

超寬頻摻鉻晶體光纖放大器

Super Wideband Chromium Doped Fiber Amplifier

黃光瑤、陳建誠、羅家堯、黃升龍

Kuang-Yao Huang, Jian-Cheng Chen, Chia-Yao Lo, Sheng-Lung Huang

摻鉻鈮鋁石榴石 ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$) 因可產生很強的近紅外光自發輻射光源 ($1.2-1.6 \mu\text{m}$)，其範圍剛好涵蓋整個無水光纖 (dry fiber) 低損耗窗口之波段，如此寬頻的特性將使多波段元件的製造更具方便性、彈性及簡易性，同時可大幅降低所需成本，對於擴展光通訊市場，極具發展潛力。本文將介紹以共同提拉雷射加熱基座生長法生長之雙纖衣 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶體光纖，研製超寬頻光放大器並量測其材料特性及增益。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ can generate strong infrared emission from $1.2-1.6 \mu\text{m}$, which just covers the low-loss window of the so-called dry optical fiber. Such super wideband characteristics will facilitate the cost reduction for multi-wavelength devices as well as making them have more flexibility. In this article, we will introduce the development of super wideband optical amplifier using the double-clad $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal fiber, which is made by a co-drawing laser heated pedestal growth method. Its material properties as well as optical gain will be characterized.

一、簡介

近年來由於通訊需求的快速成長，對於一條光纖傳輸線所能夠傳輸的資訊量而言，可說是逐年倍增，而由於無水光纖製造技術的突破，使得光纖可使用的頻寬範圍可從 $1.3 \mu\text{m}$ 到 $1.6 \mu\text{m}$ 。通訊容量快速增加的需求造成了分波多工技術 (wavelength division multiplexing, WDM) 的出現，也就是在一條光纖中，利用不同的波長可同時傳輸數十到數百個頻道，因此這樣的光學傳輸網路系統使得光學元件的光譜頻寬需求也跟著變大。在各種光元件中，光放大器在光通訊技術與市場的擴展中扮演了舉足輕重的角色。而目前的光纖放大器的發展情形和增

益頻寬範圍，如圖 1 所示，是以不同種類的玻璃光纖摻入稀土族元素，以適當的近紅外光光源泵激，而產生不同波段的增益。而光纖放大器所面臨的主要問題是增益頻寬的不足，這不僅在應用上缺乏選擇的彈性，也會使得系統成本無法降低。

摻鉻鈮鋁石榴石 ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$) 晶體相當有潛力可符合全通訊頻寬增益，由於 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶體在波長為 $1 \mu\text{m}$ 附近之雷射泵激下，可產生波長為 $1.2 \mu\text{m}-1.6 \mu\text{m}$ 的自發輻射⁽¹⁾。此光源波段剛好涵蓋了 $1.3 \mu\text{m}-1.6 \mu\text{m}$ 整個低損耗通訊頻段，同時 YAG 晶體亦具有很好的機械特性，適合高功率的激發光源泵激，因此極具發展超寬頻光放大器元件之潛力。將 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 塊材晶體拉成晶體光纖則更

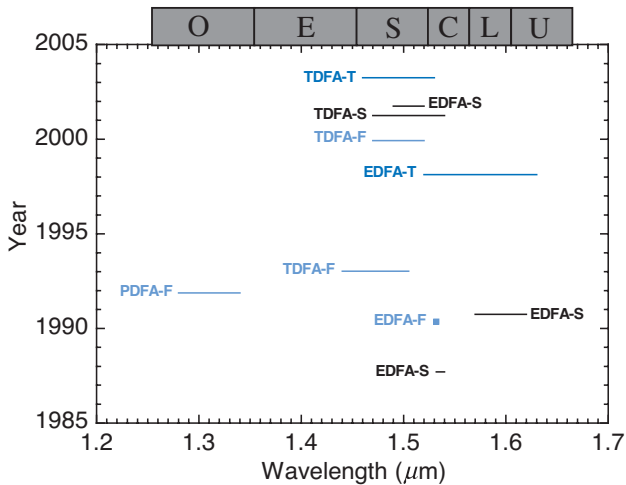


圖 1. 摻稀土元素光纖放大器之增益範圍和發展情形。圖中的 EDFA (erbium-doped fiber amplifier) 是摻鉕光纖放大器，TDFA (thulium-doped fiber amplifier) 是摻釷光纖放大器，PDFA (praseodymium-doped fiber amplifier) 摻鐳光纖放大器。-S (silica) 是純矽玻璃光纖，-F (fluoride) 是摻氟玻璃光纖，-T (tellurite) 是摻碲玻璃光纖。

適合用於光通訊領域，因其幾何結構與玻璃光纖類似。本研究採雷射加熱基座生長法 (laser-heated pedestal growth, LHPG) 生長晶體光纖⁽²⁾，此法不僅可輕易生長出直徑極小之單晶晶纖，且生長速度快、耗能低、控制容易，既經濟又快速，且無坩鍋污染問題。利用此方法我們已能生長出直徑小於 50 μm 之 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶體光纖。晶纖生長完需做包覆的處理，其目的最主要是降低傳輸損耗，目前包覆的晶纖方法有內擴散⁽³⁾ 或離子植入法⁽⁴⁾、外擴散法^(5,6)、電子槍蒸鍍法⁽⁷⁾ 或離子濺鍍法⁽⁸⁾、浸泡法^(9,10) 和擠出法⁽⁸⁾ 等。本文則是利用新的玻璃包覆技術達到包覆晶纖的目的，藉由此法，可將晶體光纖纖心直徑縮小至約 10 μm ，形成波導結構。之後利用光纖融燒技術將 $\text{Cr}:\text{YAG}$ 雙纖衣晶纖和玻璃單模光纖融燒接合，再以特殊設計的寬頻分波多工耦合器，將 1064 nm 的泵激光源和訊號光源耦入晶纖中，量測其小訊號增益。目前我們利用玻璃包覆之 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶體光纖，已經能夠在輸入訊號光波長為 1.47 μm 、泵激功率 1.16 W 下，成功達到 16 dB 的增益 (gross gain)。

二、晶體光纖生長及特性量測

1. 晶體光纖生長

晶體光纖的生長法有高溫溶液法、熔區法與氣態凝結法。其中熔區法中的雷射加熱基座生長法，因其易於控制晶體的晶向與直徑，而廣泛地使用於生長晶體光纖。此方法適用於生長共融 (congruent) 晶體，而生長時不需要容器盛載晶體，因此無坩鍋污染的問題。此生長方法使用經聚焦之雷射熱源，能產生極高的溫度梯度 ($\sim 10^3$ $^\circ\text{C}/\text{cm}$)，因此生長速度快，可以長出直徑幾十微米之晶體光纖。利用 LHPG 法生長晶體時，首先將連續式二氧化碳雷射以一組凸透鏡進行擴束，再以一組圓錐面鏡將平行光轉為環形光，並經由拋物面反射鏡聚焦於源棒之一端 (參考圖 2(a))。此時，該端晶體開始熔融，接著將子晶接觸熔融之晶體，再緩慢地將子晶往上拉，則可生長出與子晶晶向相同之晶體。配合不同的拉提子晶與推送源棒之速度比，可得到不同之縮

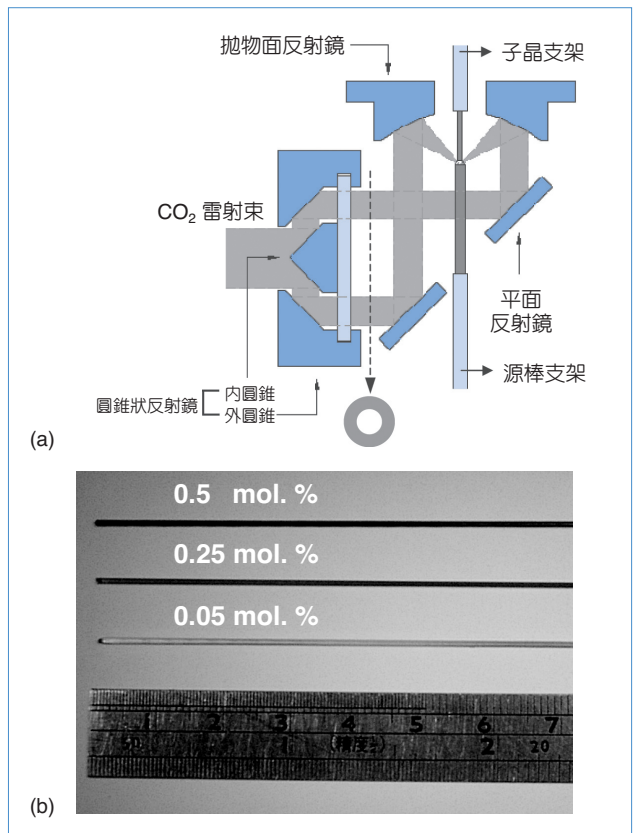


圖 2. (a) LHPG 方法之生長腔示意圖，(b) 不同 Cr^{4+} 濃度的 $\text{Cr}:\text{YAG}$ 晶體光纖。

徑比。例如，若是拉提子晶與推送源棒之速度比為 16:1，則長出晶體光纖與原始晶棒之直徑比 1:4。圖 2(b) 為利用 LHPG 法所生長的 Cr:YAG 晶體光纖，其直徑為 0.92 mm。從圖中可觀察到，當 Cr⁴⁺ 離子濃度很低時晶體光纖呈現出淺綠色，隨著 Cr⁴⁺ 離子濃度的增加，則晶體光纖的顏色會從淺褐色變成深褐色。

Cr⁴⁺:YAG 晶體經 LHPG 方法生長過後，接著對其包覆以縮小晶纖直徑及降低傳輸損耗。包覆方法為將 Cr⁴⁺:YAG 晶體光纖置於一內徑為 76 μm 之 fused-silica 毛細管中，再以 LHPG 生長系統架構，向下生長方式來加熱毛細管，達到包覆的目的，其加熱示意圖如圖 3(a) 所示。此新方法稱為共同提拉雷射加熱基座生長法 (codrawing laser-heated pedestal growth method, CDLHPG)⁽¹¹⁾。由於 fused silica 的軟化點相當高 (~ 1600 °C)，其與 Cr⁴⁺:YAG 熔點 1970 °C 相近，造成 Cr⁴⁺:YAG 晶體光纖與 fused silica 材料徑向方向發生互融的情形，產生了雙纖衣包覆之 Cr⁴⁺:YAG 晶體光纖，如圖 3(b) 所示。其纖心、內層纖衣及外層纖衣直徑分別為 25、100 及 320 μm。

2. 雙纖衣晶體光纖之主成分分析

雙纖衣晶體光纖之主成分分析是利用型號為 Jeol JXA-8900R 的電子微探儀 (electron-probe micro-analyzer, EPMA)。如圖 4 所示，內層纖衣含

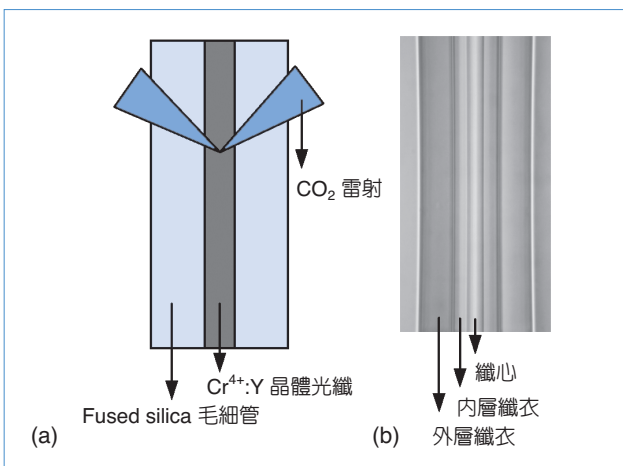


圖 3.(a) CDLHPG 生長法之示意圖，(b) 雙纖衣 Cr:YAG 晶體光纖之側視圖。

有 30%–50% 的 SiO₂，其平均 SiO₂ 的濃度為 39.8 wt.%，但是纖心的部分則沒有 SiO₂。外層纖衣的成分則幾乎是 SiO₂，這種包覆方式可使晶體光纖直徑縮小，再加上產生互融界面，將有利於傳輸損耗的減小，而纖心的直徑大小可藉由控制適當的生長速度及 CO₂ 雷射功率得到。

3. 雙纖衣晶體光纖之折射率及螢光量測

雙纖衣晶體光纖端面折射率及 Cr⁴⁺ 離子的螢光測量是藉由共焦顯微系統，分別利用波長為 635 nm 之紅光 DFB 雷射二極體及 1064 nm 之 Nd:YVO₄ 雷射為量測光源，經一 40× 物鏡將光聚焦於晶體光纖端面上，然後分別用 Si 及 InGaAs 光偵測器量測由端面反射回的 635 nm 紅光，以及因 1064 nm 光源泵激所產生 1.3 到 1.6 μm 之 Cr⁴⁺ 離子的螢光。圖 5 為量測結果，其中折射率部分是以 Cr⁴⁺:YAG 折射率為 1.82 設為已知，經由換算之後可以知道 fused silica 折射率約為 1.46，fused silica 與 YAG 之間的互融介面，其折射率為 1.66。而 Cr⁴⁺ 離子的螢光分布則顯示主要的螢光強度集中在纖心的部分。

三、晶纖融燒及光增益量測

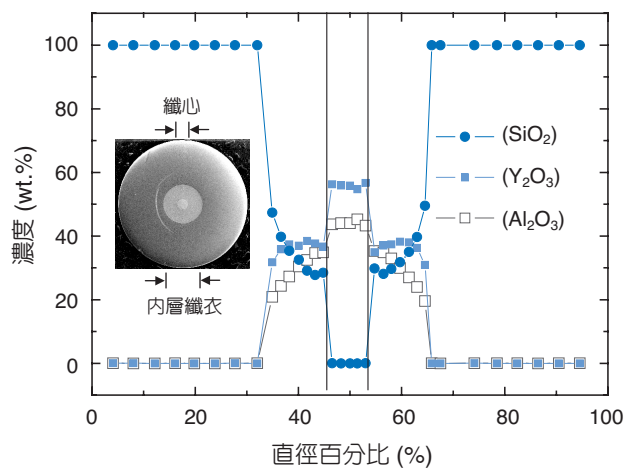


圖 4. 雙纖衣 Cr:YAG 晶體光纖之主要成分分布，圖中的兩條垂直線標示出纖心的部分，而插圖則為雙纖衣晶體光纖之端面圖，其纖心直徑為 25 μm。

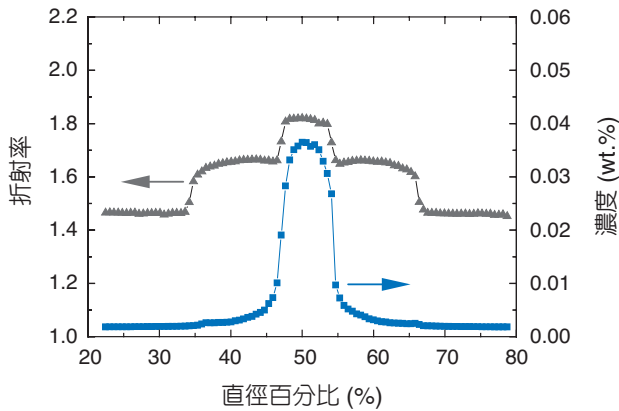


圖 5. 雙纖衣 Cr:YAG 晶體光纖之折射率及 Cr³⁺ 離子的螢光分布。

1. 晶纖融燒

為方便量測光訊號增益且達成全光網域的構想，用光纖融燒技術將雙纖衣晶纖和玻璃單模光纖融燒接合。首先將晶纖兩端面研磨拋光，然後用光纖融燒機 (Fusing splicer, Ericsson FSU 995 FA) 與單模光纖融燒接合，接合前後之外觀如圖 6 插圖所示，兩軸之角度無明顯偏斜。量測其 1.47–1.64 μm 訊號光源的插入損耗 (insertion loss)，結果如圖 6 所示，其插入損耗皆小於 1 dB，若再調整融燒參數使其產生直徑漸變和折射率漸變，可以將插入損耗再降低。

2. 摻鉻晶體光纖放大器

增益量測實驗之架構圖如圖 7 所示，以摻鉻光纖雷射 (ytterbium-fiber laser) 當作泵激光源，先以耦合透鏡將摻鉻光纖雷射耦入單模光纖，再利用分波多工耦合器將摻鉻光纖雷射與可調波長雷射之訊

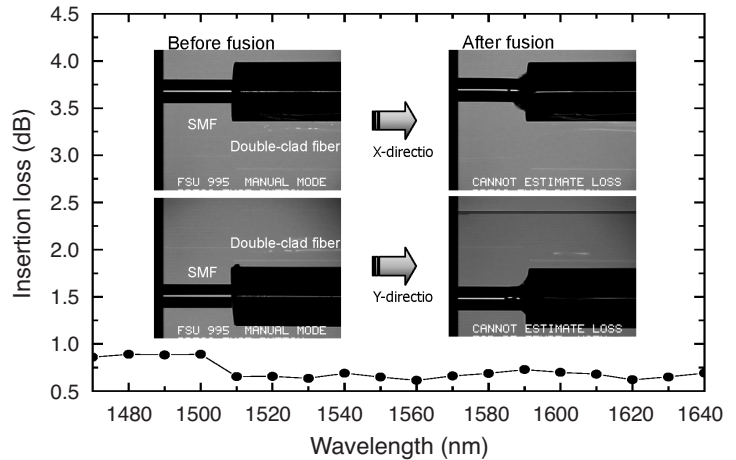


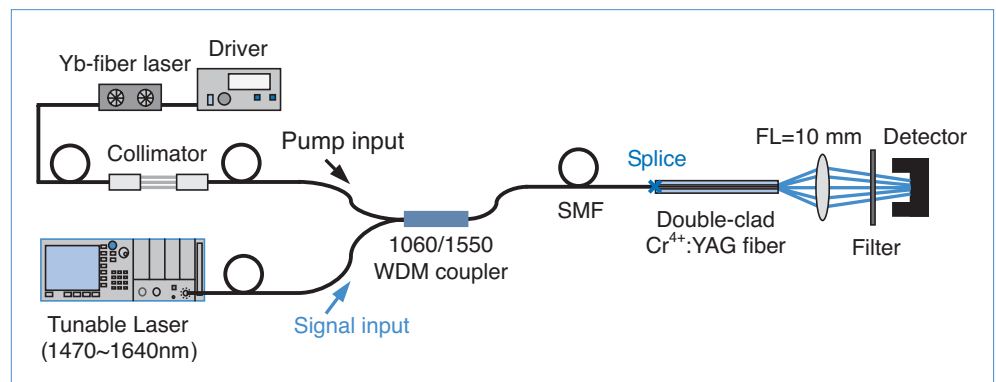
圖 6. 雙纖衣晶纖和單模光纖融燒後，1.47–1.64 μm 訊號光源之插入損耗皆小於 1 dB。插圖為融燒前後之接面。

號光源以融燒方式合併進入雙纖衣晶體光纖。其中，訊號光波長為 1.47–1.64 μm。晶體光纖的輸出端以焦距 10 mm 的透鏡將通過的光收集，並以針對 1064 nm 過濾的濾片將未被吸收的泵激光濾掉，然後量測其在不同訊號光強度下的增益⁽¹²⁾。此處增益之定義為輸出訊號光在有激發和沒激發時的倍率，當然 ASE 在訊號光波長的貢獻必須被扣除，以數學式表示則如公式 1 所示：

$$\text{Gross gain} = 10 \log \left[\frac{P_{\text{pump on}}^{\text{signal on}} - P_{\text{pump on}}^{\text{signal off}}}{P_{\text{pump off}}^{\text{signal on}}} \right] \quad (1)$$

分別量測不同波長的訊號光功率為 -10 dBm、-20 dBm 和 -30 dBm 之光增益，結果如圖 8(a) 所示，其中輸入 1.47 μm 訊號光功率為 -30 dBm 時，在

圖 7. 光增益量測架構圖。



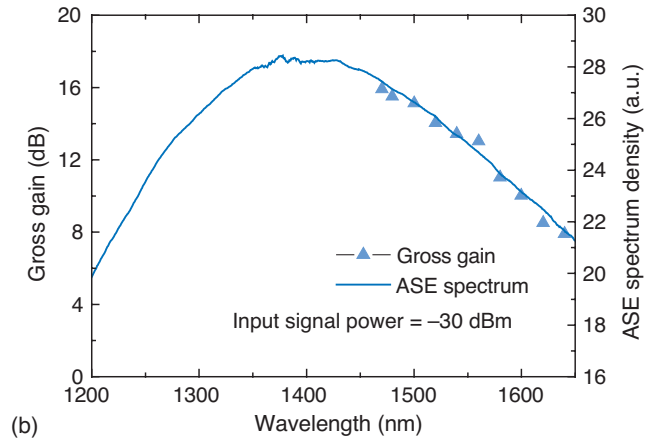
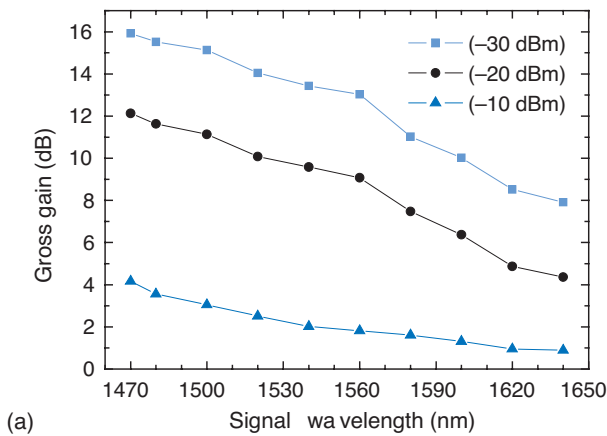


圖 8. (a) 光增益和泵激功率對不同輸入訊號光功率之關係圖。(b) 增益曲線和 Cr⁴⁺:YAG 自發輻射頻譜之比較。

1.16 W 的泵激下，可以產生 16 dB 的增益⁽¹³⁾。圖 8(b) 所示為量測結果曲線和 Cr⁴⁺:YAG 之自發輻射頻譜之比較，在波長 1.56 μm 以後增益曲線之斜率突然變大，其主要原因為分波多工耦合器之頻寬限制所致。從頻譜比較結果，摻鉻光纖放大器之 3 dB 增益頻寬約為 270 nm，足以涵蓋 1.3–1.6 μm 整個通訊波段。

3. 最小雜訊係數之計算

光放大器的雜訊係數 (noise figure, NF) 是影響其訊號放大品質的一個重要指標，其定義為放大器的輸入端訊噪比 (signal-noise ratio, SNR) 與輸出端訊噪比之比值，如公式 2 所示⁽¹⁴⁾：

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (2)$$

NF 必大於 1，因此在訊號放大過程中會使訊噪比劣化。而最小雜訊係數之計算則如公式 3 所示：

$$NF^{min}(\lambda_p, \lambda_s) = \frac{2}{1 - \frac{\sigma_e(\lambda_p)\sigma_a(\lambda_s)}{\sigma_a(\lambda_p)\sigma_e(\lambda_s)}} \quad (3)$$

其中 λ_p 和 λ_s 分別是泵激和訊號光源之波長， σ_e 和 σ_a 則分別是自發輻射和吸收截面積。假設自發輻射和吸收截面積為一比例關係，如圖 9 之插圖所示，以公式 3 計算其最小雜訊係數，結果如圖 9 所

示，雜訊係數接近 3 dB，比摻鉍光纖放大器之雜訊係數 4–5 dB 更低，主要原因是 Cr⁴⁺:YAG 的自發輻射和吸收頻譜之重疊遠比摻鉍光纖來得小。

四、結論

雙纖衣 Cr⁴⁺:YAG 晶體光纖已成功地利用共同提拉雷射加熱基座生長法而生長。利用長度為 6 cm 的雙纖衣 Cr⁴⁺:YAG 晶體光纖可產生 16 dB 的增益，此摻鉻晶體光纖放大器將有極大的潛力應用在 1.3–1.6 μm 的光通訊波段上。其單一元件卻有超寬頻增益的特性，具有使設備成本降低、應用極富彈性、架構簡單且全光網域的優點，將可加速光通

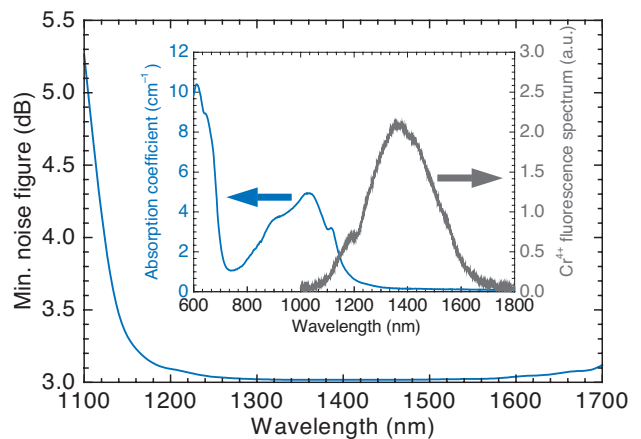


圖 9. 最小雜訊係數之計算結果。插圖為 Cr⁴⁺:YAG 的自發輻射和吸收頻譜。

訊技術與市場的擴展。

高速、大容量的通訊技術是一必然的趨勢，而目前全世界尚無一同時具備如上述優點之光放大器，若能將此光放大器技術成功開發進入商品化階段，將可取得光通訊發展核心之地位，以提升國家科技之競爭力。

參考文獻

1. S. Kuck, K. Petermann, and G. Huber, *OSA Proceedings on Advanced Solid-state Lasers*, G. Dube and L. Chase, eds., **10**, 92 (1991).
 2. M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Magel, and R. L. Byer, *Review of Scientific Instruments*, **55**, 1791 (1984).
 3. S. Sudo, A. Cordova-Plaza, R. L. Byer, and H. J. Shaw, *Optics Letters*, **12**, 938 (1987).
 4. D. P. S. Saini, Y. Shimoji, R. S. F. Chang, and N. Djeu, *Optics Letters*, **16**, 1074 (1991).
 5. C. A. Burrus and L. A. Coldren, *Applied Physics Letters*, **31**, 383 (1977).
 6. C. Y. Lo, P. L. Huang, T. S. Chou, L. M. Lee, T.Y. Chang, S. L. Huang, L. Lin, H. Y. Lin, and F. C. Ho, *Japanese Journal of Applied Physics*, **41**, L1228 (2002).
 7. S. Ishibashi and K. Naganuma, in *Advanced Solid-state Lasers, OSA Technical Digest*, Optical Society of America, Washington DC, 103 (2000).
 8. M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta, D. O'Meara, and H. J. Shaw, *Journal of Lightwave Technology*, **LT-5**, 642 (1987).
 9. C. A. Burrus, J. Stone, and A. G. Dentai, *Electronics Letters*, **12**, 600 (1976).
 10. J. Stone and C. A. Burrus, *Fiber and Integrated Optics*, **2**, 19 (1979).
 11. C. Y. Lo, K. Y. Huang, J. C. Cheng, S. Y. Tu, and S. L. Huang, *Optics Letters*, **29**, 439 (2004).
 12. G. M. Davis, I. Yokohama, S. Sudo, and K. Kubodera, *IEEE Photonics Technology Letters*, **3**, 459 (1991).
 13. C. Y. Lo, K. Y. Huang, J. C. Cheng, C. Y. Chuang, C. C. Lai, S. L. Huang, Y. S. Lin, and P. S. Yeh, *Optics Letters*, **30**, 129 (2005).
 14. P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*, 1st ed., San Diego, Academic Press, 221 (1999).
-
- 黃光瑤先生現就讀於國立中山大學光電工程研究所博士班。
 - 陳建誠先生現就讀於國立中山大學光電工程研究所博士班。
 - 羅家堯先生為國立中山大學光電工程研究所博士，現任國立海洋大學光電工程研究所助理教授。
 - 黃升龍先生為美國馬里蘭大學電機博士，現任國立中山大學光電工程研究所教授。
 - Kuang-Yao Huang is a Ph.D. student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Sun Yat-sen University.
 - Jian-Cheng Chen is a Ph.D. student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Sun Yat-sen University.
 - Chia-Yao Lo received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an assistant professor in the Institute of Optoelectronic Sciences at National Taiwan Ocean University.
 - Sheng-Lung Huang received his Ph.D. in electrical engineering from the University of Maryland, USA. He is currently a professor in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Sun Yat-sen University.