

光纖拉曼放大器的原理、架構及應用

Fiber Raman Amplifier: Principles, Structure, and Applications

陳英任、董正成

Ying-Ren Chen, Jeng-Cherng Dung

在長距離高速度波長多工的光纖傳輸系統中，以傳輸光纖為介質的光纖拉曼放大器具有低雜訊及寬頻的優點，相較於摻鉕光纖放大器，已普遍成為加強系統效能的技術。配合高功率激發光的發展，研究者很快證明拉曼放大器有一些勝過摻鉕光纖放大器的優點，尤其是在傳輸光纖上直接進行拉曼放大，這些研究反過來促成拉曼激發光技術的進一步發展。本文從受激拉曼散射增益的基本特性開始，討論分布拉曼增益在傳輸光纖上的優點，說明光纖拉曼放大器的系統架構。最後，介紹新近發展出的傳輸應用。

In a long-haul and high-speed wavelength division multiplexing transmission system, fiber Raman amplifier distributing the gain within transmission fiber can ideally offer a better noise performance than an erbium doped fiber amplifier (EDFA), and the former allows for a much broader amplification bandwidth. The development of suitable high-power pump LDs sparked renewed interest. Researchers were quick to demonstrate some of the advantages that fiber Raman amplifier has over EDFA, particularly when the transmission fiber itself is turned into a Raman amplifier. This paper starts with the fundamental properties of stimulated Raman scattering. Then, the structure of Raman amplifier and the merits of distributing Raman gain along a transmission fiber are discussed. Finally, novel Raman pumping schemes that have recently been developed are introduced.

一、前言

在超長距離的通訊系統上，傳輸光信號的最長距離是由光纖本身的傳輸損耗和色射的大小所決定的。因為光纖的傳輸損耗會使信號強度隨著傳輸距離而減弱，到了某一定的距離之後，光接收器即無法正確的接收到光信號。因此，必須再加設一個能將光信號直接放大的設備－光放大器 (optical

amplifier)。光放大器在 1990 年代初期的電訊革命中扮演關鍵性的角色，這是光波通訊系統第一次不需要昂貴的電子再生器，而使用線上放大器且可以橫跨好幾個光纖區段。目前技術上較為成熟的摻鉕光纖放大器 (EDFA) 取代傳統的光－電－光中繼方式，實現了一根光纖中多波道光信號的同時放大，大大降低了光中繼器的成本；同時可與傳輸光纖良好的耦合，具有高增益低雜訊等優點。因此成功地

應用於分波多工 (WDM) 光通信系統，極大地增加了光纖中可傳輸的資訊容量和傳輸距離。然而，EDFA 尚存在許多不足之處。首先是對於有效利用單模光纖低損耗區的巨大帶寬資源而言，明顯存在著工作波段和帶寬的局限性。其次是自發輻射雜訊的影響，尤其是當系統串聯時，自發輻射雜訊的影響會大大降低系統接收器端的訊號訊雜比 (SNR)。如何提高光纖傳輸系統容量、增加無電再生中繼的傳輸距離，已經成為光纖通信領域研究的重點。

光纖上使用拉曼放大的研究開始於 1970 年代初期，由 Stolen 和 Ippen 所提出⁽¹⁾，1980 年就受到大家廣泛的研究。然而，拉曼增益需要很大功率的泵浦光源，和每一 dB 僅需數十分之一毫瓦的摻鉍光纖放大器相比較，光纖拉曼放大器每 dB 的增益卻需要數十毫瓦的泵浦光源，在當時缺乏高功率的泵浦光源情況下，使得拉曼放大器的研究在 1990 年代初期沉寂下來，取而代之的則是摻鉍光纖放大器。但是在 1990 年代中期，合適的高功率泵浦光源被發展出來，光纖拉曼放大器於是再度成為研究的重點，也證實了光纖拉曼放大器的優點遠大於摻鉍光纖放大器，尤其是在傳輸光纖上直接進行拉曼放大，現在已經成為普遍被接受的一項加強系統效能的技術。本文將就光纖拉曼放大器的發展，介紹其作用原理、系統架構及傳輸應用。

二、拉曼放大器的原理

1. 拉曼散射的緣起

拉曼散射早在 1928 年就由印度科學家拉曼 (Chandrasekhara Venkate Raman) 在實驗中發現⁽²⁾。當一光場照射在分子上時，分子結構本身也會以各種不同分子振動的頻率與光產生共振。因此，這個受感應振動的電極矩也包含了介於光頻率與振動頻率之間的頻率總和與差，並放射出這些頻率而產生拉曼散射光。拉曼正確地解釋了物質中分子振動的頻率 ν_1 與入射光頻率 ν_0 所產生的拉曼譜線頻率 $\nu_0 \pm \nu_1$ ，等於透明物質中的分子或原子本身的吸收或放射譜線的頻率，這種現象稱為拉曼效應 (Raman effect)。因此 ν_1 通稱為拉曼位移 (Raman shift)。拉曼位移與入射光頻率無關，而與物質中分子的振動

頻率有關，不同物質的拉曼譜線均不相同，稱為拉曼散射 (Raman scattering)。拉曼光譜所解說的拉曼效應及拉曼散射量測是研究分子振動及分子結構的重要工具。

圖 1 就是自發性拉曼散射的示意圖，這種散射光的頻率不同於入射光的原始頻率。光子與稱為光聲子的量子化分子振動產生非彈性散射，光子失去「分子晶格被加熱」或得到「分子晶格被冷卻」能量，光的頻率因此產生偏移。向較低頻率偏移的散射光稱為史托克光 (Stokes wave)；那些向較高頻率偏移的散射光則稱為反史托克光 (anti-Stokes waves)。頻率的偏移等於所創造或去除的聲子之共振頻率。通常史托克光的強度會高於反史托克光。自發性拉曼散射是一種非常微弱的現象，在每一單位體積裡只有 10^6 cm^{-1} ，因此於傳輸中，在 1 公分的散射介質裡，只有 10^6 分之一的散射光會轉變為史托克光，而且這種散射是等向的。拉曼散射可以發生於任何材質裡，但在矽玻璃中，具支配力的拉曼譜線則是起因於矽-氧-矽束縛的彎曲運動。

2. 受激拉曼散射

拉曼光纖放大器之所以能夠放大信號是因為光纖的受激拉曼散射 (SRS)，當入射光進入物質時，引起分子的振動，使得其部分能量被分子振動所吸收，並激發出比原入射光能量低的光子⁽³⁾。

SRS 有兩種型態：(1) 史托克散射。(2) 反史托克散射。圖 2(a) 所示即為史托克散射，一個頻率

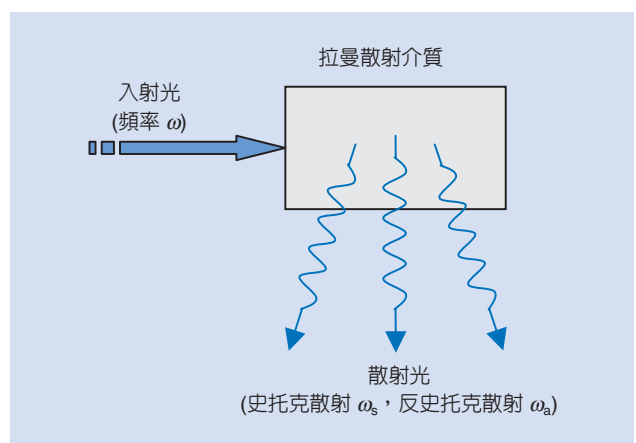


圖 1. 自發性拉曼散射示意圖。

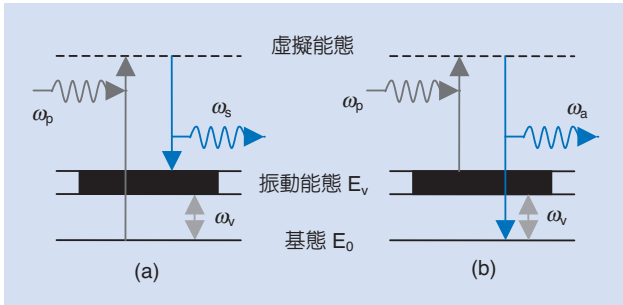


圖 2. 能階結構示意圖：(a) 史托克散射。(b) 反史托克散射。

為 ω_p 的泵浦光打入光纖中，被在基態能階 E_0 的分子所吸收，使其電子激發到高能階上，當此電子回到聲子能階時，放出 $\hbar\omega_s = \hbar\omega_p - \hbar\omega_v$ 的光子，其中 ω_s 、 ω_v 分別為激發光與振動能階的頻率， \hbar 為普朗克常數。另一方面如圖 2(b) 所示，打入物質的激發光子，可能被一個處於振動能階 E_v 的分子所吸收，將電子激發到高能階上，當此電子回到基態能階時，放出一個能量為 $\hbar\omega_a = \hbar\omega_p - \hbar\omega_v$ 的光子，這稱為反史托克散射。由於反史托克散射是由振動能階 E_v 上的分子所引起，它的強度會比史托克散射弱 $\exp[(E_v - E_0)/KT]$ 倍，其中 T 是絕對溫度， K 是波茲曼常數。在光纖中由於史托克散射遠比反史托克散射強，所以我們只考慮史托克散射。

3. 拉曼增益

1962 年 Eric J. Woodbury 和 Won K. Ng 在實驗時無意中發現 SRS，他們將 694.3 nm 的光波照射在材料上，發現其中約有 10% 偏移到 766.0 nm，其間頻率差為 40 THz，是實驗材料硝基苯分子的振動能之一。有兩個光子同時照在一個分子上，其中一個光子具有入射光的頻率 ω_i ，另一個則具散射光的頻率 ω_s ，這個分子吸收 $\hbar\omega_i$ 的能量後，頻率 ω_s 的光子會激發此分子輻射出同為 ω_s 的光子，因此入射光會因失去一個光子 $\hbar\omega_i$ 而能量下降，散射光則會因得到一個光子 $\hbar\omega_s$ 而增益放大，剩餘能量則會轉移到材料上而產生一史托克位移的量，讓原本短波長的能量移位到長波長側。

光纖拉曼放大器便是利用此效應在光纖傳輸中所產生的非線性效應，在 1980 年代的中期，拉曼

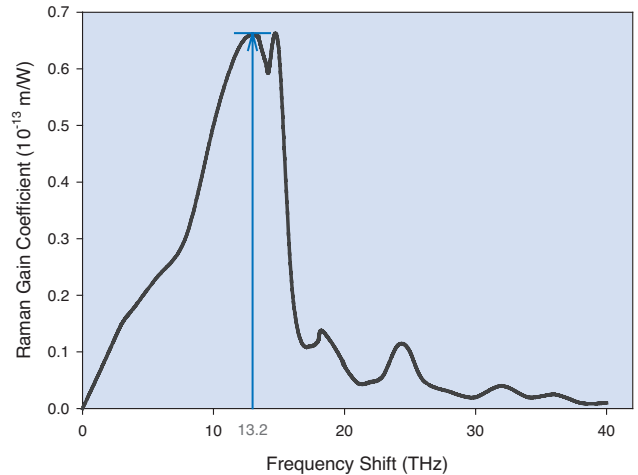


圖 3. 光纖拉曼增益曲線。

放大器已經被研究出來。在光纖中，當激發光功率大過一臨界值功率 (0.5–1.0 W) 時，由於與晶格中分子產生交互作用，讓晶格內的分子激發至高能階，而後又與入射之信號光波相互激發放大成相同頻率的光放大信號，其餘的能量則產生史托克位移量，如圖 3 所示，相間隔於激發光波長和放大信號波長間，大約為 13.2 THz (約 100 nm)。因此，拉曼放大的增益波段隨著激發光波長而改變，對一激發光源而言，其有效增益頻寬大約為 20–30 nm，也因為其增益頻段隨激發光波長而變，所以對於光纖通信而言，猶如一個增益頻段可調式的光放大器，對於 C-band、L-band 甚至於 S-band，拉曼放大器都可以提供放大信號的作用。過去，由於高功率的激發雷射難以取得，因此限制了拉曼放大器的發展，而近幾年來，由於在技術上的突破，半導體雷射已經可以提供很高的功率來產生拉曼效應，再加上週邊元件也逐漸發展成可耐高功率的特性，拉曼放大器至此倍受重視。

由一個連續波的例子，泵浦光源與信號光源之間的相互影響，可以用下列的耦合方程式來表示⁽⁴⁾：

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + C_R(\lambda_s, \lambda_p) [P_p^+ + P_p^-] P_s \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm}{dz} = -\alpha_p P_p^\pm - \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_p} \right) C_R(\lambda_s, \lambda_p) P_s P_p^\pm \quad (2)$$

其中 α_s 和 α_p 分別表示信號及泵浦光源的波長為 λ_s 和 λ_p 時的衰減係數， P_s 、 P_p^+ 和 P_p^- 分別為信號光、順向泵浦光及背向泵浦光的能量， z 是光纖長度， C_R 則是拉曼增益係數 (Raman gain efficiency)， C_R 值的大小取決於光纖材質、泵浦光源的極化狀態及泵浦光源的波長。

4. 極化狀態對拉曼增益的影響

信號光在傳輸光纖中的極化狀態是隨時在改變的，當泵浦光源與信號光源有相同的極化狀態時會得到最大的拉曼增益，大約有 3–15 THz 的增益範圍。相反的，如果呈現互相垂直的極化狀態時，增益值幾乎為零。於是利用偏極光耦合器 (PBC-polarization beam combiner) 來控制泵浦光源的極化狀態，如圖 4 所示，偏極光耦合器的原理是將兩束正交極光合併為一束光，在搭配雷射光源下，偏極光耦合器可以將兩顆低功率雷射合併為一高功率輸出，這樣就可以得到最穩定的拉曼增益。

5. 使用多波道激發的寬頻放大

拉曼放大器主要是利用強烈的泵浦光源經過矽光纖時所產生的受激拉曼散射來放大信號，其增益峰值比激發光頻率低約 13.2 THz，再藉由調整激發光的頻率使放大的信號波長範圍可涵蓋整個光纖通訊所需要的波段，並可以藉由組合多波道泵浦光源去製造一個多波激發光譜而形成寬頻拉曼放大器，如圖 4 所示。以最少數目的激發達到平坦增益最佳化方面已經有許多的研究。使用這種寬頻激發的方式，其增益頻寬大於 100 nm 的放大器已經獲得證明。在設計這種寬頻拉曼放大器時，必須考慮到激發光之間強大的拉曼交互作用。短波長激發光放大了較長波長激發光，因此最短波長通常需要更多的功率。這種激發光之間的交互作用同時影響了寬頻放大器的雜訊特性。

三、拉曼放大器的系統架構

圖 5 為拉曼放大器的結構圖，主要是由一般的傳輸光纖、波長多工器 (wavelength division multiplexed, WDM)、泵浦光源及光隔離器 (isolator)

等所組成。從泵浦光源發射出來的雷射光，會經由波長多工器的耦合作用而進入傳輸光纖，在此同時信號光源亦同步進入傳輸光纖，在光纖中進行放大，進而產生一個與輸入光信號同調的光信號。設置光隔離器之目的，是為了使放大後的信號及泵浦光源不會向反方向傳播而影響到原始的輸入信號。若是由泵浦光源與信號光源的行進方向來區分，又可分為：順向光纖拉曼放大器—當泵浦光源與信號光源由相同方向進入傳輸光纖時稱之，如圖 5(a) 所示；背向光纖拉曼放大器—當泵浦光源與信號光源由相反方向進入傳輸光纖時稱之，如圖 5(b) 所示；雙向光纖拉曼放大器—當傳輸光纖的前、後方均有泵浦光源時稱之，如圖 5(c) 所示。研究顯示，有一個最理想量的同向和反向激發，可以在改進雜訊比和減低信號非線性扭曲之間得到最好的結果。同向激發增益的最佳百分比約在 25%–50% 之間，全看系統結構如光纖區段長度與光纖型態而定。

一般若是直接利用傳輸光纖當成增益介質來放大信號，我們又稱之為分布式拉曼放大器，如圖 6 所示。此型式的放大器主要用來輔助摻錒光纖放大器，使用於高密度分波多工通信系統性能的提升，可提高訊號訊雜比，也可以降低非線性效應所造成的不良影響。另一種為集聚式拉曼放大器，如圖 7。所用的光纖增益介質比較短，一般在幾公里，泵浦功率要求很高，一般在幾到十幾瓦特，可產生

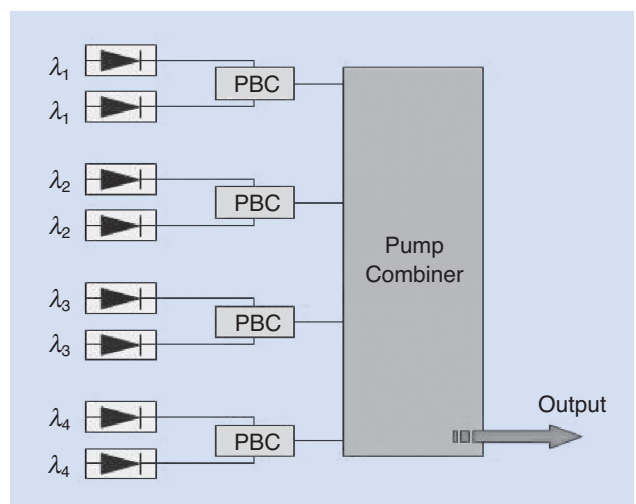


圖 4. 利用雷射極化耦合器合併四個波長的泵浦光源。

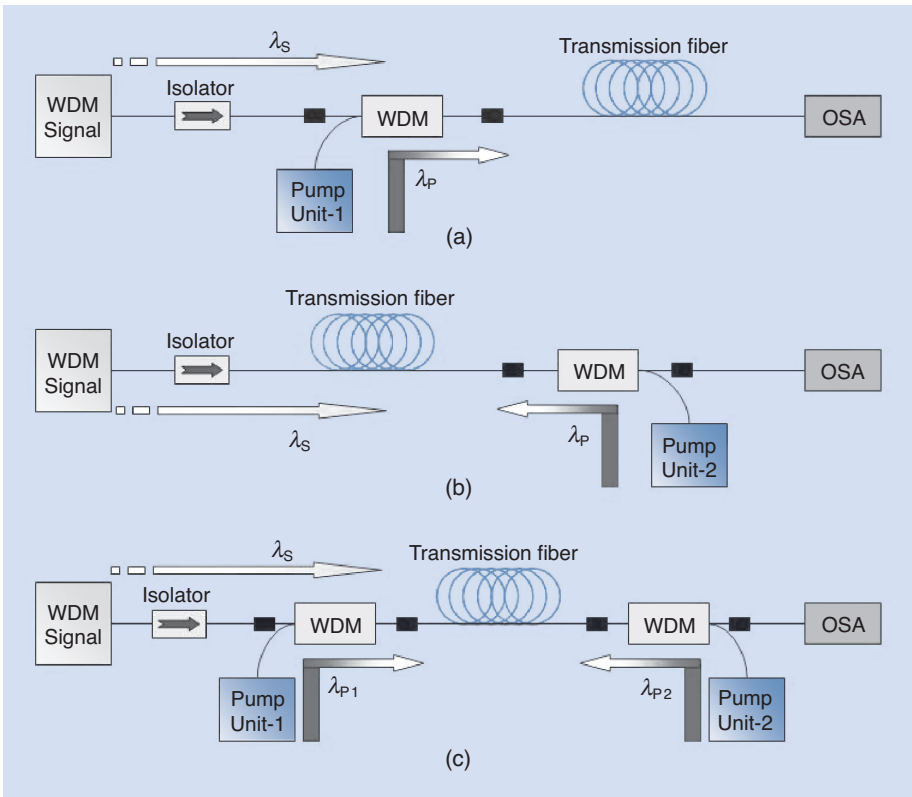


圖5. 拉曼光纖放大器架構圖：(a) 順向拉曼放大器，(b) 背向拉曼放大器，(c) 雙向拉曼放大器。

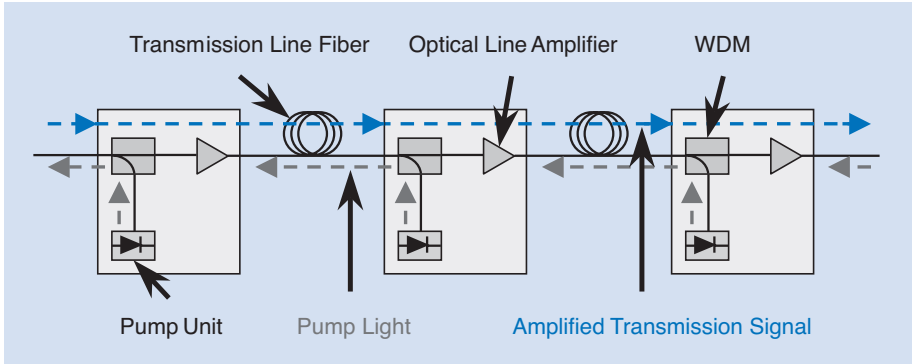


圖6. 分布式拉曼放大器架構圖。

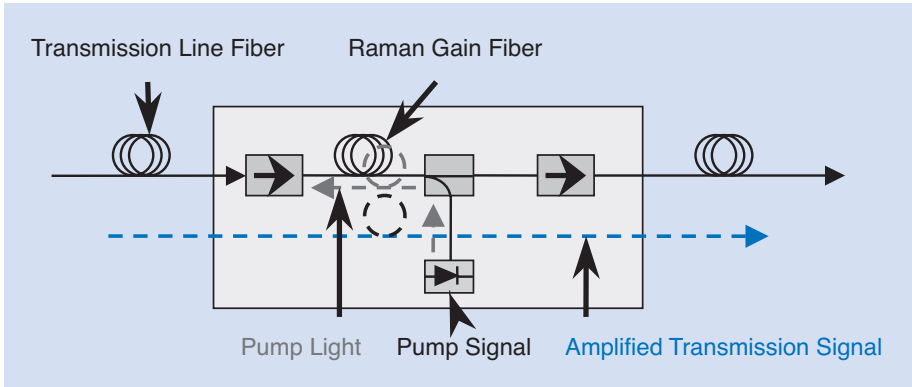


圖7. 集總式拉曼放大器架構圖。

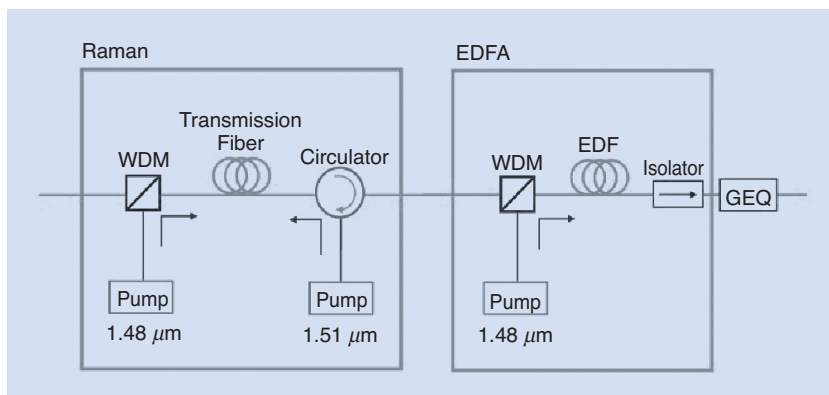


圖 8. 拉曼／摻鉕光纖混合型放大器架構圖。

40 dB 以上的高增益，像摻鉕光纖放大器一樣用來對信號光進行集中放大。主要作為高增益、高功率放大，可以放大摻鉕光纖放大器所無法放大的波段，但卻會造成雜訊提高及產生嚴重的非線性效應^(5,6)。

四、拉曼放大器的應用

1. 拉曼／摻鉕光纖混合型放大器

一般傳統摻鉕光纖放大器的增益頻寬在 1550 nm 波段約有 30 nm 可用，而拉曼放大器以目前的技術而言，只要選擇適當泵浦光源的波長，就能夠對任意頻寬產生放大的效果，其放大率以及訊號訊雜比的表現不亞於摻鉕光纖放大器，甚至在總功率的變動之下，單一波長的增益變動程度也不像摻鉕光纖放大器那樣敏感，使其深具在分波多工放大器上的發展潛力。因此，寬頻的拉曼／摻鉕光纖混合型放大器 (hybrid amplifier, HA) 用來放大 C 波段以及 L 波段，可使增益頻寬接近 100 nm，並有利於降低製造成本。圖 8 就是混合型放大器的基本架構，使用雙向的拉曼放大器及順向的摻鉕光纖放大器來達到將近 96 nm 的頻寬，其結果如圖 9 所示。

2. 色散補償拉曼放大器

光纖的傳輸損耗被光放大器克服後，改善光纖色散對系統的不良影響也是相當重要的課題，光纖色散會使脈衝變寬，而導致誤碼。一般來說，光纖色散包括材料色散和波導色散兩部分，材料色散取決於製造光纖的二氧化矽母料和摻雜介質的分散

性，而波導色散通常是摻雜模式的有效折射率隨波長而改變的傾向。在這裡介紹傳輸系統中利用色散補償光纖 (dispersion compensation fiber, DCF) 來解決色散管理以及做為拉曼放大器的增益介質。將圖 7 中的 Raman Gain Fiber 替換成色散補償光纖，一樣可以得到所需的增益值，更可補償前方傳輸光纖所累積的色散，由於是利用短距離的光纖，故亦可稱為集聚式拉曼放大器⁽⁷⁾。然而色散補償光纖並不是完全沒有缺點，由於要製造大的負色散必須使光纖核心的折射率增加 (此可藉由增加摻雜鉻來達成)，但是卻增加了衰減，故 DCF 的衰減係數比一般光纖大。DCF 的優點可由色散值除以衰減常數來判斷，具有愈高負色散與最小衰減的 DCF 性能也愈好。

信號在光纖中傳輸，由於光纖色散使信號脈衝失真變形，而限制其信號率和傳輸距離。週期性色散補償技術被認為是最有效的解決方法。色散補償

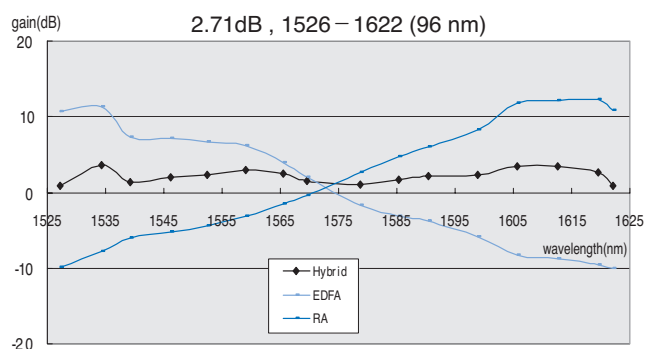


圖 9. 拉曼／摻鉕光纖混合型放大器，達到 96 nm 的頻寬。

表 1. 光纖拉曼放大器與摻鉍光纖放大器的比較。

	光纖拉曼放大器	摻鉍光纖放大器
基本原理	利用受激拉曼散射效應	利用摻鉍光纖中鉍離子的能階跳躍
波長範圍	範圍寬，理論上可以對任意波長信號進行放大	由於能階跳躍的限制，頻寬只有 40 nm
增益介質	傳輸光纖本身	摻鉍光纖
泵浦型式	14×× nm 泵浦光	980 nm、1480 nm 泵浦光
訊雜比	低	高
放大方式	分佈式、集總式	集總式

技術的概念是在經過一段傳統的負色散傳輸光纖後，利用一段正色散的色散補償光纖將系統累積的色散完全補償，所構成之週期性色散變化的傳輸系統，能有效減低傳輸光纖中引起的色散累積現象。色散補償光纖的長度 (L_{DCF}) 由單模光纖長度及色散值所決定 ($L_{DCF} = |D_{SMF} \times L_{SMF} / D_{DCF}|$)。在色散管理系統中，為了色散補償而使用色散補償光纖所帶來的能量損耗，也可以在色散補償光纖上利用拉曼放大效應來提供增益。由於 DCF 的拉曼增益係數為傳統單模光纖的 7–10 倍，可提供約 20–25 dB 的淨增益，除了補償 DCF 自己所帶來的能量損耗外，還可以用來補償傳輸光纖的損耗。因此，以 DCF 為介質的光纖拉曼放大器可同時兼具傳輸系統色散補償與損耗補償的兩項關鍵功能，最近更被廣泛地研究。

3. 拉曼光纖雷射

拉曼光纖雷射 (Raman fiber lasers, RFL) 是利用光纖中的受激拉曼散射來讓輸入的泵浦光源波長位移到另一個波長，適當的選擇及串連泵浦光源波長，經過幾次的拉曼位移，即可得到所需要的波長光源。一般會利用摻磷的單模光纖，因為它具有較大的拉曼位移 1330 cm^{-1} ，再搭配布拉格光柵。選用 1092.3 nm 的 ytterbium fiber laser 當泵浦光源，及 450 公尺的摻磷單模光纖，再利用 1539 nm、1278 nm 及 1092.3 nm 的布拉格光柵，除了原始的 1092.3 nm 的泵浦光源外，可以產生 1278 nm 和 1539 nm 的光源⁽⁸⁾。

五、結論

隨著通信系統容量的快速增長，特別是最近幾年來，隨著網際網路、寬頻綜合業務數位網及多媒體通信的高速發展，對傳輸速率和帶寬的要求越來越高，傳統的摻鉍光纖放大器已無法完全滿足這方面的需要。而拉曼光纖放大器的放大範圍更寬、雜訊指數更低，又可以充分利用光纖資源、降低成本，而且可以降低增益介質中的光密度，以便減少由非線性效應所產生的四波混頻、波道間串音所引起的系統性能劣化，光纖拉曼放大器成了未來通信系統不可或缺的技术。

附錄

表 1 是分布式光纖拉曼放大器與摻鉍光纖放大器的比較，可以明顯看出光纖拉曼放大器具有較多的優勢。

參考文獻

1. R. H. Stolen and E. P. Ippen, *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 276 (1973).
2. C. V. Raman and K. S. Krishnan, *Nature*, **121**, 501 (1928).
3. G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley-Interscience (2002).
4. J. Bromage, *J. Lightwave Technol.*, **22**, 79 (2004).
5. S. Namili and Y. Emori, *IEEE Select. Topics. Quant. Electron.*, **7**, 3 (2001).
6. M. N. Islam, Raman Amplifiers for Telecommunications, *IEEE Select. Topics. Quant. Electron.*, **8**, 548 (2002).
7. M. N. Islam, ed., *Raman Amplifiers for Telecommunications 1*, New York: Springer-Verlag (2004).
8. S. K. Sim, H. C. Lim, L. W. Lee, L. C. Chia, R. F. Wu, I. Cristiani, M. Rini, and V. Degiorgio, *Electron. Lett.*, **40**, 738 (2004).

- 陳英任先生為國立東華大學電機研究所碩士班學生。
- 董正成先生為國立交通大學電機資訊博士，目前為國立東華大學電機研究所助理教授。
- Ying-Ren Chen is a M.S. student in the Institute of Electrical Engineering at National Dong Hwa University.
- Jeng-Cherng Dung received his Ph.D. in optoelectronics from National Chiao Tung University. He is currently an assistant professor in the Institute of Electrical Engineering at National Dong Hwa University.