

寬頻摻鉕光纖放大器之基本原理

Principle of Broadband Erbium-Doped Fiber Amplifiers

王立康

Likarn Wang

本文介紹摻鉕光纖放大器 (EDFA) 的基本原理，從其放大機制開始導引出一般文獻上的基本理論方程式，然後敘述 C-band 和 L-band EDFAs 的操作方式，挑明它們的差別在於能階反轉分布 (population inversion) 的不同。接著，在文中舉例說明各頻帶 (band) 之 EDFA 架構和放大性能，並介紹可同時放大 C-band 和 L-band 光訊號之寬頻 EDFA 架構。

In this article, the principle of erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) is introduced. The physics behind optical wave amplification by an EDFA is explained with use of a generic atomic level system depicted by a set of simplified equations. The difference between the operation of a C-band EDFA and that of an L-band EDFA is described. Then, some typical C-band and L-band EDFA structures (especially the latter) and their performances are shown in this article. Finally, two broadband amplifiers both incorporating a C-band and an L-band EDFAs in the amplifying structures are briefed.

一、簡介

由於網際網路時代的來臨，我們需要越來越多的網路頻寬，這使得傳統的網路架構與傳輸規格大幅改變，EPON (ethernet passive optical network) 網路即是一例。此外，WDM (wavelength division multiplexing) 技術提供了點對點傳輸更高的通訊容量。WDMA (wavelength division multiple access) 網路傳輸概念亦大幅擴充網路頻寬。所謂 WDM 或 WDMA 技術，是在同一光纖中同時傳播很多波長

訊號之技術，如此一來，不需增加光纖之用量就使傳輸容量提升。而在光纖通訊傳輸過程中，訊號會因為一些光纖的物理特性而衰減，或因系統操作需求而分光招致損失，進而影響通訊品質，故需要一個放大器來放大訊號。放大器的種類有好幾種，例如拉曼放大器、半導體光放大器和摻鉕光纖放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 等，目前以 EDFA 受青睞程度最高。

EDFA 具有高增益、高輸出功率、低雜訊指數以及可以將不同波段的光訊號放大的功能，可以取

代傳統的光電轉換方式，而無需光電、電光的轉換，因此而避免了在光電與電光轉換的時間延遲，而且也降低了成本。也因為如此，EDFA 在 1990 年商用後，立即被廣泛地使用在長距離 WDM 光纖通訊系統中。

傳統的 C-band EDFA 僅能運作於 1530 nm – 1560 nm 的頻帶訊號放大⁽¹⁻³⁾。現今光纖通訊資料量日漸增加，將來恐不敷使用，因此 L-band EDFA (操作於 1565 nm – 1605 nm) 被發展出來以配合擴大頻寬使用⁽⁴⁾。L-band EDFA 有著效率低弱的缺點，而針對這個缺點，有許多改善的方法，如使用光迴旋器 (circulator) 及光纖迴路反射鏡 (fiber loop mirror)，使得訊號來回兩次摻鉕光纖 (erbium-doped fiber, EDF) 而提高訊號增益 (signal gain)⁽⁵⁾；或者使用未受雷射幫浦 (un-pumped) 之 EDF 以有效利用 C-band 放大自發輻射 (amplified spontaneous emission, ASE) 當作輔助幫浦光源 (pumping source)^(6,7)；或利用光纖光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 反射 C-band ASE 等方法來改善效率，我們將在下面一一介紹。

二、EDFA 之基本理論

摻鉕光纖放大器的之組成元件，必須有半導體雷射為激發 (幫浦) 光源 (pump light)、光耦合器以及摻鉕光纖。一般普遍使用波長 1480 nm 與 980 nm 之半導體雷射作為幫浦光源，使用光耦合器將幫浦光源耦合進入摻鉕光纖中，用來激發鉕離子能階中的電子，使其由低能階躍遷至高能階，進而達到能階反轉分布 (population inversion) 的情況。

當入射一個光訊號進入此能階反轉之摻鉕光纖中，發生誘發輻射 (stimulated emission) 機制，便產生了與入射之光訊號有相同頻率、相位的光，亦即產生了放大的光訊號。其機制與一般雷射的基本原理相似，不同的地方在於雷射有共振腔的結構，而光纖放大器的光訊號經過增益介質 (gain medium) 後，直接從中擷取能量進行放大。以下將對於光纖的放大機制做更詳細的說明。

在圖 1 中，我們可以看出 populations 與光子間的作用，以及在各個能階的轉移情況。對於 980 nm 激發光源的系統，在此我們使用三階的變率方

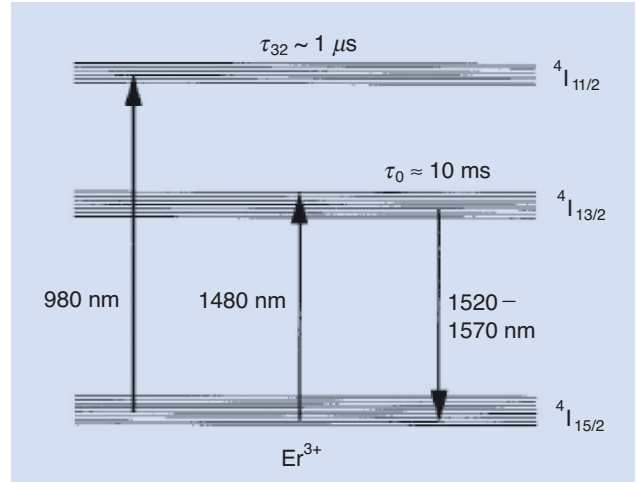


圖 1. 鉕離子在 EDFA 系統的放大機制能階圖。

程式 (rate equations) 來討論 populations 的變化。

- N_1 表示能階 1 ($^4I_{15/2}$ 能階，即基態 (ground state)) 的 population。
- N_2 表示能階 2 ($^4I_{13/2}$ 能階，即亞穩態 (meta-stable state)) 的 population。
- N_3 代表能階 3 ($^4I_{11/2}$ 能階，即激態 (excited state)) 的 population。

經由 980 nm 光源的激發，能階 1 的 population 激發到能階 3，然後以非輻射方式掉落至能階 2 中。當誘發輻射 (stimulated emission) 的機制發生時，能階 2 的 population 會被拉至能階 1，此時可以放出與入射光訊號相同波長、相位的光子，利用此種機制達成放大光訊號的功能。

要達到光訊號放大的條件，必須先滿足階反轉分布的條件，也就是 $N_2\sigma_s \geq N_1\sigma_a$ ，其中 σ_s 、 σ_a 分別代表了訊號的發射截面 (emission cross section) 和吸收截面 (absorption cross section)⁽⁸⁾ (參考圖 2)，因此我們激發光源的功率 (power) 必須大於某個肇始功率 (threshold power)，才能夠將大部分的 population 由能階 1 激發到能階 3，再經由能階 3 降落至能階 2，如此可使 population 在能階 2 累積。除此之外，population 在激發、轉移、累積的過程中，有些 population 會隨意掉落至能階 1 而產生自發性輻射的光 (spontaneous emission)。此種機制產生的光子頻寬很寬，而且不具同調性，也經由上述摻鉕光纖放大器的機制被放大，如此會形成很強的 ASE，

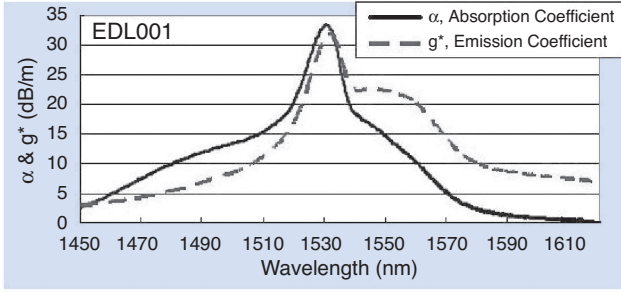


圖 2. 典型摻鉕光纖的發射截面 (虛線) 和吸收截面 (實線) 波長頻譜圖⁽⁸⁾。

所以會與光訊號爭奪放大器中處於能階 2 的 population，此一性質對於摻鉕光纖放大器的設計影響極大。

接著，我們採用一些假設來簡化的我們的問題。首先，由於能階 3 的生命期 (life time) ($\sim 1 \mu\text{s}$) 相對於能階 2 的生命期 ($\sim 10 \text{ms}$) 是非常短的，只有能階 2 生命期的萬分之一，幾乎所有的 population 被激發到能階 3 時，馬上就會掉到能階 2，所以我們簡化三階 (3-level) 的變率方程式為二階 (2-level) 變率方程式，如下所示⁽⁸⁾：

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + (N_1\sigma_s^a - N_2\sigma_s^e)\phi_s - (N_2\sigma_p^e - N_1\sigma_p^a)\phi_p \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)\phi_s - (N_1\sigma_p^a - N_2\sigma_p^e)\phi_p \quad (2)$$

其中 σ_s^a 、 σ_s^e 、 σ_p^a 、 σ_p^e 分別代表訊號及幫浦光的吸收和發射截面； ϕ_s 、 ϕ_p 代表幫浦光和訊號的光通量 (photon flux)； Γ_{21} 等於 $1/\tau_2$ ，而 τ_2 為能階 2 的生命期。

因為 $N = N_1 + N_2$ (N 為 total populations)，所以我們可以得到 $dN_2/dt = -dN_1/dt$ 。在穩態條件下，解得 N_2 與 N 的關係式：

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau_2\sigma_s^a}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau_2\sigma_p^a}{h\nu_p} I_p(z)}{\frac{\tau_2(\sigma_s^a + \sigma_s^e)}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau_2(\sigma_p^a + \sigma_p^e)}{h\nu_p} I_p(z) + 1} N$$

訊號光和幫浦光經過放大器時，會有吸收或放大的特性，所以必須再引入兩個傳播方程式 (propagation equations) 來討論在不同位置的光強度，即

$$\begin{aligned} \frac{dI_p(z)}{dz} &= (N_2\sigma_p^e - N_1\sigma_p^a)I_p(z) \\ \frac{dI_s(z)}{dz} &= (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)I_s(z) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中的下標 p 和 s 分別代表幫浦光和訊號光。訊號在放大器中傳播必須滿足 $dI_s(z)/dz \geq 0$ ，以求出訊號增益所需要的最低激發光功率，通常我們用光強度 (intensity) 表示：

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{\tau_2} \frac{1}{\sigma_p^a \left(\frac{\sigma_s^e}{\sigma_s^a} \right) - \sigma_p^e} \quad (4)$$

由此式我們可以得到一個非常重要的結論，對相同波段的訊號而言，在高吸收截面及長生命期的情況下，可以得到小的肇始幫浦功率 (threshold pump power)。以 980 nm 幫浦功率激發 EDF 為例， $\sigma_p^a = 2 \times 10 \text{cm}^2$ 、 $\tau_2 = 10 \text{ms}$ ，所以可以求得非常小的 $I_{th} \approx 10 \text{kW/cm}^2$ 。因此對於 EDFA 來說，幫浦只需要用一般的半導體雷射即可以辦到。

但是，在以上的討論中並未考慮到增益飽和以及 ASE 的影響。在光訊號放大的過程中會有 ASE 的產生，ASE 可以算是一種雜訊而且是隨機發生的，且無方向性。ASE 也會在放大器中被放大，也就是與光訊號一起爭奪 population，也因為如此，ASE 會限制整個放大器的增益。因為必須考慮 ASE 在放大器的影響，所以我們在此再加入一個方程式，如下所示：

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE}(V)}{dz} &= [N_2\sigma^e(v) - N_1\sigma^a(v)]P_{ASE}(v) \\ &+ P_{ASE}^0(v)N_2\sigma^e(v) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 P_{ASE}^0 為光纖中任一點當地所產生的自發性輻射，而從上式來看，ASE 不僅會消耗放大器中的

population，更會在摻鉍光纖的任何地方產生當地的自發性輻射。所以我們在此將 ASE 當作一種寬頻訊號來處理，原方程式必須加入此種影響，其修正的結果如下：

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^a}{h\nu_p} I_p(z) + \sum_j \frac{\tau\sigma_{v_j}^a}{h\nu_j} I_A(v_j)}{\frac{\tau(\sigma_s^a + \sigma_s^e)}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^a + \sigma_p^e)}{h\nu_p} I_p(z) + \sum_j \frac{\tau(\sigma_{v_j}^a + \sigma_{v_j}^e)}{h\nu_j} I_A(v_j) + 1} N \quad (6)$$

其中 $I_A(V_j)$ 為 ASE 在頻率下的能量強度。若我們考慮一個訊號以及一個幫浦光源下，並加入 overlap parameters (Γ) 和 intrinsic background loss (以 α_p^{a0} 、 σ_s^{a0} 、 $\sigma_{v_j}^{a0}$ 表示)，則傳播方程式可以寫成如下：

$$\frac{dP_p(v)}{dz} = (N_2\sigma_p^e - N_1\sigma_p^a)\Gamma_p P_p - \alpha_p^{a0} P_p \quad (7)$$

$$\frac{dP_s(v)}{dz} = (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)\Gamma_s P_s - \alpha_s^{a0} P_s \quad (8)$$

$$\frac{dP_A^+(v_j)}{dz} = (N_2\sigma_{v_j}^e - N_1\sigma_{v_j}^a)\Gamma_s P_A^+(v_j) + N_2\sigma_{v_j}^e \Gamma_s h\nu_j \Delta v_j - \alpha_{v_j}^{a0} P_A^+(v_j) \quad (9)$$

$$\frac{dP_A^-(v_j)}{dz} = -(N_2\sigma_{v_j}^e - N_1\sigma_{v_j}^a)\Gamma_s P_A^-(v_j) - N_2\sigma_{v_j}^e \Gamma_s h\nu_j \Delta v_j + \alpha_{v_j}^{a0} P_A^-(v_j) \quad (10)$$

若我們不考慮 intrinsic background loss 的情況，可以將 (8) 式改寫成

$$\frac{dP_s(v)}{dz} = (N_2\sigma_s^e - N_1\sigma_s^a)\Gamma_s P_s \quad (11)$$

在兩邊同時對 z 積分，我們即可以推出訊號增益：

$$G = \frac{P(L)}{P(0)} = \exp\left[\int_0^L (N_2(z)\sigma_s^e - N_1(z)\sigma_s^a)\Gamma_s dz\right] \quad (12)$$

由上式可得知，當光訊號操作在小訊號時，其增益會呈現指數的情況，且增益值與 populations $N_2(z)$ 及 $N_1(z)$ 有關 (它們隨著不同的 z 而有所變化)。不

僅如此，population 事實上會因為幫浦光在放大器中被吸收而隨著 z 減少，因此會變得複雜，所以當我們考慮整個放大器的增益時，通常會定義平均能階反轉分布 (average population inversion) 將上式簡化，方程式如下：

$$\bar{N}_2 = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) dz \quad (13)$$

$$\bar{N}_1 = \frac{1}{L} \int_0^L N_1(z) dz \quad (14)$$

所以我們在此再將訊號的增益用 (13) 式和 (14) 式取代，可將增益表示為

$$G = \exp\left[(\bar{N}_2\sigma_s^e - \bar{N}_1\sigma_s^a)\Gamma_s L\right] \quad (15)$$

經由上面的推導，我們可以得知訊號增益與 average population 有關，且不因為 populations 隨著不同的位置變化而有所不同。但是對於 ASE 而言，因為 ASE 為自發性輻射方式產生，且在放大器中傳播而放大，所以 ASE 與不同位置的 population 有很大的關係，也因為如此，吾人無法用 average population 的方式來表示及簡化 ASE 方程式。

EDFA 提供光訊號增益，同樣地也產生了雜訊，以雜訊指數 (noise figure, NF) 為雜訊量化指標。NF 是我們用來量化信號雜訊比 (SNR) 在經過放大器後劣化的程度，較高的雜訊指數將會使得訊號在接收端產生錯誤的機率上升。NF 定義為 EDFA 輸入端 SNR (亦即在未使用 EDFA 時接收端的 SNR) 與輸出端 SNR (亦即在使用 EDFA 後接收端的 SNR) 的比值：

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (16)$$

當光訊號在光纖放大器中傳輸時，會有雜訊產生，使得在接收端產生錯誤的機率提高。雜訊的來源有散粒雜訊 (shot noise)、熱雜訊 (thermal noise)、RIN 雜訊等等，其中散粒雜訊發生的原因主要為光子在接收端被光接收器 (photo-detector) 接

收後，會產生隨機的電流雜訊。在光纖通訊中，散粒雜訊是最基本的雜訊來源。

對於 EDFA 而言，自發性輻射為最基本的雜訊來源。在前文提及的 ASE 則為此機制引起的雜訊，此 ASE 會對於增益及雜訊的影響非常的大，將在後文提及。

在 EDFA 中的電場包含光訊號的電場加上自發性輻射的電場，考慮上述散粒雜訊而經過一番計算後，吾人可得

$$NF = 2n_{sp} \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} + \frac{n_{sp}(G-1)^2 e(2B_o - B_e)}{G^2 I_s} + \frac{2(G-1)n_{sp} e B_o}{G^2 I_s} \quad (17)$$

其中 B_o 與 B_e 分別為光頻寬 (optical bandwidth) 與光接收器的電頻寬 (electrical bandwidth)， G 為光訊號的增益， e 為電子電荷 (electron charge)。在 EDFA 中，增益可遠大於一，一般可以達到 20 dB 以上，故 NF 的大小主要決定在第一項，且如果 EDFA 工作在高增益的情況下，NF 可簡化為正比於 $2n_{sp}$ (n_{sp} 為 inversion parameter，或稱為自發輻射因子 (spontaneous emission factor))：

$$n_{sp} = \frac{\sigma_e(\lambda)N_2}{\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1} = \frac{N_2}{N_2 - \frac{\sigma_a(\lambda)}{\sigma_e(\lambda)}N_1} \quad (18)$$

由 inversion parameter n_{sp} 我們可以看出幾個重點。第一點：當光纖放大器處於高增益的情況時 NF 幾乎正比於 n_{sp} ，也就是說將 N_2 的值提高使得 n_{sp} 越低，則 NF 也越低，但 n_{sp} 接近 1 時便無法再下降了，也就是說，NF 的最小值為 3 dB。所以要設計一個低雜訊的 EDFA 時， n_{sp} 為一個重要的考量參數。不過實際上放大器有強烈的 ASE 會消耗許多在能階 2 的 population (即 N_2)，造成 N_2 值無法接近於 100%，故要使得 n_{sp} 的值接近於 1 的方法，除了需要打入很強的幫浦光源能量，將所有的 population 打至高能階，還須使得 ASE 不能太大。單以 980 nm 與 1480 nm 幫浦光源而言，由於 980 nm 為三階系統，而 1480 nm 為二階系統，在三階系統下，

population 會被打至能階 3，很快地以非輻射方式掉落到能階 2，且 980 nm 幫浦光源的光子無法激發能階 2 的 population，所以 980 nm 幫浦光源在沒有強烈的逆向 (backward) ASE 的情況下，可以使得 population 達到較高，以降低系統的雜訊指數。

而對於 1480 nm 幫浦光源來說，1480 nm 這個波長在摻鉕光纖中除了有很大的吸收截面外，仍有微小的發射截面 (參考圖 2)。因此在 population 被激發的同時，處在激態的 population 也會誘發至基態，也因為如此，所以無法使得 EDF 的中的能階反轉分布達到很高，因此在低雜訊的系統上，一般狀況下使用 980 nm 雷射作為幫浦光源。

三、L-band EDFA 的放大原理

為了解決 DWDM 頻寬的不足，我們在傳統的 C-band (1530 nm – 1560 nm) EDFA 上會加上 L-band (1565 nm – 1605 nm) EDFA 來增加頻寬。原則上一個 EDFA 是否操作在 C-band 抑或 L-band，可以用 EDF 平均的能階反轉分布來決定之。圖 3 為在許多不同能階反轉分布情形下 EDFA 的增益頻譜。此圖縱軸的值可以從 (15) 式算得，而該式的發射截面及吸收截面對波長之關係可由圖 2 得出並代入之。從圖 3 可以看出當能階反轉分布很大 (例如 80% 以上) 時，EDFA 在 C-band 和 L-band 均有正的增益值，意味著在此兩波帶的訊號均可被放大，只是增益在兩波帶的大小不同。

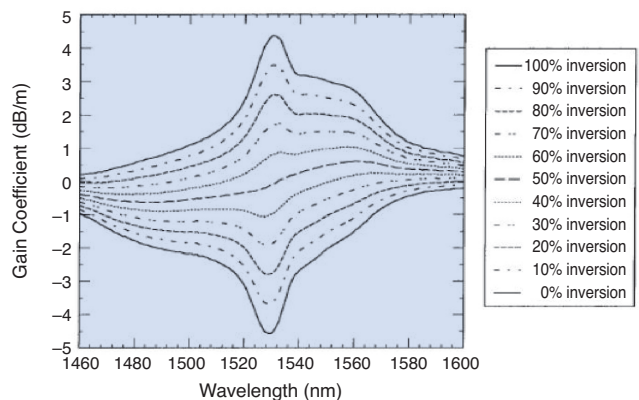


圖 3. 增益曲線在不同的能階反轉分布下，對於波長的變化情形。右框百分比 inversion 代表長度上的平均能階反轉分布。

一般 C-band EDFA 即是操作在較大能階反轉分布的情況。然而從圖 3 亦可看出，如果能階反轉分布操作在 35%–40% 即產生在 C-band 增益值為負而在 L-band 增益值為正的情況，這意味著 C-band 的訊號被吸收而 L-band 訊號將被放大，也就是 L-band EDFA 運作的狀況了。雖然在 L-band 的增益為正，但其值 (dB/m) 並不大，故須使用一般較長的 EDF 來達到對訊號產生高增益的目標。

接著再來看看 L-band 訊號是如何在 EDF 中進行放大的，以及 ASE 在 EDF 中變化的情形。如圖 4 所示，980 nm 或是 1480 nm 幫浦光從 EDF 前端輸入時，在 EDF 前端的能階反轉分布很高，其作用為一 C-band EDFA，因此會產生 C-band ASE 向前傳，接著進入 EDF 後段時，因為幫浦光的能量在前段已被吸收完，此時後段的能階反轉分布逐漸下滑，使得增益指數的曲線往下移動 (如圖 3 能階反轉分布較低的曲線所示的例子)，因此讓前向所產生的 C-band ASE 被吸收⁽⁹⁾。然而，此 ASE 在吸收的過程，即是將 ASE 功率再轉化為可供 L-band 訊號使用的能量，使得整段 EDF 對於 L-band 訊號而言，均處在放大的機制中 (長度上的平均能階反轉分布維持在 35% 附近)。所以我們可以發現，在設計一個寬頻 EDFA 系統時，C-band 訊號是不能經過 L-band EDFA 中的。不僅如此，也有許多研究者使用這個原理將 C-band ASE 或雷射光注入而被吸收，以提高 L-band EDFA 效率。

關於 L-band EDFA 的雜訊指數特性，由於 L-band EDFA 操作在低能階反轉分布的情況下，雜

訊指數一般而言比 C-band EDFA 要來得高。再加上其增益指數較低的情況下，輸入訊號對於放大器系統輸入端的損失十分敏感，一旦系統中的被動元件插入損失過大，或是光纖熔接損失沒有控制好，系統的雜訊指數就會有嚴重的影響，因此在設計 L-band EDFA 時，光纖的長度需要最佳化，其輔助幫浦光源 (例如前述 C-band ASE) 的靈活運用以及降低系統雜訊的問題，都需要在設計系統時加以考慮。

四、寬頻 EDFA 架構

欲設計一個寬頻 EDFA (或稱為 C+L band EDFA)，其方式有很多種。最直接的方式就是將 C-band 和 L-band 訊號分開，俾便由 C-band EDFA 和 L-band EDFA 各自放大，如圖 5 所示的架構。該架構的前端 (後端) 使用了一個可將 C-band 訊號和 L-band 訊號分開 (合在一起) 的波長分波器 (wavelength selective coupler, WSC)。在該圖中，C-band 訊號和 L-band 訊號分別由上方和下方的 EDFA 放大，而各自 EDFA 均含兩級放大架構⁽¹⁰⁾。此一寬頻 EDFA 的增益和 NF 對訊號波長的關係如圖 6 所示。這種寬頻 EDFA 架構的唯一缺點是在 C-band 和 L-band 間有一個數 nm 頻寬的地帶 (俗稱 dead zone) 是沒有辦法被使用的。這是因為在此頻帶的波長無法被 WSC 有效的分開 (以及合波)，故此頻帶不為使用。欲避開 dead zone 的問題，可以使用光纖光柵 (fiber bragg grating, FBG) 以及光循環器

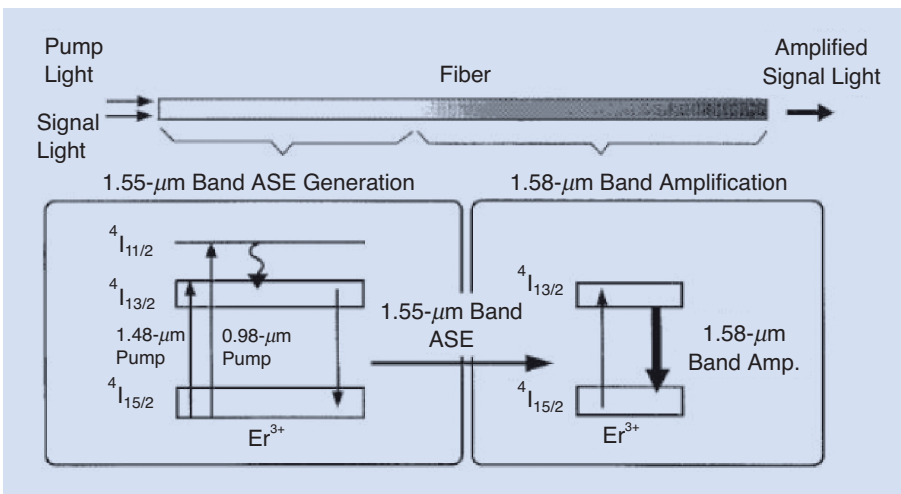
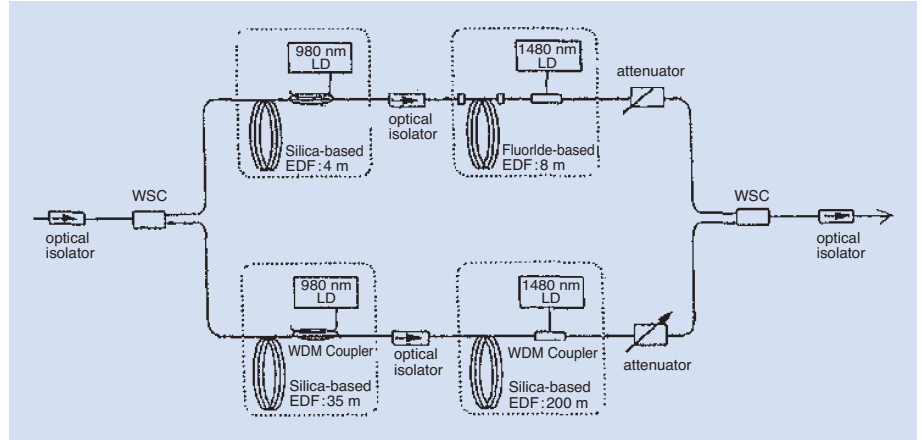


圖 4. L-band EDFA 放大機制示意圖⁽⁹⁾。

圖 5.

使用波長分光器 (WSC) 將 C-band 訊號和 L-band 訊號分開放大，然後再使用 WSC 將兩頻帶訊號結合於一路⁽¹⁰⁾。



(optical circulator)，將不同波長的訊號分開至不同路徑並受兩個不同 EDFA 放大 (例如其中之一放大 1530 nm–1560 nm 波長之訊號，另一則放大 1560 nm–1605 nm 波長之訊號)，圖 7 所示即為此一放大器系統⁽¹¹⁾。

五、EDFA 的性能

如上所述，寬頻 EDFA 包含了 C-band EDFA 和 L-band EDFA。C-band EDFA 的發展歷史可追溯自西元 1988 年起，在那之前已發展的光放大器有拉曼放大器 (Raman amplifier) 和半導體光放大器 (semiconductor optical amplifier)。前者需大功率幫浦光以得較大訊號增益，而後者的插入損失不小，均無 EDFA 有高增益且方便操作之優點。典型 C-band EDFA 的小訊號增益和 NF 頻譜 (gain and NF spectra) 如圖 8 所示，具約 30 nm 之放大頻寬，且其雜訊指數 NF 在 4 dB–5 dB 之間。這個增益頻譜顯示訊號在 1530 nm 附近有最高的增益。如果要得到平坦的增益頻譜，則須要使用增益等化器 (gain equalizer)

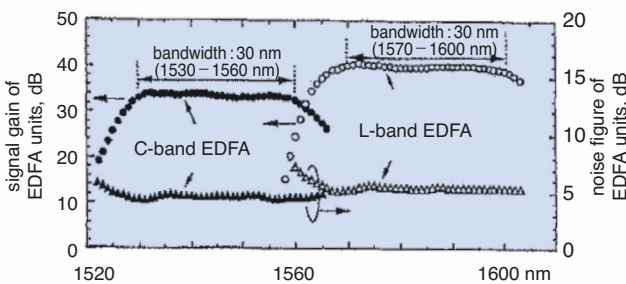


圖 6. 寬頻 EDFA 的增益和 NF 頻譜圖⁽¹⁰⁾。

或是使用非矽基 (non-silica-based) 摻鉕光纖，例如 fluoride-based 摻鉕光纖 (參考圖 5 之例；圖 6 之左邊曲線為其 C-band EDFA 的訊號增益和 NF 頻譜)。

至於 L-band EDFA 的研究亦起源很早，例如在 1990 年就有人以波長 1550 nm 的雷射光注入一段摻鉕光纖而實驗得到該 EDF 對 L-band 訊號具放大效果，其後此類 EDFA 的研究便蓬勃起來。這一類 EDFA 的接線架構有所謂 single-pass (如圖 5 中下行路線的 EDFA 架構) 和 double-pass 架構。對小訊號而言，後者可提供較大的放大效果 (例如可用較少的幫浦功率即得與 single-pass EDFA 相同的訊號增益，或者以相同的幫浦功率可得較大的訊號增益)。但 double-pass 的缺點是 NF 大得很多。而改良 NF 最直接的方式就是在 L-band EDFA 前加入一個具有非常低 NF 的前置放大器 (pre-amplifier) 來降低整體放大器結構的 NF，其架構如圖 9 所示之例。在此一架構中，L-band 主要的放大器是在光迴旋器與光纖迴路反射鏡 (fiber loop mirror；由

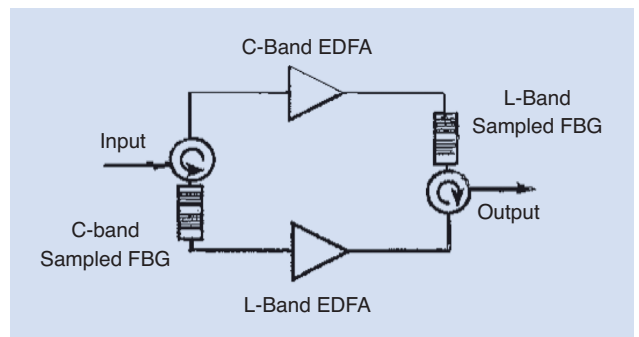


圖 7. 使用光纖光柵以及光循環器將不同波長的訊號分開至不同路徑並受兩個不同 EDFA 放大⁽¹¹⁾。

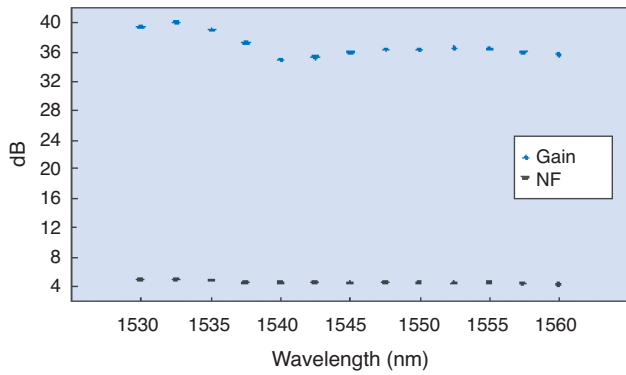


圖 8. 典型 C-band EDFA 的小訊號增益和 NF 頻譜。

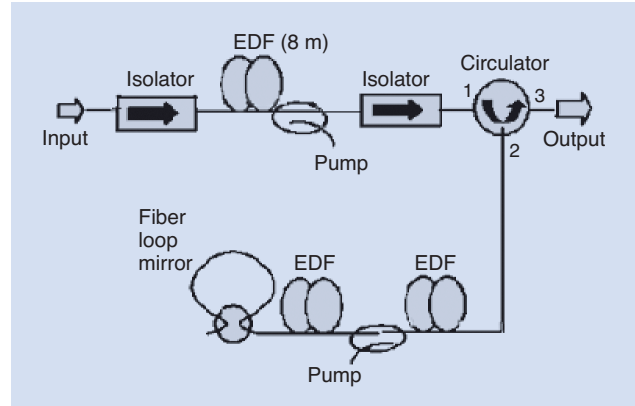


圖 9. Double-pass preamplified L-band EDFA 架構。

3dB coupler 組成) 之間，包含一段單向幫浦 (幫浦光的波長可為 980 nm 及 1480 nm) 的 EDF 和一段未受雷射幫浦的 EDF。圖中幫浦雷射所產生之逆向 (相對於該幫浦雷射光行進方向) ASE 是落在 C-band 的，正足以受利用而被另一段 EDF 吸收，亦即作為輔助幫浦光源，如此便有效利用了原本沒有用處的 C-band ASE。圖中光迴旋器 (circulator) 的 1-2-3 端代表光迴旋器的操作是光由 1 端進入由 2 端輸出，若由 2 端進入便由 3 端輸出。吾人也可以不使用該段未受雷射幫浦的 EDF，而令該 C-band ASE 直接由光纖迴路反射鏡反射而返回進入 EDF 作為輔助幫浦光源。圖例中 8 m 長的 EDF 受 980 nm 幫浦產生能階反轉分布而對 L-band 訊號產生放大作用。此一前置放大器屬於 C-band EDFA，在對 L-band 訊號產生的 NF 在 3.3 dB 至 3.8 dB 之間，因而整體放大器的 NF 可落在 5 dB 附近。L-band EDFA 也可採雙向幫浦結構，如圖 10 所示。該圖例的放大性能顯示在圖 11，可看出對大部分訊號波長 (例如從 1567 nm 至 1602 nm)，整體放大器的訊號增益可達 32 dB 以上，NF 在 5 dB 附近 (此座標

圖下方框框裡的標示為幫浦雷射的功率，依序為前置放大器的幫浦功率以及主體 L-band EDFA 的雙向幫浦功率)。

在圖 9 例子中，吾人可以發現前置放大器的幫浦雷射所產生的逆向 ASE (屬於 C-band，行進方向與幫浦光相反) 是被利用而作為主體 L-band EDFA 的輔助光源的。然而該幫浦雷射幫浦 EDF 後亦產生順向 C-band ASE 而未受利用，實為可惜。需知任何光源的產生是需要由幫浦雷射提供能量的，如果浪費了，便代表白白多花費了幫浦雷射提供的功率。因此為了利用該順向 C-band ASE 光源，吾人亦可將之導引至 L-band EDFA 中而形成輔助幫浦光源。這樣的系統，可由圖 12 案例展示⁽¹²⁾。在此圖例中，L-band 訊號光由光迴旋器之 1 端進入後由 2 端輸出，先經過前置放大器放大，然後由另一光迴旋器之 2 端進入 L-band EDFA。該 L-band EDFA 為 double-pass 架構 (單向幫浦光源可為 1480 nm 或 980 nm)，訊號光主要由它放大。在迴路反射鏡中，觀察到有一段未受幫浦雷射幫浦的 EDF。由前置放大

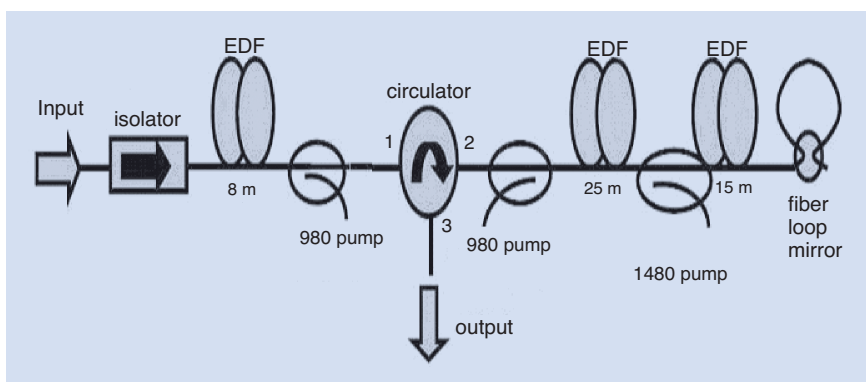


圖 10. 加入前級放大器，且 L-band 的主要 EDFA 為雙向受幫浦之 double-pass 結構。

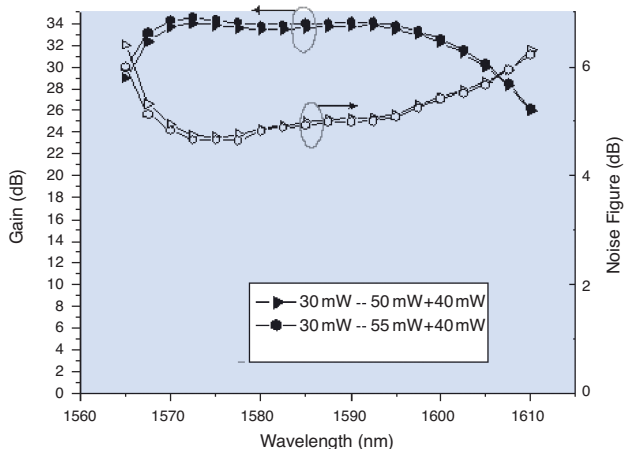


圖 11. 加入前級放大器，且調整為增益平坦的 EDFA。

器產生之 ASE 而與訊號光反向的部分會由光迴旋器之 3 端進入迴路反射鏡中的 EDF，因該 ASE 屬於 C-band 的光，將為 EDF 吸收，致使 L-band EDFA 的長度增加，它對 L-band 訊號所提供的增益就可以提高。L-band EDFA 的放大效率可提升，主要就是因為在系統中原本不要的 C-band ASE 被充分回收利用了。

六、結論

雖然 EDFA 發展的歷史不算短，而且 C-band 和 L-band EDFA 各別性能的改善研究也已有許多成果發表，然而筆者認為在 WDM 寬頻時代真正來臨時，寬頻 EDFA 的應用不可或缺，而且是處處可見，譬如其作為 PON 網路傳輸的光功率放大器 (booster amplifier) 和長距離傳輸的中繼放大器 (in-line amplifier) 等。在這些應用上，對於 EDFA 的性能依其應用而多有所要求，例如在寬頻長距離傳輸的應用上除了 NF 和增益的要求外，EDFA 還必須要具備增益箝制 (gain clamping) 和增益等化 (gain equalization) 的性能，更重要的是 EDFA 的成本價格必須下降。以研發的觀點看，如何達到高激發轉換效率 (pump conversion efficiency) 且兼具所有系統規格的要求是最重要的一步。此外，EDFA 在寬頻可調光纖雷射 (broadband tunable fiber laser) 和寬頻光源 (broadband light source) 的應用也相當重要。在這些應用上，亦必須達到高激發轉換效率的要求，如此在產業上方具競爭力。縱合上述，

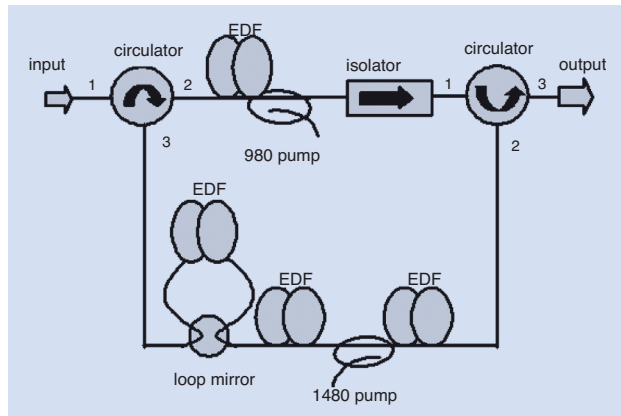


圖 12. 多多利用 C-band ASE 的例子⁽¹²⁾。

EDFA 的研究尚有許多可發揮的題材，尤其在寬頻這一領域，國內不論是學術界或工業界，只要投入人力皆可獲得很不錯的研發產品。

參考文獻

1. K. Inoue, H. Toba, N. Shibata, K. Iwatsuki, and A. Takada, *Electronics Letters*, **25** (9), 594 (1989).
2. N. A. Olsson, *Journal of Lightwave Technology*, **7**, 1071 (1989).
3. K. Suzuki, Y. Kimura, and M. Nakazawa, *Electronics Letters*, **26**, 948 (1990).
4. J. F. Massicot, J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie, and S. P. Craig-Ryan, *Electronics Letters*, **20**, 1645 (1990).
5. S. W. Harun, P. Poopalan, and H. Ahmad, *IEEE Photonics Technology Letters*, **14**, 296 (2002).
6. J. Lee, U.-C. Ryu, S. J. Ahn, and N. Park, *IEEE Photonics Technology Letters*, **11**, 42 (1999).
7. M. A. Mahdi and H. Ahmad, *IEEE Photonics Technology Letters*, **13**, 1067 (2001).
8. P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber Amplifiers*, Academic Press, San Diego, USA (1999).
9. H. Ono, M. Yamada, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, *Journal of Lightwave Technology*, **17**, 490 (1999).
10. M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, *Electronics Letters*, **33**, 710 (1997).
11. Y. Xie, Z. Pan, A. Willner, E. Salik, V. Grubsky, D. Starodubov, and J. Feinberg, *IEEE Photonics Technology Letters*, **13**, 436 (2001).
12. C. Y. Hung and Likam Wang, *Optics Communications*, **259**, 670 (2006).

• 王立康先生為美國賓州州立大學電機工程博士，現任於國立清華大學光電工程研究所教授。

• Likam Wang received his Ph.D. in electrical engineering from Pennsylvania State University, USA. He is currently a professor in the Institute of Photonics Technologies at National Tsing Hua University.