技術難以同時達成高功率與高光束品質，本文將著重於後一種技術的介紹。頻譜合束技術，其基本構思是把原本不同波長且在空間中分開的多道光束以不同角度入射到分波元件，再利用分波元件使這些光束在近場與遠場皆重合為一道光束 (相當於反向分波多工)，而達到提昇雷射輸出功率，同時保有接近單一雷射光束品質的效果。常用的分波元件包括：色散元件 (如繞射光柵與稜鏡) 與振幅分割元件 (如雙色片、邊緣濾波器、以及體積布拉格光柵 (volume Bragg gratings, VBG's))。圖 1 為利用繞射光柵作為分波元件的合束系統示意圖。頻譜合束技術，分為開迴路與閉迴路兩種實施方式。圖 1 所示為開迴路方式。此方式須先將各個雷射鎖定在適當波長，再經繞射光柵進行合束。閉迴路方式則利用光束轉換元件、繞射光柵、外加輸出耦合鏡組成雷射外共振腔，可同時完成波長鎖定與合束的工作。

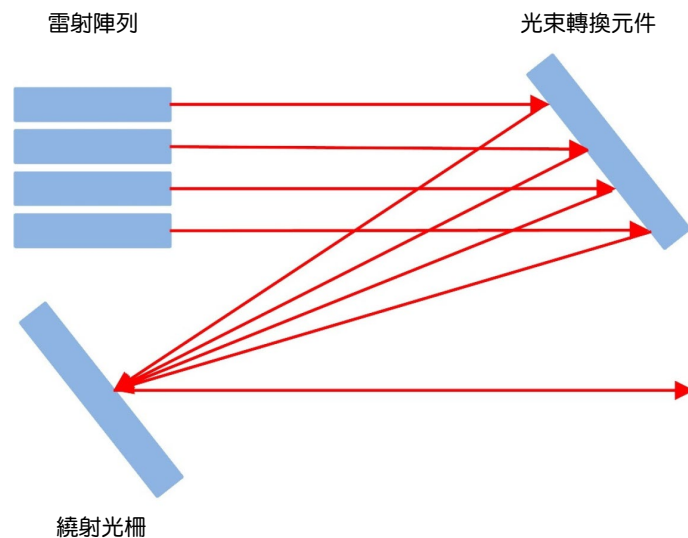


圖 1. 利用反射式繞射光柵作為分波元件的合束系統示意圖。

頻譜合束技術通過增加合束雷射的數目來提高系統的功率與亮度。其優點為結構簡單，不會產生同調合束的旁瓣現象，同時光束主瓣效率高。缺點為對參與合束的雷射波長及譜線寬有嚴格的要求。另外，受到頻帶寬度的限制，存在功率放大的上限。2016 年，洛克希德馬丁公司實現了 96 路的密集頻譜合束，達成總功率三萬瓦⁽¹⁷⁾ 的雷射輸出。2017 年驗證了六萬瓦的光纖雷射樣機⁽¹⁸⁾。2018 年取得發展十萬瓦級雷射系統的合約⁽¹⁹⁾。

四、同調合束光纖雷射⁽²⁰⁾

同調合束技術意味著參與合束的所有雷射放大器之間須保持極佳的同調 (相位) 關係。其中，相位關係的維持可分為被動與主動方式。被動方式在合束數目增加時相位關係會隨之越來越難以維持，導致合束後的光束品質惡化。因此本文只討論主動相位控制方式。此方式

通常使用同一種子雷射源。以分光器將其輸出分成數道光束。每道光束形成一通道。每路通道含有可變光學延遲器、相位調變器以及放大器。再經由合束器進行合束。並在適當位置監測合束結果。此結果回饋至控制系統以控制每一通道的光學延遲量與相位。直到獲得最佳合束結果。圖 2 為同調合束系統示意圖。

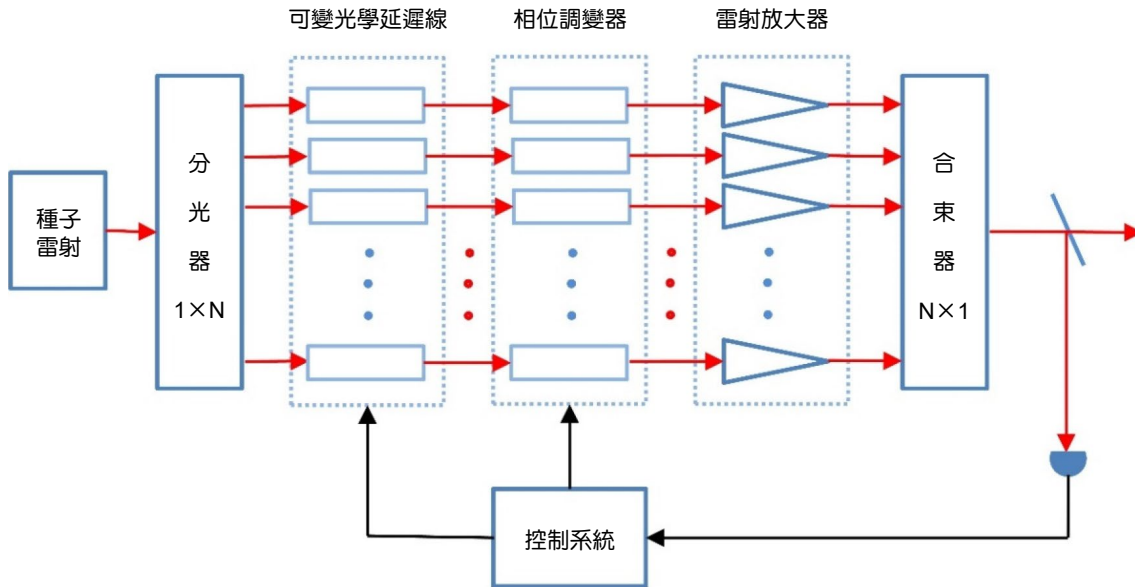


圖 2. 同調合束系統示意圖。

同調合束技術依其合束方式的不同可分為分孔徑 (tiled aperture) 合束與共孔徑 (filled aperture) 合束。分孔徑合束中，各別雷射光束由不同孔徑輸出。在近場各路光束不重疊。在遠場則合成一道光束。優點為不須合束元件，且遠場強度分佈圖案中主瓣直徑可能小於單一雷射遠場光束直徑。缺點為合束效率 (合束功率與參與合束的各個雷射功率和的比值) 受孔徑填充因子 (合束光束總面積與各個雷射光束面積和的比值) 的影響。共孔徑合束中，各個雷射光束由相同孔徑輸出。在近場及遠場皆重疊為一道光束。優點為合束效率不受孔徑填充因子的影響。缺點為須利用合束元件進行合束，合束元件可承受的功率限制其所能輸出的最大功率。常見的合束元件包括強度分光鏡、偏振分光鏡、薄膜偏振片、繞射光學元件、與分段反射率面鏡。同調合束的關鍵技術為主動相位控制方法。主要的方法包括 Hansch-Couillaud (HC) 探測法⁽²¹⁾、目標優化演算法⁽²²⁾、光學外差探測法⁽²³⁾、頻率抖動法⁽²⁴⁾、相位強度映射法⁽²⁵⁾ 等。

同調合束技術的特點為可藉由增加合束雷射的數目來提高系統的功率，同時維持光束品質，理論上無功率上限。惟同調合束需精確控制參與合束雷射之相位、線寬、與偏振。在參與合束數目增加時，相位控制的複雜度與調節難度隨之增加。其主瓣合束效率與功率還受孔徑填充因子 (分孔徑合束) 或合束元件之最大可承受功率 (共孔徑合束) 等因素的影響或限制。因此，雖然同調合束數目雖在 2021 年已達 100 個光束⁽²⁶⁾，2023 年達 1000 個光束⁽²⁷⁾。但見諸於科學文獻的同調合束功率，於相同期間仍止步於兩萬瓦內⁽²⁸⁾。惟網頁及新聞報導中，已分別實現或驗證了利用同調合束技術達成十二萬瓦⁽²⁹⁾ 及三十萬瓦⁽³⁰⁾ 的輸出功率。其發展前景仍值得期待。

五、分散式增益固態雷射⁽⁶⁾

高功率連續波固態雷射所面臨的一個重大的挑戰就是熱效應的問題。分散式增益固態雷射將多個增益介質並排置於折射率匹配的冷卻液體當中，雷射光束則串聯通過每一個增益介質。如此相當於具有一個相當厚的增益介質，同時又有很短的熱傳導路徑。因此可以大幅改善散熱效果同時提升輸出功率。

分散式增益固態雷射具有較其他雷射系統低的體積功率比 (產生單位功率所需的體積)。但是適當的折射率匹配冷卻液體很難調配製作。設計維持穩定光學性能的冷卻液體循環系統也是極具挑戰的工作。

美國通用原子公司於 2019 年 10 月演示了以分散式增益固態雷射產生十萬瓦的輸出，並於 2020 年 4 月獲得開發三十萬瓦級原型雷射的合約^(31, 32)。值得一提的是，尚有其他方法可以改善固態雷射的散熱問題。如數百微米厚度的薄片固態雷射⁽³³⁾，亦提供很短的熱傳導路徑。結合多重路徑泵浦光學模組及多重路徑雷射共振腔，可有效提升吸收長度與增益體積，進而獲得高輸出功率。

六、二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射⁽³⁴⁾

氣體雷射具有接近繞射極限的絕佳光束品質，因此成為高功率與高亮度連續波雷射的熱門選項。而鹼金屬蒸氣雷射更有低量子虧損 (泵浦光子與雷射光子的能量差與泵浦光子能量的百分比值，見表 1) 的優點。傳統氣體雷射由於吸收頻譜線寬極窄，通常不會採用光學方式泵浦。近年來，利用體積布拉格光柵對高功率二極體雷射進行波長鎖定與線寬窄化，使得高效率、高功率、高亮度的二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射得以實現。

表 1. 鹼金屬原子雙線結構躍遷波長比較。

鹼金屬原子	雷射波長	泵浦波長	量子虧損
鈉	590 奈米	589 奈米	0.1%
鉀	770 奈米	767 奈米	0.4%
銣	795 奈米	780 奈米	1.8%
銻	895 奈米	852 奈米	4.7%

圖 3 為二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射的示意圖。其組成包括增益介質、光學共振腔、與泵浦雷射。圖中增益介質為鹼金屬 (如鈉、鉀、銣、銻) 蒸氣，這些元素可藉由加熱到 100 °C 至 200 °C 使其蒸發。另外加入約一大氣壓的氬作為緩衝氣體。它扮演了兩種角色，其一為藉由碰撞增寬作用，使鹼金屬原子的吸收譜線變寬，以匹配泵浦二極體雷射的譜線寬度。另一為使鹼金屬原子的兩個上能階易於藉由碰撞能量交換進行狀態移轉 (混波)。但是，對於銣與銻原子而言氬所造成的混波效果較差。在此情況下，可將輕的碳氫氣體如甲烷加入緩衝氣體中。

大部分的泵浦光是沿著軸向進入增益介質，使其能量分佈與共振腔模盡可能重疊。對於具有大量二極體雷射模組的大型系統，也可以採用側向泵浦。由於二極體雷射約數奈米的寬振盪頻寬，通常無法用來泵浦氣體雷射。但藉由特殊共振腔的設計，可使二極體雷射的振盪

頻寬縮減為零點一奈米或更窄。其中以體積布拉格光柵為反射器，將其結合至二極體雷射模組中，可有效地降低頻寬。體積布拉格光柵耦合二極體雷射已成為當前鹼金屬蒸氣雷射最常見的泵浦光源。

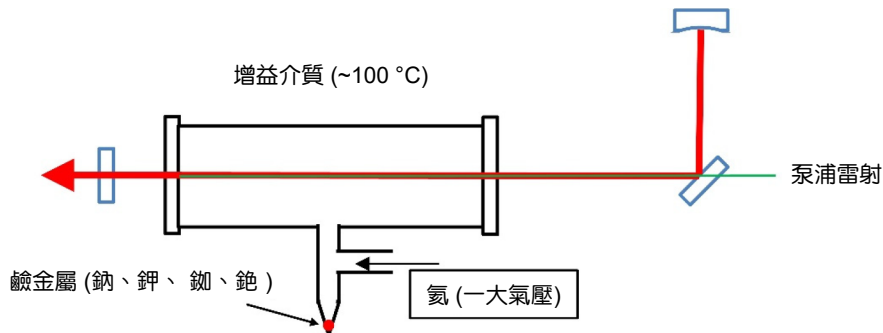


圖 3. 鹼金屬蒸氣雷射示意圖。

2003 年 Krupke 等人報導了第一個鹼金屬鉀蒸氣雷射⁽³⁵⁾。泵浦源為連續波摻鈦藍寶石雷射，輸出功率僅 30 毫瓦。由於相關研究迅速進展，在 2010 年，輸出功率已達 140 瓦。自此開始，一些國家的國防當局開始考慮以二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射作為直接能量武器的可能性。目前，美國勞倫斯利佛摩國家實驗室已發展出輸出功率高達 3 萬瓦的二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射⁽³⁶⁾。

最後，要特別說明的是本文所介紹的雷射系統皆以半導體雷射為泵浦源。半導體雷射具有體積小、效率高、可大量製造、成本低等優點。目前，一些研發單位已具備製造千瓦等級半導體雷射模組的能力。惟半導體雷射最大的缺點為比其他雷射相對差的光束品質。因此，直接半導體雷射系統雖可獲得極高功率，其光束品質仍無法和其他雷射比擬。雖然有面射型半導體雷射等新發展的技術可提升光束品質，然而其輸出功率仍有待提升。本文所介紹的高亮度高功率雷射系統皆以半導體雷射為泵浦源，藉由該雷射系統的特性轉換為高光束品質的雷射光。臺灣具有世界頂尖的半導體製造技術與能力。因而具備製造高功率半導體雷射與發展本文所述高亮度高功率雷射系統與技術的潛力。

七、結語

本文簡略的介紹包含頻譜合束光纖雷射、同調合束光纖雷射、分散式增益固態雷射、及二極體雷射泵浦鹼金屬蒸氣雷射等，可望達成及超越十萬瓦級的高亮度連續波雷射系統與技術。綜觀世界各國在這些雷射系統與技術的研發工作，幾乎都是在獲得國家大力資助之下，才有所進展。目前，我國尚未能自主研發出可達成及超越萬瓦級的高亮度連續波雷射系統與技術。因此，欲自主研發十萬瓦級的高亮度連續波雷射系統與技術，有賴國內產官學研各界通力合作，並在政府鼎力支持之下或有所進展，這也是發表本文的初衷與期盼。

參考文獻

1. T. H. Maiman, *Nature*, **187** (4736), 493 (1960).
2. Please refer to the James Bond movie: Goldfinger (1964).
3. Please refer to the American science fiction comedy film: Real Genius (1985).

4. C.C. Cook and T.Y. Fan, "Spectral Beam Combining of Yb Doped Fiber Lasers in an External Cavity," OSA Trends in Optics and Photonics Series, *Advanced Solid State Lasers*, **26**, M.M. Fejer, H. Injeyan, and U. Keller, eds. Washington, D.C.: Optical Society of America (1999).
5. C.X. Yu, S.J. Augst, S.M. Redmond, K.C. Goldizen, D.V. Murphy, A. Sanchez-Rubio, and T.Y. Fan, *Optics Letters*, **36** (14), 2686 (2011).
6. Michael D. Perry, Paul S. Banks, Jason Zweiback, Robert W. Schleicher, Jr., "Laser containing a distributed gain medium," US6937629 (2005).
7. J. Zweiback, A. Komashko and W. F. Krupke, **7581**, Proc. SPIE, High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications IV, 75810G (2010).
8. Man Jiang, Pengfei Ma, Rongtao Su, Can Li, *Infrared and Laser Engineering*, **49** (12), 20201053 (2020).
9. Angel Flores, Craig Robin, Ann Lanari, and Iyad Dajani, *Optics Express*, **22** (15), 17735 (2014).
10. Yifeng Yang, Binglin Li, Meizhong Liu, Xuchen Huang, Yutong Feng, Dan Cheng, Bing He, Jun Zhou, and Johan Nilsson, *Optics Express*, **29** (11), 16781 (2021).
11. F. Beier, C. Hupel, S. Kuhn, S. Hein, J. Nold, F. Proske, B. Sattler, A. Liem, C. Jauregui, J. Limpert, N. Haarlammer, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, *Optics Express*, **25** (13), 14892 (2017).
12. F. Beier, C. Hupel, J. Nold, S. Kuhn, S. Hein, J. Ihring, B. Sattler, N. Haarlammer, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, *Optics Express*, **24** (6), 6011 (2016).
13. E.A. Shcherbakov, V.V. Fomin, A.A. Abramov, A.A. Ferin, D.V. Mochalov, V.P. Gapontsev, Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser. In Proceedings of the Advanced Solid-State Lasers Congress, OSA, Paris, France, 5, AT4A.2 (2013).
14. B. Yang, P. Wang, H. Zhang, X. Xi, C. Shi, X. Wang, X. Xu, *Optics Express*, **29** (17), 26366 (2021).
15. B. Shiner, The Impact of Fiber Laser Technology on the World Wide Material Processing Market. In Proceedings of the CLEO, OSA, San Jose, CA, USA, AF2J.1 (2013).
16. Michalis N. Zervas, *Optics Express*, **27** (13), 19019 (2019).
17. Eric Honea, Robert S. Afzal, Matthias Savage-Leuchs, Jason Henrie, Khush Brar, Nathan Kurz, Don Jander, Neil Gitkind, Dan Hu, Craig Robin, Andrew M. Jones, Ravi Kasinadhuni, and Richard Humphreys, *Proc. SPIE*, 9730, Components and Packaging for Laser Systems II, 97300Y (2016).
18. Lockheed Martin to Deliver World Record-Setting 60kW Laser to U.S. Army. (2017). Please refer to the website: <https://news.lockheedmartin.com/2017-03-16-Lockheed-Martin-to-Deliver-World-Record-Setting-60kW-Laser-to-U-S-Army>.
19. Team Dynetics Receives Contract for Next Phase of 100 KW-Class Laser Weapon System for U.S. Army (2018). Please refer to the website: <https://news.lockheedmartin.com/2018-08-06-Team-Dynetics-Receives-Contract-for-Next-Phase-of-100-kW-Class-Laser-Weapon-System-for-U-S-Army>.
20. H. Fathi, M. Närhi, and R. Gumenyuk, *Photonics*, **8** (12), 566 (2021).
21. Hansch, T.W.; Couillaud, B., *Optics Communications*, **35** (3), 441 (1980).
22. P. Zhou, Z. Liu, X. Wang, Y. Ma, H. Ma, X. Xu, S. Guo, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **15** (2), 248 (2009).
23. Anderegg, J., Brosnan, S., Cheung, E., Epp, P., Hammons, D., Komine, H., Weber, M., and Wickham, M. Coherently coupled high-power fiber arrays, in *Fiber Lasers III: Technology, Systems, and Applications*, Proceedings of SPIE (eds A.J. Brown, J. Nilsson, D.J. Harter, and A. Tünnermann), Society of Photo Optical, 61020U-1 (2006).
24. X. Tang, Z. Huang, D. Zhang, X. Wang, J. Li, C. Liu, *Optics Communications*, **321**, 198 (2014).
25. D. Kabeya, V. Kermene, M. Fabert, J. Benoist, A. Desfarges-Berthelemy, *Optics Express*, **23**, 31059 (2015).
26. H. Chang, Q. Chang, T. Hou, R. Su, P. Ma, J. Wu, Y. Ma, and P. Zhou, "Coherent beam combining of more than 100 fiber lasers," in *Laser Congress (2020) (ASSL, LAC)*, P. Schunemann, C. Saraceno, S. Mirov, S. Taccheo, J. Nilsson, A. Petersen, D. Mordaunt, and J. Trubola, eds., OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper ATu4A.7.
27. 常琦, 高志強, 鄧宇, 任帥, 馬鵬飛, 栗榮濤, 馬閻星, 周樸, 中國鐳射, **50** (6), 0616001-1 (2023).
28. 吳堅, 馬閻星, 馬鵬飛, 栗榮濤, 李燦, 董曼, 常洪祥, 任帥, 常琦, 王濤, 任博, 周樸, 紅外與鐳射工程, **50** (9), 20210621-1 (2021).
29. Civan, Data Sheet, DBL 12 120kW. DBL 12 120kW data sheet Aug 2024.pdf.
30. Boost for nLight with big defense order. (2023-04-08). Please refer to the website: <https://optics.org/news/14/5/1>
31. Karr, Thomas, and James Trebes, *Physics Today*, **77** (1), 32 (2024).
32. Please refer to the website: <https://www.ga.com/GA-EMS> and Boeing Team to Develop 300kW-class HELWS Prototype for US Army | General Atomics

33. Simon Nagel, Bernd Metzger, Dominik Bauer, Johanna Dominik, Tina Gottwald, Vincent Kuhn, Alexander Killi, Thomas Dekorsy, and Sven-Silvius Schad, *Optics Letters*, **46**, 965 (2021).
34. Masamori Endo, Hiroki Nagaoka & Fumio Wani, *Optical and Quantum Electronics*, **54**, 363 (2022).
35. Krupke, W.F., Beach, R.J., Kanz, V.K., Payne, S.A., *Optics Letters*, **28** (23), 2336 (2003).
36. Approaches for technology transfer of diode pumped alkali laser (DPAL) technology to industry [EB/OL]. [2023-05-05]. Please refer to the website: <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/approaches-for-technology-transfer-of-diode-pumped-alkali-laser-dpal-technology-to-industry> ousdrandeddpalrfi2020.

作者簡介

吳小華為國立陽明交通大學光電工程研究所博士，2022 年自東海大學應用物理學系退休，現為騰銑鐳射股份有限公司顧問。

Hsiao-Hua Wu received his Ph.D. in Electro-Optical Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He retired from Department of Applied Physics, Tunghai University in 2022 and is currently a Consultant in Turning Point Laser Corp.