

光纖通訊基礎簡介(上)

一、光通訊簡介

1、使用光通訊技術的優點：

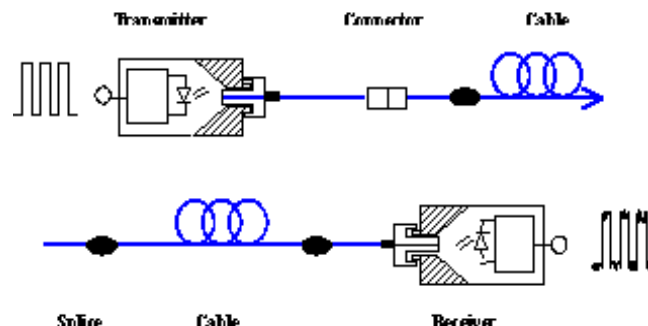
它是以光當作載波，透過光纖當傳輸介質將資訊傳遞至遠方。若以銅質同軸電纜與光纖作一比較，同軸電纜是搭配電磁波以數百MHz至數個GHz頻率，以類比的方式來傳遞資訊，但其載波頻率會受到20GHz理論值的限制；若以長距離光纖通訊而言，光的載波頻率可達193,000GHz。而傳輸資訊的頻寬取決於載波頻率，因此，若同軸纜線最大上限可以傳輸兩個10GHz的頻道，理論上，光纖則可以傳輸數以千計的10GHz的頻道。此外，光纖質輕直徑小，在光纜鋪設過程中可以節省空間，加上在傳輸的過程中的衰減比銅質導線低，以單模光纖而言，每公里衰減約為0.2~0.5dB，且對於光訊號在光纖傳輸過程中，對於電磁波的干擾較不敏感，因此適合高容量及長距離通訊。

2、應用的層次：

光通訊主要應用在電信網路、有線電視及數據傳輸方面，而電信方面的應用是最早的，例如越洋的通信，因其高容量及可靠度的優點，並可以在長距離(600km以上需要中繼器，最大可達9000km)傳輸時載上數以萬計的通話信號，因而有效的提昇通話負載量及品質的問題。有線電視方面，因所需求的頻寬較高，每個頻道的所需的影像頻寬約為6MHz(聲音頻道約為8KHz)，以光纖傳遞類比影像訊號，可以達到一百個以上的頻道，其中包括聲音、影像及互動的數據傳輸。而數據通信(Datacommunication)上面，則是現在最熱門的話題，隨著資訊時代的來臨，網際網路需要大量的頻寬來傳遞多媒體的資訊，從短距離(1~500m)的Gigabit網路卡、LAN，到中距離(1~20km)的MAN以至於長距離(60~600km以上)的越洋光纜都需要光纖的大容量來解決頻寬不足的問題，近年來，因網際網路Interent的盛行及遠距教學等實施，對於數據通訊的需求每年以倍數成長，而光纖通信系統架構則是最佳的選擇。

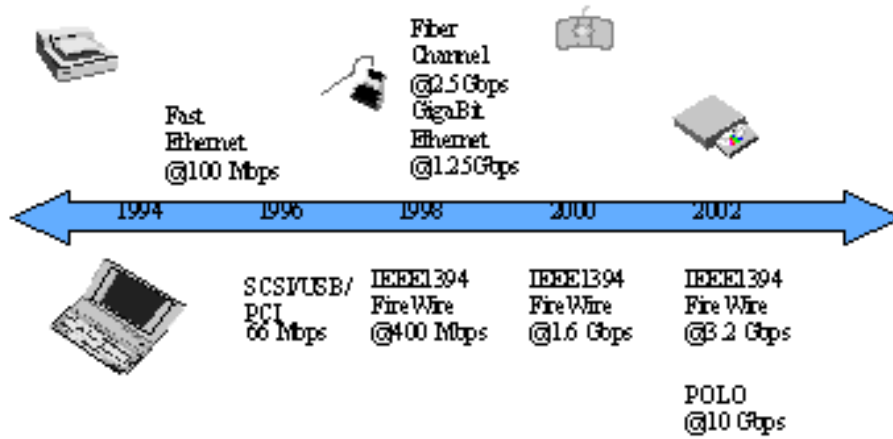
3、基本光纖通訊架構：

圖一為點對點光纖通訊的基本架構，基本上是由光收發模組及光纖所組成，首先我們利用數位或類比調變的方式將資訊載在發射器上，以光波為載波透過光纖將訊號傳遞至遠方，若距離較長，光纖則透過聯結器(Connector)或接合器(splice)方式延長，最後到達光感測器端，在注重雜訊與訊號比(S/N Ratio)情況下，並用clock recover的方式下將光訊號轉回電訊號，而將資訊解調回來。



4、數據傳輸趨勢：

圖二是數據通訊標準的演進過程示意圖，近年來，通信標準所定義的容量有逐年增加趨勢，主因是區域及全球對頻寬速度及容量渴望的影響，而光纖通訊的解決方案，對傳輸每單位Mb所需的成本也會逐年的下降。



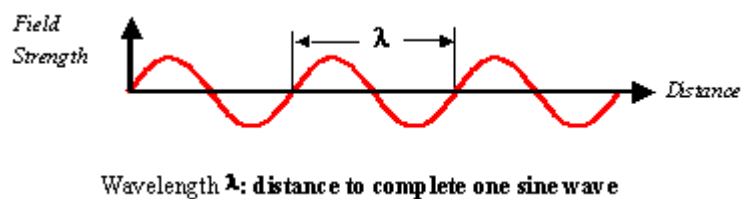
若以網路區域的大小來區分，會常見到幾個名詞：WAN(Wide Area Network)—國對國或全球長距網路、MAN (Metropolitan Area Network)—區域性或城市間通訊網路、LAN(Local Area Network)—一般使用者的電腦網路或使用路由器(Router)連結Internet、Dial-up Network—即一般個人電腦的數據機或電話所聯結的網路。一般來說，前兩者網路屬於通訊公司所有，用來處理數以萬計的電話通訊，而後兩者則與PC及數據通信息息相關。

二、光學物理特性：

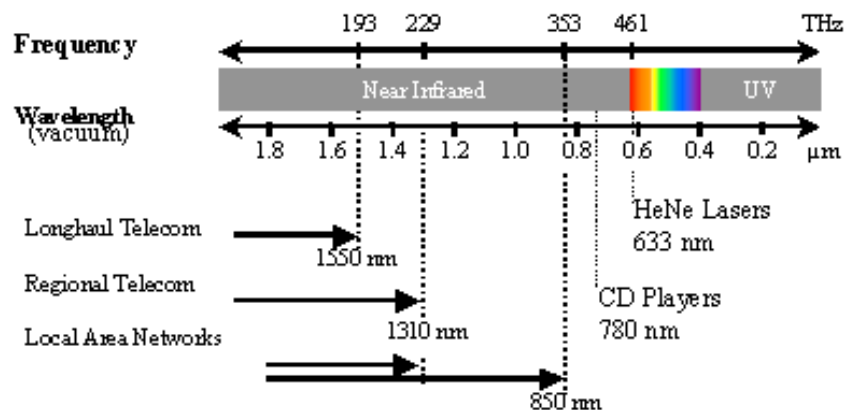
在光纖通信方面，我們是利用光當作載波(Carrier)，因此，再更進一步了解光通訊之前，應對光學的物理特性做一個概括性的了解，接下來，我們對光的物理特性應用在通信上基礎的知識做一簡單的介紹。

1、光通訊傳輸波段(Communication Band)：

基本上，我們可視光是電磁波的一種，若我們以sin波形來表示，則 λ 為其波長，如圖三所示。光速在真空中傳遞速率為 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，若在介電材質中傳遞(如玻璃)，會因折射率不同而速度變慢，波長也會因此而有所改變，但一般來說，波長皆是定義在真空的狀態下。



圖四則是一般常用的光譜波段示意圖，其中橫軸表示可為頻率及波長。因為光速=頻率 $\times$ 波長，所以頻率與波長對光速是為倒數關係，但在通訊上一般較常用波長來描述。舉例來說，若我們以現今DWDM通信波長1550nm (10^{-9} m)來估計，頻率約193THz(1THz=1000GHz)，如我們只利用到1%的頻寬，則頻寬可達193GHz！



2、光的功率(Optical Power)：

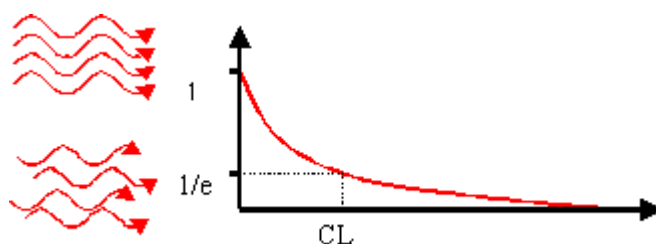
傳輸用的Laser power也有它相對應的規範，如國際標準的IEC825-1或美規CFR 1040.10等。一般光功率所使用的單位有mW及dBm兩種，前者為線性，後者是取log值。使用後者的好處是分析訊號時，可增加其動態範圍(Dynamic Range)使吾人在同一座標軸中分析時易於觀察，例如1000mW與2mW的訊號，兩者尺度差異為500倍，但若換成30dBm與3dBm，尺度在10倍左右而易於分析。而當我們分析兩個相對的功率時，則用dB來表示。

$$dBm = 10 \log(P / 1mW)$$

$$dB = 10 \log(P_2 / P_1)$$

3、同調性及干涉效應(Coherent & Interferent)：

此效應屬於光波動的特性，當考慮一同波長的光源，若組成光源的各光子間其相位(Phase)的相關程度越高，則表示同調性(Coherent)越高，而干涉或繞射的程度也會跟著提高。若同調性越高，當傳輸時較能保持一定的相位，例如Laser；而相關程度越低，光子間的相位較不易保持，呈random的現象，例如自然光及LED皆是。CL(Coherent Length)的定義則是光子間能維持相位同調的相關性長度。而干涉及繞射效應是當兩個不同的光子到達同一個位置時，因相位差異造成的建設性或破壞性干涉，使光強度有極大值或極小值的變化。



4、反射(Reflection)：

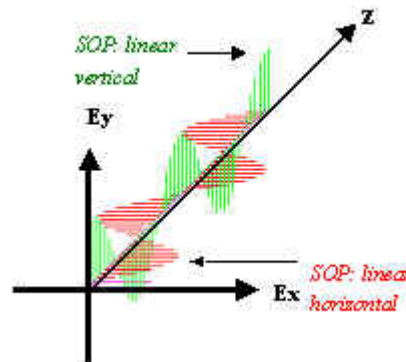
當光行進時遇到任何的斷面或是折射率不連續的地方，例如air gap、misalignment時，就會造成反射，當利用光做資料傳輸時，反射會造成兩個問題，第一是反射光源產生的雜訊會抑制傳輸的S/N比，第二是反射能量會造成Laser Source端的不穩定。若端面是兩個以上，因折射率不連續之故，則會產生二次或三次的反射現象，且端面距離若在CL的範圍內，則必需考慮光源強度或波長改變時造成週期性干涉的影響。反射損耗(RL Return Loss)的定義如下，其值越大表示越不易在端面上產生反射。

$$\text{Return Loss} = -10 \log \frac{P_{\text{reflected}}}{P_{\text{incident}}}$$



5、偏極化(Polarization)：

光可視為電磁波的一種形式，偏極則表示行進波在傳遞時的脈動方向，因電磁波在傳遞時，電場與磁場方向為正交(orthogonal)，因此在表示偏極化時一般以電場方向來定義，即 E_x 及 E_y ，若行進波一直維持在 E_x 或 E_y 軸行進，則稱此波為水平或垂直線性偏極，若行進波行進時會因時間改變做順時針或逆時針旋轉，則稱此波為右旋或左旋圓偏極。一般以SOP(State Of Polarization)來表示極化的狀態。而DOP(Degree Of Polarization)則表示單位能量所產生偏極程度，例如LED，其值相對的較小，表示偏極化程度較低，而自然光是各方同相性，視為無偏極化，但半導體雷射光源的極化程度較高，可達90%以上。



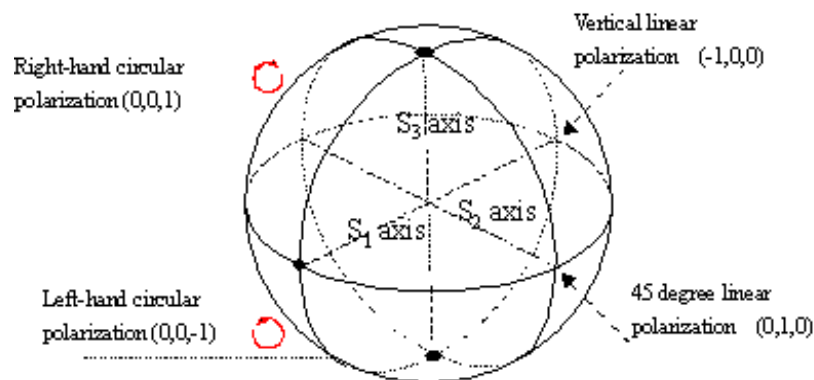
基本上，任一偏極可分成 E_x 及 E_y 兩個分量，但兩個分量的相位差為0或180度則為線性偏極，而圓偏極是由兩個等量的 E_x 及 E_y 所形成，但當 E_x 及 E_y 分量在波行進時相位角相差90或270

度時，因兩分量相位差而使偏極會隨時間有週期性的變化，若兩分量大小相等稱為圓偏極，若大小不等便是橢圓偏極。另一種情況下，當兩分量相位差並不為90度的整數倍時，都有可能形成橢圓偏極。因此，當我們對偏極光源應用 $\lambda/4$ 或 $\lambda/2$ 的延遲片(使相位角延遲90或180度)，便可以將圓偏極分解成兩個線偏極，或由某個偏極化狀態轉移至另一個偏極化狀態。

對於偏極化系統的計算表示方式有許多種，如Muller Method 的矩陣或Jones's矩陣方式，但因為是數學形式，我們不易從數學模式的換算中得到訊息，而Poincaré Sphere則提供了一個容易辨別極化狀態及程度的圖表，類似RF的Smith Chart，吾人從圖中便能很快的知道極化的狀態。這是利用Stoke參數來表示，此參數共有四個值，分別為 (S_0, S_1, S_2, S_3) ， S_0 代表能量的大小， S_1 代表水平或垂直線性偏極， S_2 代表+45度或-45度線性偏極， S_3 表示右旋或左旋圓偏極，其如圖九所示。若相位差或強度不同的橢圓偏極，它就不會出現在這三個軸上，而可能在圓中的任一點，若點出現在三個軸的中心，就表示此為無偏極化，它的好處在於我們可以記錄或分析極化從一個狀態轉變到另一個狀態的過程。

一般來說，光會隨著介質的邊界條件而改變極化的狀態，亦即當我們送入一偏極化光源至光纖中時，若對光纖做溫度或應力的變化，便會改變極化的狀態，若要維持極化的一定性，就需採用PM(Polarization Maintain)光纖。

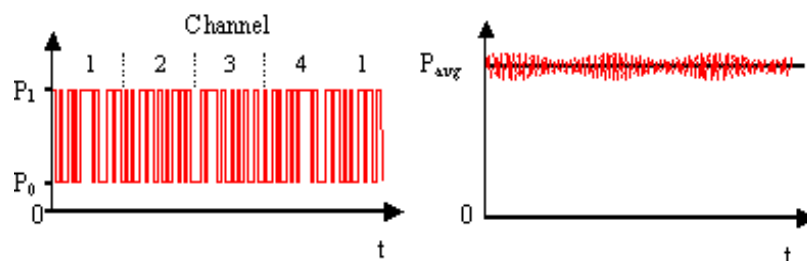
另外，在光纖通訊方面，水平偏極與垂直偏極所傳輸的速度會有些許差異，這是我們因為可視光纖為一種birefringent，這個差異，會在高速資料傳輸時造成信號延遲失真，一般稱為PMD(Polarization Mode Dispersion)，關於這方面，我們在光纖部分再做解釋。



6、數位及類比訊號調變(Digital & Analog Modulation)：

數位調變：利用兩功率切換的方式做訊號的調變(即0與1)，若以Laser來說， P_0 並不一定代表無光源輸出，而是比Threshold偏壓稍高，如此Laser才能在高速反應下操作。一般在Transceiver上會量測到消滅比例Extinction Ratio($ER=P_1/P_0$)，這可以反映出S/N比，另外，在通信上常用到時域分工TDM(Time Division Multiplexing)，如同無線通信GSM的原理，將時域分成數個Channel，每隔一段週期性時間後便輪到下一位User，另外是常被鑑定為通信品質依據的位元錯誤率Bit Error Ratio($BER=N_{\text{error}}/N_{\text{correct}}$)，定義是傳輸一個數目的位元資料下產生錯誤的數目比例，例如若傳100個位元，經過數位調變後產生一個位元的錯誤，則BER為 $1E-2$ ，一般在通信的標準為 $1E-9$ 至 $1E-12$ 甚至到 $1E-15$ 。

類比調變：類似AM調變的方式，將RF訊號透過Mixer將資料利用類比方式載在Laser上傳輸，以CATV較為常用，因功率調變方式會使系統對於反射相當敏感，因此其光纖連接頭大部分為斜角端面(如APC)，目的是使反射減少。



三、通訊規範(Communication Standard)：

通信規範的制定是為了提供系統及元件製造商能夠整合為目的，大致包含測試設備的相容性、各種通訊參數的定義、標準測試步驟及方法、各種資料協定間的聯結、傳輸品質提昇及合工/分工器(Multiplex/Demultiplex)系統效能提昇等。通信規範的理念來自於七層網際網路通訊協定(Internet Protocol)中的實體層(Physical Layer)，此為最基本的硬體規範，如功率、傳輸速度(Bit Rate)、抖動(Jitter)等，進而由此延伸到電路功能設計及光元件方面各種參數的定義。

以下是對於通信的標準規範做一簡單的介紹：

1、PDH(Plesiochronous Digital Hierarchy)

PDH是SONET的前身，早期在60年代的通訊用途中，資料傳輸屬於點對點模式，因此沒有一定的通訊標準，但當各地區的區域性的電訊要匯入較大的資料流量做長距離傳輸時，因各地區資訊的時脈速度不盡相同，而會造成傳輸上時間間隔(time interval)的問題，當時的解決方式是在資料間隔時間較長的時脈中加入假的字元，使資料傳輸能有類似同步的效果，不過這會有許多缺點，如在高速傳輸的系統中較不易上傳或下載速度較慢的資料，另外，沒有標準的規範，使得編碼或傳輸介面的問題也無法獲得有效的解決。

2、SONET/SDH (Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy)

SONET最初是由美國的Bell公司所制定，目的是資料從主幹到達各區域的分支點時仍能夠維持通訊時脈的一致性，它的架構是以125ms為規律的一個時間區隔，越高的資料傳輸速度，其單位時間內載的字元數也相對越多，但仍以125ms的時脈為基準。而SDH則適用北美以外的區域，而由歐洲所制定，目的是在國際間的傳輸上也有相同的標準，而此規範允許當一定範圍的資料速度由不同管道匯入或匯出多工(Multiplex)資料流量時，不需要解多工(Demultiplex)就可以直接做傳輸。

3、DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) Standard

典型的光通訊，是採用單一載波單方向傳輸資料，但因為滲餌光纖放大器(Erbium Doped Fiber Amplify)的問世，使得同一條光纖內容許許多載波同時存在傳遞資訊，此標準的定義大部分是由ITU(International Telecommunication Union)所制定，目的是為了保證不同波長的載波之間功率的穩定性並避免各通道載波之間的串音(cross talk)造成信號的失真等。例如ITU G.692 就定義各通道(channel)之間的區間以100GHz為標準(即兩載波間間隔為0.8nm)，且固定以193.1THz(約為1550nm)為標準頻率向上或向下延伸，例如我們以193.1THz當作第一個通道，並以100GHz為間隔開四個通道，則下一個載波頻率便為193.2THz、193.3THz、193.4THz。另外，TIA協會制定的是以50GHz為間隔的標準。

4、ATM(Asynchronous Transfer Mode)

這可看成是一個多功能的技術，它的目的在於能夠有更廣泛的應用層次，使不同的傳輸模式皆能通用，而使現有的通訊容量最佳化，它可以在PDH或SONET/SDH下執行，若我們將SONET/SDH看做為資訊的基礎架構，則ATM則是加強了切換的服務功能。

下表一為常見的通訊傳輸速度規格：

SONET/SDH Rates		PDH	
OC-3, STM-1	155.52 Mb/s	North America	
OC-12, STM-4	622.08 Mb/s	DS1	1.544 Mb/s
OC-48, STM-16	2488.32 Mb/s	DS2	6.312 Mb/s
OC-192, STM-64	9953.28 Mb/s	DS3	44.736 Mb/s
		DS4	139.264 Mb/s
Datacom Rates		Europe	
FDDI	125(100) Mb/s	E1	2.048 Mb/s
FireWire	100-800 Mb/s	E2	8.448 Mb/s
Fiber Channel	266-1063 Mb/s	E3	34.368 Mb/s
Ethernet	10 or 100 Mb/s	E4	139.264 Mb/s
G-Ethernet	1250 Mb/s		

另外，下表二是制定DWDM標準的組織其網站及所設定的部分規範簡介。

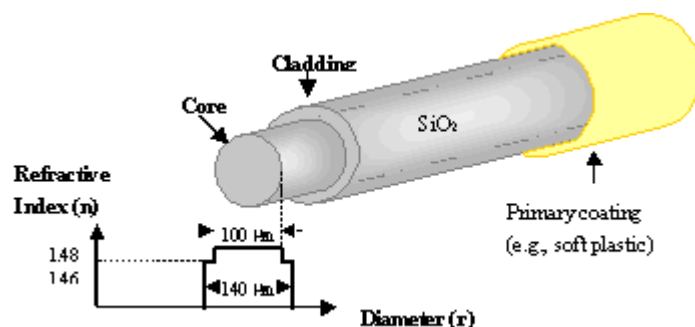
ITU-T	http://www.itu.ch
G.691	Optical interfaces for single channel SDH systems with optical amplifiers
G.692	Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifiers
G.957	Optical interfaces for equipment and systems relating to SDH
Telcordia	http://www.telcordia.com
GR-253	SONET transport systems: Common generic criteria
GR-1377	SONET DC-192 transport system generic criteria
IEC	http://www.iec.ch
61290	Basic specification for optical amplifier test methods
61291-1	Optical fiber amplifiers – Part 1: Generic specification
TIA	http://www.tiaonline.com
TIA/EIA-526-4A	Optical eye pattern measurement procedure

四、光纖特性及相關元件

在光纖通訊領域中，所用到的傳遞媒介皆以光纖為主，依材質有分為塑膠及玻璃兩種，因考慮到的因素不同而有不同的選擇，前者大多用於短距通訊如個人電腦網路、視聽設備等，主要考量因素在於價格，而後者大多用於長距離通訊如城市及城市間甚至到越洋海底光纜等，主要考量因素在於損耗及傳輸品質，另外對於環境的要求也較為重視，例如海底光纜其外披覆層材質就應考慮到抗海水腐蝕性，而目前最熱門的DWDM的系統採用的光纖皆為玻璃材質。若單就傳輸的部分來說，光纜有包含光纖、接合器(Splice)及連接器(Connector)等，而本段就針對光纖的特性部分做一介紹。

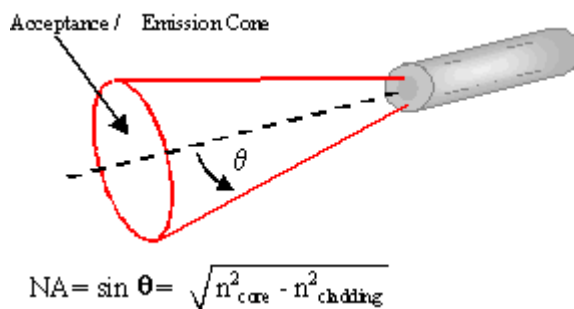
1、光纖簡介

光纖基本上是由折射率約1.5左右的核心層(Core)與披覆層(Cladding)介電材質所組成(折射率refraction index可以 n 來表示)，它的地位相當於微波通訊中的阻抗(Impedance)，在光纖製作過程中要維持折射率的一定，其目的是要光在傳播時在核心層內造成全反射，而使光在彼端傳輸損耗達到最小。一般核心層的折射率要比披覆層稍高，而披覆層主要目的是使光在全反射時，使核心層端與外界所造成的肌膚效應(skin effect)達到最小損耗所設計。若以折射率分析，光纖有分為步階式(SI Step Index)與漸進式(GI Gradient Index)兩種，以圖十為例，表示為100/140 μm 的步階式光纖(前表示核心層直徑，後表示加上披覆層直徑)。一般此種核心層直徑大小的光纖有石英材質(SiO_2)及塑膠壓克力材質(PMMA Polymethyl methacrylate)兩種。



2、數值孔徑(NA Numerical Aperture)

光纖的數值孔徑是表示在何種角度下的光源耦合入光纖時可以在核心層端內造成全反射，若我們用Snell定律可推導出數值孔徑大小，如圖十一所示。若以量測方面來定義，它是從光纖發射出 $\sin\theta$ 光源強度分布中的半波寬為值，它代表著當光源耦合入光纖時的難易度，由此，我們也較清楚知道光學元件製作時應採用何種聚焦透鏡，一般來說，上述步階式光纖NA值約為0.3~0.4左右。

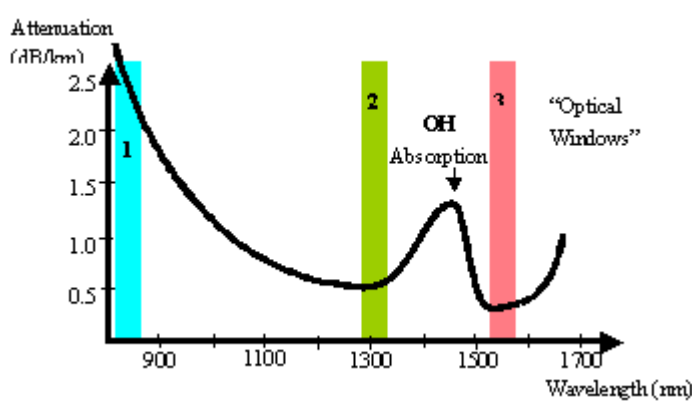


3、石英(SiO_2 Silica)光纖對波段的吸收

圖十二為石英光纖在不同波長的光源下，每單位公里所造成的衰減示意圖，造成衰減的主要原因有下列三種：瑞立散射(Rayleigh scattering)、吸收(Absorption)及光纖內部的微彎曲(Micro bending)。分述如下：瑞立散射是造成光纖衰減的主因，主要是因為光纖的結構是玻璃材質，其結晶成分是非均勻性的，因此造成光在傳播中

會有散射，這種現象會隨波長越長而衰減越小；而吸收有來自光纖製作時的不純物與水分滲入的影響，其中以水分子吸收影響最為明顯，因水分子的氫氧基鍵結會對1.39μm部分波長光源產生吸收，因此在光纖通訊中，較不常用此一波段，但近年來光纖製程有所改進，而可以將此吸收部分降至趨近於零；第三種來自於光纖製程時內部應力產生的微彎曲造成的衰減，它出現在所有的波段中，應在光纖製程上盡量避免此一效應。

從圖十二中的三個區域，是光通訊最常使用的波段，第一個波段衰減最大，不適合做長距離傳輸，第二第三衰減較小，其中1550nm左右波段有衰減的最小值，因此最適合做長距離傳輸。



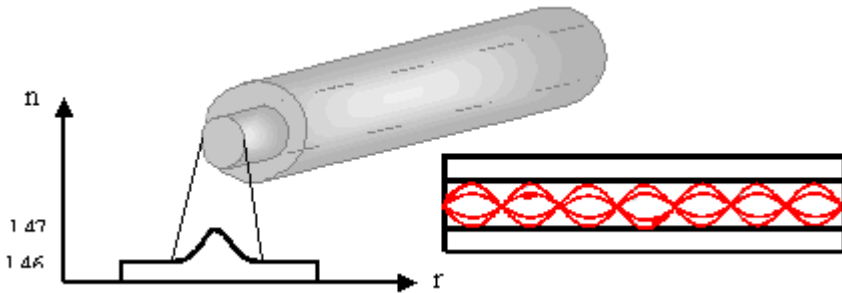
4、多模及單模光纖

光是電磁波的一種，而光纖可視為是電磁波的波導(Wave-guide)，若我們以邊界條件的概念來推導入射波的傳遞模態(propagation mode)，在固定波導直徑大小下，當某個頻率以下(波長以上)的傳輸時，波導內只容許一個路徑傳播，我們稱此頻率為截止頻率(Cutoff frequency)或截止波長(Cutoff wavelength)，在截止波長以上只有一種傳遞路徑者稱為單模(SM Single Mode)，以下者(有兩種以上傳輸路徑)稱為多模(MM Multi Mode)。

以850nm的波長為例，100/140μm步階式光纖可以有數千種以上的模態(如TE₀₀、TE₀₁...為其中兩個模態，而一個模態代表一個傳輸的路徑)，因此光在傳輸時有數千種路徑可選擇，而造成多模失真(Multimode Dispersion)，而使得傳輸能力限制在每公里20Mb/s，若為塑膠光纖則會受到約每公里5Mb/s的上限，因此限制了上述步階式直徑的光纖傳輸極限，但卻因為製程所需費用較節省而適用於短距傳輸上，如LAN、汽車內部通訊或視聽音響系統中。

解決多模失真的方案是採用漸進式折射率光纖，如圖十三所示，其核心層中央的折射率較大，而靠近披覆層的折射率較小，因光在折射率大的介質中速度較慢，因此在不同路徑下，到達的時間趨於一致，而使模態失真減少，一般常用的漸進式折射率光纖有50/125μm與62.5/125μm兩種，其傳輸能力可以提高到每公里1Gb/s。

前提到在截止波長以上稱為單模光纖，若以1300nm或1550nm為截止波長，其相對應的光纖為9/125μm與10/125μm兩種。理論上，傳輸能力可達到每公里1000Gb/s，但因有其他原因(CD、PMD)，使得單模光纖傳輸速度無法完全達到1000Gb/s。



表三為各種類光纖規格大略比較表：

材 質	石 英	光 纖	塑 膠
折 射 率 型 態	步階式	漸進式	步階式

模 態	多模	多模	單模	多模
直 徑 比 (舉 例)	100/140 μm	50/125 μm	9/125 μm	3mm core約80%
數 值 孔 徑	0.3~0.4	0.2	0.1	0.3~0.5
每公里傳輸速度	20Mb/s	1Gb/s	1000Gb/s	5Mb/s
使用波長 (n m)	850	850、1300	1300、1550	650、780、850
使 用 光 源	LED	Laser、LED	Laser	LED
每公里衰減 (d B)	3~10	0.5~3	0.2~0.4	20~50

5、色散(CD Chromatic Dispersion)

當光在同一介質中傳播時，因波長的不同而造成速度上的差異稱為色散，例如白光穿透三菱鏡時所造成分色的光譜便是一例。因任何耦合入光纖的光源並非絕對單一的波長(Laser也不例外)，因此這種速度上的延遲便會造成失真，因此在我們就必須要量測它並加以補償。以單模光纖為例，色散所造成的延遲約為數十ps (nm*km)，即光源越純，色散失真越小(多模光纖也有此現象，但其模態失真延遲時間的數量級約為10ns = 10000ps，數量級遠大於CD，因此可以不考慮此一影響)，此種失真會使傳輸速度在10Gb/s以上或傳輸距離數百公里以上時會有相當大的影響，補救的方法一般採用布拉格光纖(FBG Fiber Bragg Grating)做補償(後述)。

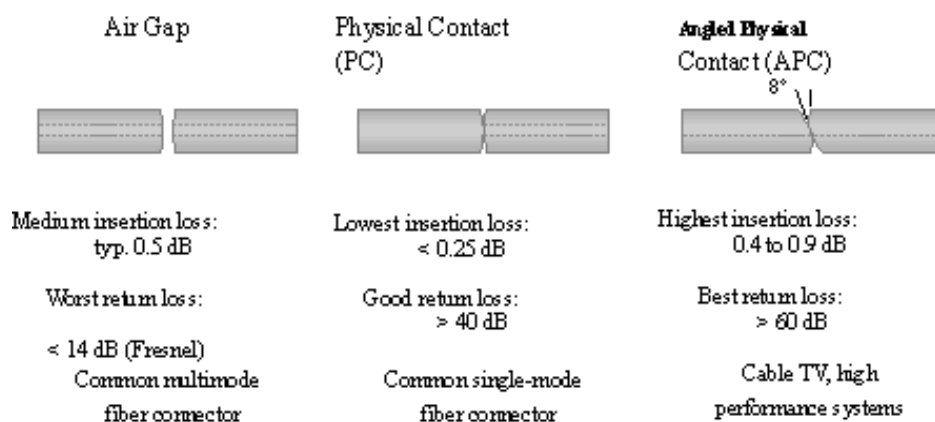
6、偏極化模態失真(PMD Polarization Mode Dispersion)

考慮單模光纖在單一波長光源傳輸下，雖然為同一傳輸路徑，但偏極化卻不一定為同一方向，若將此向量分成水平與垂直軸來看，偏極光在此兩方向傳遞速率不會一致，而造成訊號時間延遲，約為數個ps(nm*km)，基本上，在光纖中是無法做事後的補償，因此在製程上就要盡量避免此一現象。而在高速通訊系統中如DWDM，便會要求整個系統的品質，而在某些元件上，也會需要減少此一訊號延遲失真。

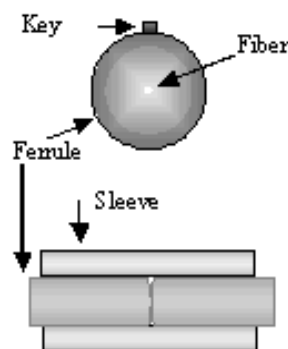
另外一個常見的量測是偏極化耗散(PDL Polarization Dependent Loss)，以光纖為例，因偏極光在傳輸時其偏極的方向會隨光纖應力、彎曲及本身材質特性而使極化方向改變，而極化方向會使光感測二極體(PD Photo Detector)所得到的光電流會有誤差，因此在高速傳輸中此一參數的要求也日形重要。

7、聯結器(Connector)

光纖在製作過程中有一定的長度，當我們鋪設光纜或與其他光學元件接合時，就需要聯結器或接合器做轉接或延伸，因聯結器會造成輸入損耗(IL Insertion Loss)及反射而使元件性能降低。依型態分為Air Gap、PC (Physical Contact)及APC(Angled Physical Contact)三種，Air Gap型態聯結器如BICONIC型，IL為0.5dB，RL約為14dB；PC型態如FC/PC型，將光纖端面研磨成球面，IL為0.25dB而RL約為40dB，相較前者更適合於長距離通訊，其中APC聯結器因光纖切面8度角而使反射損耗增大，尤其對於反射要求較嚴苛的CATV產業來說是相當重要的。



圖十五為聯結器剖面圖，它需要有非常精密的機械加工技術，以單模光纖聯結器為例，需使光纖放置在套筒(Ferrule)中，一般直徑約為2.5mm，其誤差要維持在約1 μm 以內，才能讓兩端光纖之間的偏移offset、不一致性misalignment達到最小。依其材質有分為陶瓷、金屬及塑膠三種，其中以陶瓷的精密度最高。其型態依各公司產品不同而有分別，彼此並不相容，一般說來，主要有SC、FC/PC及ST三種。



8、接合器(Splices)

一般有分熔接式或機械式兩種，熔接式一般採用熔接機將兩段光纖對齊後用電弧放電方式將兩段光纖熔接在一起，機械式一般採用V型凹槽使光纖對齊後用折射率匹配膠黏在一起。它與聯結器最大的不同在於它是固定不可拆卸的，因此不論售價及生產技術上都較簡單，一般熔接方式的輸入損耗約為0.01dB而機械式接合的輸入損耗約為0.1~0.5dB左右。

因篇幅的關係，我們將內容分為數個段落，其後是介紹光通訊中主動元件、被動元件及DWDM系統。

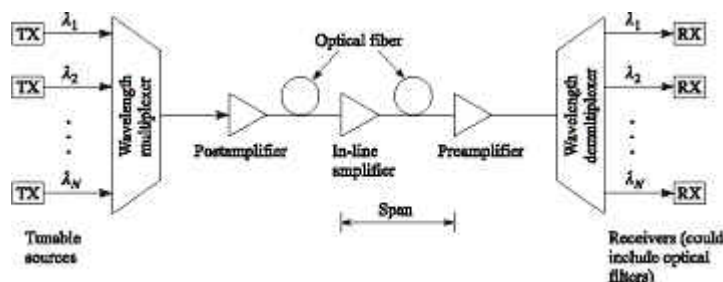
參考書籍：

- 1、Dennis Derickson, 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Hewlett Packard Company
- 2、Stamatios V. Kartalopoulos, 2000, *Introduction To DWDM technology*, Lucent Technologies, IEEE Communication Society, Sponsor
- 3、Keigo Iizuka, 1995, *Engineering Optics 2nd Edition* Chapter 13, Springer Series in Optical Sciences Vol35
- 4、董德國、陳萬清譯, 2000, *光纖通訊*, 東華書局
- 5、趙凱華、鍾錫華著, 1997, *光學*, 儒林出版
- 6、白中和編譯, 1995, *光纖通訊技術*, 建興出版

光纖通訊基礎簡介(中)

安捷倫科技 / 祁子年

此為一個DWDM的系統，主動元件扮演著收發及增益訊號的工作，圖中TX為發送器Transmitter，RX為接收器Receiver，而由各個波段的發送器將利用合波/分波器Multiplexer / Demultiplexer，將各載波匯入同一條光纖作傳輸，因長距離光纖傳輸會有損耗，因此到一定的距離以上就必須用增益器Amplifier來作放大訊號的工作，以現今常用在長距離傳遞的放大器有滲鉕光纖放大器(EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier)或半導體光纖放大器(SOA Semiconductor Optical Amplifier)等。若我們將收發模組(Transceiver)內僅單波段傳輸，即可視為LAN所使用的Gigabit Ethernet，以下便是針對主動元件中的收發系統及滲鉕光纖放大器部分作一介紹。

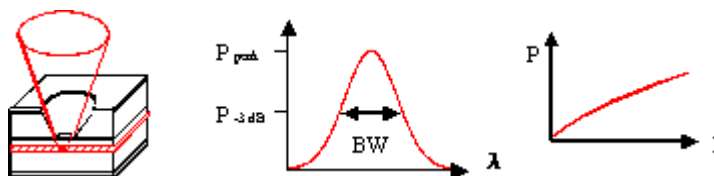


五、光收發模組(Optical Transceiver)

收發模組又可分為發送及接收部分，首先就發送部分作一介紹：

1、發光二極體(LED Light Emitting Diode)

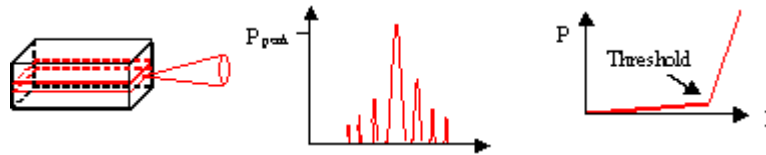
發光二極體是最早被用來作光纖通訊傳輸的光源，傳輸用的光源波段主要有有780、850及1300nm等，最常用來設計為短距離(數十至數百公尺)的資料傳輸如G-Ethernet、Fire-wire，作為短距通訊主要原因除了製程簡單、價格便宜外，另外是因為二極體本身的特性，如光功率較低(約為數個 μW)，且光源的數值孔徑較大的關係，因此大多配合玻璃或塑膠材質的多模光纖使用。其製程方式較為簡單，大多屬於面射型(Surface Emitting)模式，也有屬於邊射型(Edge Emitting)的二極體，兩者的差異在於後者由邊射方式，提供的功率較大。如下圖二是二極體剖面圖、光源特性及功率曲線示意圖，其3dB的功率波段線寬約為數十nm左右，當負載電流時，其產生的光功率是與電流大小成正比。



2、FP雷射(Fabry Perot Laser)

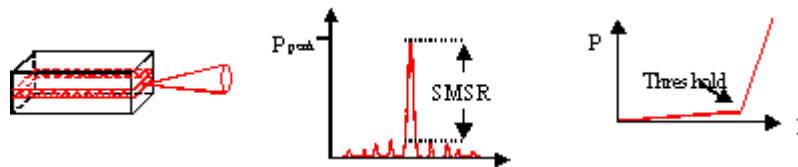
FP雷射是最早用為通訊的雷射二極體(LD laser Diode)，一般常見的波段為850、1310nm，對應的光纖可為單模或多模光纖，因其高功率(約數個mW)、低波段線寬(Spectral width)的特性，使其可作為較長距離的光源(一般Telecommunication約30公里左右)，雷射光源與二極體在結構上最大的不同是雷射是共振腔體的結構，簡單來說，吾人提供的電流可使腔體內的電子因能階的躍遷而放出光子，腔體端面可想作是兩面平行的鏡子(即圖三光源發出的兩端面)，內部折射率較空氣為高，造成光子在腔體內匯聚，當能量累積到達一定程度就會發射出來，因此會有所謂的臨界電流(Threshold)的現象，一般來說，雷射二極體到達臨界電流而產生足夠的光源需要10ns~10 μs 躍遷的時間，因此一般高速的傳輸都是操作在臨界電流之上作信號的調變。另外，因腔體內部的材質的增益特性及光波動共振的特性，使其空間的波段線寬為數個縱向模態(MLM Multiple

Longitudinal Mode)，若腔體的長度改變，也會使得縱模間距跟著改變，一般增益線寬約為3~20nm，模態間距約為0.7~2nm。



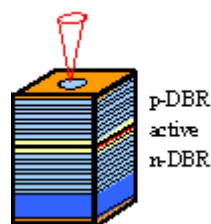
3、DFB雷射(Distributed Feedback Laser)

DFB雷射是現今用作高性能的通訊光源，其結構及光電反應的特性皆與FP雷射類似，通訊傳輸皆操作在臨界電流之上，大部分波段在1550nm左右，與FP的結構不同處，是DFB沿著共振腔體外部加上一層光柵(Grating)，使雷射光僅允許單一波長光源存在於腔體中，我們稱為單一縱向模態(SLM Single Longitudinal Mode)，此一特性，使得產生的功率(3~50mW)及線寬(0.8~0.08pm)方面較FP雷射更為優越，但價格也是商品化光源中最昂貴的。因單一縱模光源與單模光纖模態圖形較一致(皆近似高斯分布曲線)，使得與光纖耦合效率提高，加上單模光纖低耗損的特性，使得DFB雷射更利於遠距離傳輸。另外，因DFB雷射內部結構的光柵使然，使得主光源旁的其他縱向模態相對比值SMSR(Side Mode Suppression Ratio)較高，約為50dB左右，因此可視為單一波長的理想光源，若同一光纖內容許不同的DFB雷射光源傳輸，便可達成所謂的分波多工(WDM Wavelength Division Multiplexing)系統，而今日DWDM中傳輸的光源便是以DFB雷射為主。



4、VCSEL雷射(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

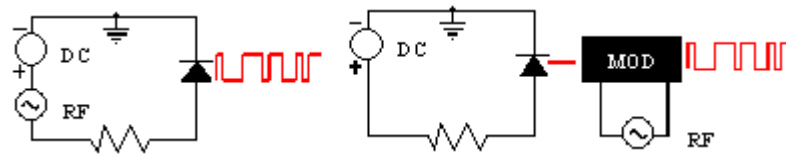
FP與DFB雷射雖有許多優點，但因發光源屬於邊射型，使耦合入光纖的能量因封裝等因素而有損失，而VCSEL雷射則結合LED與雷射的優點，它利用半導體製程的方式，在主動區之間製作40~60層，厚度約 $\lambda/4$ 的P-type及N-type的分散式布拉格反射(DBR Distributed Bragg Reflector)共振腔體，使得3dB線寬可以控制在1nm以內，另外，雷射的共振腔體為垂直模式，加上發射模態與光纖一致，如此一來便可以應用在豬尾巴(Pigtail)的封裝上，增加耦合效率，並能降低封裝及生產製程的成本，一般使用在波段在780~980nm之間，光功率比FP、DFB雷射稍小，約為0.1mW左右，線寬介於FP及DFB之間，可以視為單一縱向模態光源。



5、調變原理

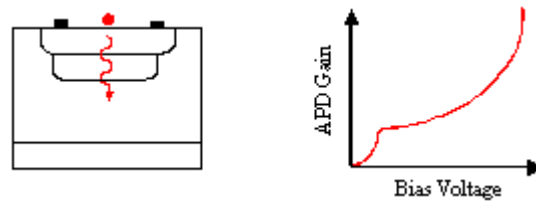
一般調變的方式有直接調變與外加調變兩種，如下圖五所示，直接調變的方式最為簡單，也最常用於通訊系統中，它是利用阻抗匹配的方式，將調變的RF信號直接載入雷射中，並利用Bias Tee的方式，提供DC電流供應雷射發光所需的能量，但此種調變的方式會因為雷射的頻擾(Chirp)效應而使調變頻寬約達2.5GHz左右便有一個極限，頻擾主要原因是直接以電流負載的快速調變方式，會影響雷射腔體內部的電子密度分布改變進而影響腔體內部的折射率，造成發射光源波長受到擾動之故，此種效應會使擾動範圍高達1nm，在長距離通訊上會造成色散現象，進而產生訊號的失真。因此為了解決此一頻擾現象，外加調變的方式便應運而生，此種方式，雷射只扮演光源載波的提供者，RF信號則透過Mach-Zehnder原理或Electro Absorption方式，前者是將光源分成兩個路徑，利用光電調變的方式，使其中一個路徑內的折射率隨RF變化而造成相位延遲，若控制折射率變化使兩個光路徑的相位差在0度與180度之間切換，當兩路徑匯聚在一起時便會產生建設性或破壞性干

涉而達到調變的目的，此種調變方式因線性度低較適用數位訊號而不適於類比訊號。後者是比較商業化的產品，它的結構分成兩部分，前端是由半導體雷射提供穩定光源，後端則加入衰減器，而衰減器則隨調變訊號而增減而達成調變的目的，它的缺點是會使雷射的線寬加大，但優點是不需高驅動電流及價格較便宜而應用在通訊網路上。



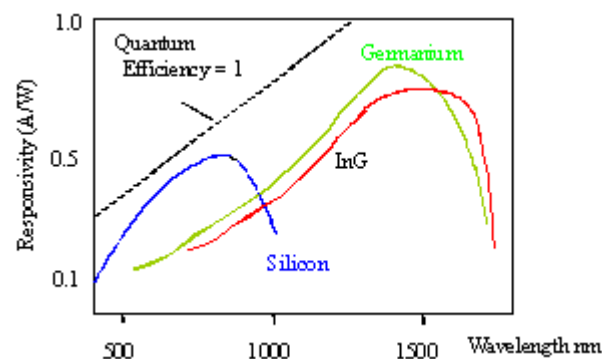
6、光感測二極體(PD Photo Diode)

相對於LD及LED為光收發模組的發射端，光感測二極體便是接收端，它的操作方式是提供感測二極體一個逆向偏壓，此時相當於內部如同電路中的開路，當入射光子在到達本質層(Intrinsic layer)後，會提供足夠的能量因量子效應產生電子、電洞對而產生電流，此時電流大小將正比於光的強度，一般我們考慮二極體良窳有截止頻率(cutoff frequency)、暗電流(dark current)、光電雜訊、光電轉換反應時間(timing response)、光靈敏度(photo sensitivity)等，其中截止頻率與光電材料特性有關，即光二極體所能感測到的最小光波長。暗電流意義是在沒有任何光源存在的環境中，二極體內部會有因為逆向偏壓產生的熱效應造成自由電荷的情形，通常暗電流大小會隨溫度及元件老化而有變化，一般在量測上會使用歸零的動作將暗電流作一補償。而對於光電反應時間及光靈敏度兩者，就引申出兩種主要的結構，PIN(P-layer、Intrinsic-layer、N-layer)及崩潰光二極體APD(Advanced Photo Diode)兩種，兩者結構類似，PIN中的光電反應類似於R-C充放電，因此電容的效應會限制反應速度，但其優點在於低雜訊、高線性反應度，而APD的結構因為在結構內部會產生二次電子、電洞對的放大作用，因此有較高的靈敏度及高反應速度，但缺點是雜訊較大。



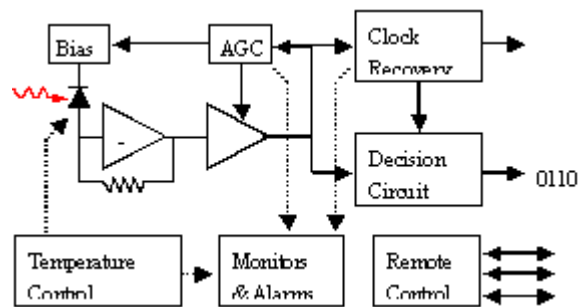
7、PD材料特性

圖七代表對應不同光波長，不同材質間所產生的功率對應電流的反應值，其中量子效應(Quantum Efficiency)定義是一個光子能產生多少電子、電洞對，最大效率便是1，圖中我們以Si、Ge及InGaAs常見材質作一比較，在不同的通訊波段中，所對應到的材質便會有所差異，一般來說，Si材質價格便宜及適合短波段使用、Ge適合全波段使用，但受限於暗電流過高而有動態範圍較小的缺點、InGaAs是使用1310及1550nm波段最佳的選擇，原因在於反應速度快、低雜訊，但卻是三種材質中最為昂貴的。



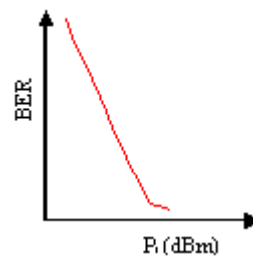
8、一般接收器只對應一個特定的光訊號，因此設計上必須對該光源的靈敏度、雜訊、飽和功率及時脈作最佳化的設計。從圖八中，首先必需對光二極體提供一逆向偏壓，當光從左方進入光二極體經過量子效應轉換成產生電流，經過放大器增益控制器(AGC Amplifier Gain Control)的控制下將訊號放大比例作適當的調節，在訊號傳遞時，本身應對應到通訊規範中的時脈，如 OC-3、OC-12等，Clock Recovery便是針對某一特定時脈作高速的篩選動作，使得解調回來的訊號利於Decision Circuit作判讀動作，而對於高速的傳輸上，需要溫度的控制以免因熱效應而產生雜訊，必要時，當對應到不同的時脈或不同的光功率時，或許要加上警報器以

確保整體電路的安全。



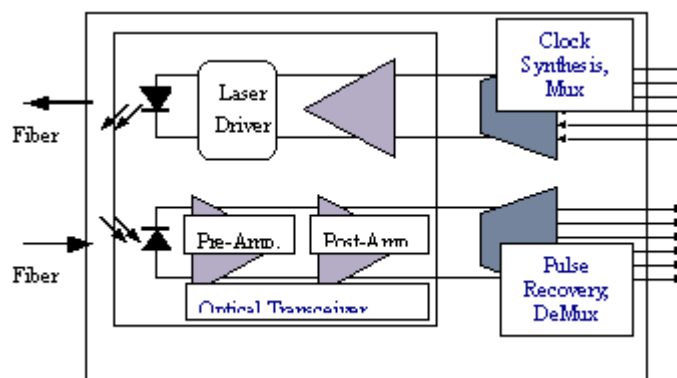
9、接收器模組靈敏度

一般在定義數位接收器的靈敏度是平均光功率對應位元錯誤率(BER Bit Error Ratio)的分析圖。由此關係圖中，我們可以預設當BER到達某一程度時，如 10^{-12} 、 10^{-15} ，此時光接收端所能辨識的最小光功率當作是光感測器的臨界功率。在實際通訊中，常要求操作大於臨界功率3dB~20dB，原因是為了避免EDFA放大比例不均勻或系統中信號、雜訊比過小等因素影響而造成傳輸失真。



10、收發模組

圖十為一光收發模組的示意圖，光收發模組可看成是兩部分，及光收發器部分及電路合分工器部分，前者的光收發模組是由LD(或LED)及PD組成，如同一般的網路架構，它是透過光纖傳輸，將信號以光調變方式作上傳及下載的動作，後者便是電路組成的合工、分工器 (Mux-DeMux)，一般編碼內部載有時脈的資訊，使觸發訊號與解調能做到同步編解碼，合工器部分，將我們欲上傳的資料以Bit Sequence的方式予以編碼，透過數位調變原理將位元組載入雷射模組中，而在分工器部分，解調從接收器端獲得的位元組，而還原成原來的資訊。



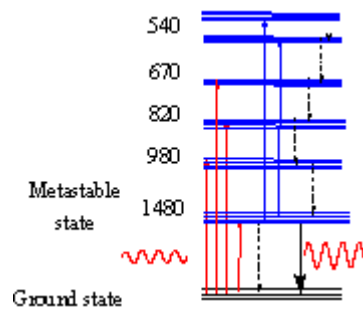
六、光放大器(Optical Amplifier)

在光纖傳輸過程中，會遇到能量耗損的問題，為了解決此一方式，早期是使用重建器Regenerator將衰減到一定程度的信號透過光電轉換的方式，將光訊號還原成電信號，再重新將此電信號透過調變方式轉換成光訊號做下一階段的傳遞，此種方式的優點是信號重新被塑造一次，重建信號與原始信號有相同的波形及能量，但缺點是一個重建器只能對應單一通道，且當通信協定有所改變時就必須重新更新內部的時脈還原問題，若以長距離的海底光纜而言，架設及維修都必須付出相當大的成本，而使應用上有所限制。在1995年左右，因滲

鉕光纖放大器(EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier)的問世，使得同一光纖內可同時容納多通道的DWDM的分波多工系統得以實現，而在光通訊系統中視為標準元件之一，接下來，我們簡單介紹一下EDFA及其他光放大器的特性。

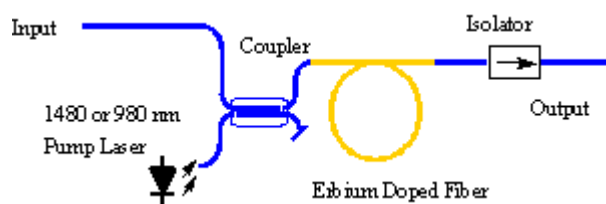
1、鉕元素能階特性

滲鉕光纖，顧名思義就是在光纖內部滲入稀土族鉕元素，當1480、980nm的pumping laser進入滲鉕光纖時，鉕元素會吸收光能量並將內部的電子由基態(ground state)激發到暫穩態(Metastable state)，當通訊的光波通過此段光纖內部時，原先激發到暫穩態的電子就會釋放能量回到基態，而釋放的能量就會對入射的光波有增益的作用，其增益效率最佳的範圍是在1530~1565nm左右，亦即在遠距通訊上的C-band。當增益發生時，會伴隨著自發性放射(Spontaneous Emission)及激發性放射(Stimulated Emission)，前者是隨機產生，在下段會有更詳細敘述，後者可視為是電磁波效應，受過此激發狀態的波長與相位皆與入射光完全相同，亦即入射光能保有原來的物理特性。另外，以1480nm當作激發光源，與通訊波段波長較為接近，因此會有較大的雜訊量(Noise figure)的問題，但以980nm雷射光源而言，卻有可靠度不高的缺點。



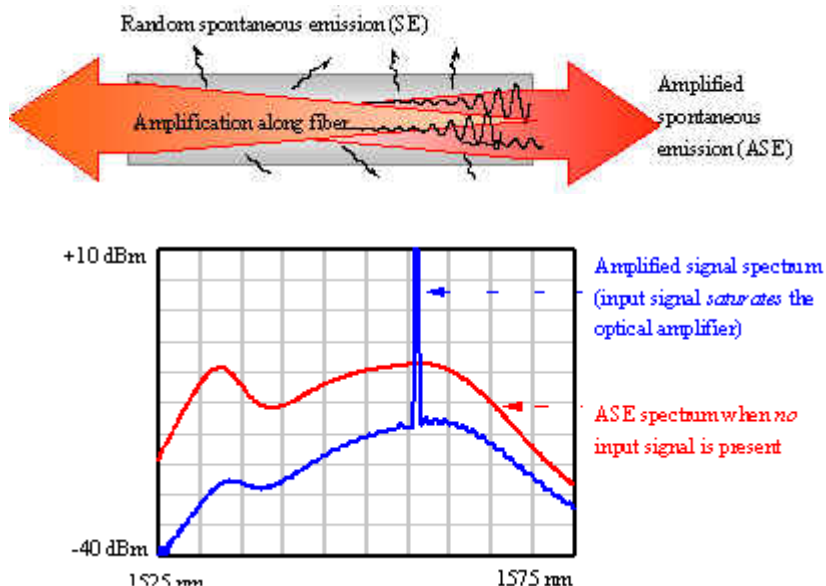
2、滲鉕光纖放大器(EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier)的基本架構

圖十二為滲鉕光纖放大器實際使用上的示意圖，我們透過光纖耦合器將1480或980nm的光源導入滲鉕光纖內作提供電子躍遷的能量，另一端則是我們欲放大的光波，在通過滲鉕光纖產生增益後，一般在末端有一個隔絕器，目的是使光波反射現象減少，以使系統能夠穩定。一般基本的增益效率為5~15dB，雜訊量小於10dB，以商業產品而言，提供了10~23dBm的輸出及4~5dB的雜訊量(理論極限值為3.01dB)。值得一提的是，當滲鉕光纖放大器內部所有到達暫穩態的電子耗盡時，便不會再有增益的效應發生，因此當入射光波能量變化較劇烈，滲鉕光纖內部會作一個自我調節的動作，也就是說我們不需擔心入射能量是否太大而將滲鉕光纖損毀。



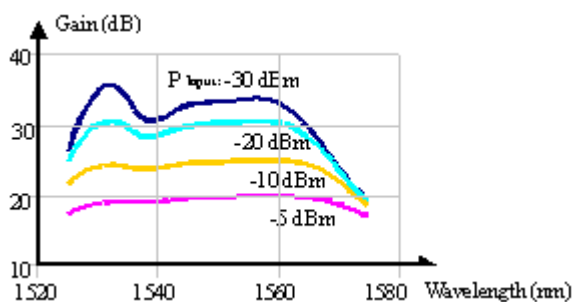
3、自發性放大放射(ASE Amplifier Spontaneous Emission)

在對EDFA有更進一步認識之前，我們必須對自發性放射有更進一步的認識，鉕元素在增益過程中，會隨機放射出1520~1570nm左右的光子，此現象我們稱為自發性放射，此放射是隨機產生，不具有偏極性、同調性、波長、相位甚至行進方向一致性，因此，當隨機產生的自發性放射光子再經過放大器後，便會再次觸發內部暫穩態電子產生激發性放射，換句話說，當沒有任何的入射光源進入EDFA時，光纖內部便會自己產生光源，我們稱為此為自發性放大放射光源(ASE source)。但此時若有特定的入射光源進入EDFA中，此光源會分掉一些暫穩態的電子，此時ASE的現象便會降低，圖十四為信號進入光纖前後，由光譜儀所得到的光波變化，吾人可以看到入射光開關前後，ASE的大小及分布狀況會有明顯的改變，若以數位調變作考量，信號光源是呈開關切換狀態，當信號打開時是量到放大的信號，而當信號關閉時則是量到ASE，這時測量EDFA的雜訊量大小便是一個很重要的課題。



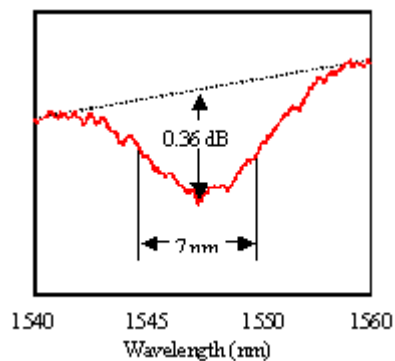
4、光學增益特性

圖十五中是EDFA增益比例相對於波長的曲線示意圖，其中增益的定義是 $\text{Gain} = S_{\text{out}}/S_{\text{in}}$ ，即進入的信號與透過EDFA增益後的大小比值，從圖中我們可以觀察到當入射的光功率愈大，相對增益的比例也就愈小，若同樣以1550nm波長作一比較，當入射光功率為-20dBm時增益比例約為30dB，另一個入射光功率為-10dBm，增益比例約為25dB，由以上兩個增益比例我們會發現入射光大小與增益的比例並不是呈等倍放大，且相對內部產生的雜訊量也會有所不同，因此，對於不同的波長訊號選擇適當的功率作放大是必要的考量因素。另外，由圖中也得知，當進入的光功率愈大，相對波長比值的曲線愈平坦，這代表了EDFA內部的增益已達到飽和的狀態，而在通訊上也希望能操作在此一區域中，如此一來，可以減少ASE產生的非線性雜訊干擾通訊品質，另外也能確保系統能提供穩定的增益比。



5、PHB(Polarization Hole Burning)及SHB(Spectral Hole Burning)

在通訊系統中，偏極化也會對系統造成影響，其中，入射信號極化狀態不同所造成的增益比例改變的現象，我們稱為PDG(Polarization Dependent Gain)。另外，偏極化還會造成PHB的現象，它造成的原因是激發的信號當用盡某一極化方向的鉕離子能階時，便會造成該極化方向無法提供與其他極化方向一致的放大比例，亦即當有入射光進入時，EDFA會有用盡所有該對波長儲存能量及偏極化狀態的暫態電子趨勢，而用盡波長能階的便會有SHB現象，這尤其在EDFA增益達飽和狀態時會更明顯，主因是較大的信號會減少鉕離子分布總數。一般而言，Hole的寬度約為3~10nm而深度約為0.1~0.4dB左右，這些因素對於系統中只有單一信號源時影響較不明顯，但在多通道的DWDM系統中便會造成量測上精確度的誤差。



6、其他種類光放大器

常見的有兩種，分別是半導體光放大器(SOA Semiconductor Optical Amplifier)及滲鐳光纖放大器(PDFA Praseodymium Doped Fiber Amplifier)，前者基本上是沒有共振腔的雷射晶片，但提供生命週期(life time)約1ns的暫穩態的電子提供增益的特性，但此種放大器卻有非線性及串音(cross talk)的問題尚待克服，鐳元素操作的原理與鉕相類似，但鐳是針對1310nm波段有較佳的增益特性，但卻因製備上有需多困難處而尚未量化生產。

參考書籍：

- 1、Agilent Customer Training Seminar, 2000, *Elements of Lightwave Technology*, Agilent Tech.
- 2、Dennis Derickson, 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Hewlett Packard Company
- 3、Stamatios V. Kartalopoulos, 2000, *Introduction To DWDM technology*, Lucent Technologies, IEEE Communication Society, Sponsor
- 4、董德國、陳萬清譯, 2000, *光纖通訊*, 東華書局

光纖通訊基礎簡介(下)

安捷倫科技 / 祁子年

七、光被動元件(Optical Passive component)

在光通訊系統中，被動元件扮演著分配通訊、資料傳輸的角色，當用戶端日益增多，主被動元件的硬體架設就有更大的需要量，雖然國際間光通訊股價一路跌停，但吾人以爲這是因暫時性供需失衡引起的骨牌效應，需要一段時間重整，但對於未來寬頻世界的達成，光纖通訊仍是解決目前頻寬不足的不二法門，因此未來前景仍是相當看好的，以台灣產業而言，重點在於如何有效控制成本及量產能力，才能在這一波景氣不佳的情況下生存下去。回顧過往，從越洋光纜鋪設到近年來都會區光纖通路的連接，在在都需要被動元件的配合，試想，多增加一個用戶端便需數個被動元件的配合，若最終達成光纖到家(FTTH Fiber To The Home)或光纖到桌(FTTD Fiber To The Desk)的夢想，吾人可以想像，屆時每秒的通訊品質絕對不只數百或數千K，而將是以M來當作單位了。目前光纖通訊目前仍處於技術高度成長階段，未來幾年內，仍有許多成長的空間，本文即針對目前幾個基本的通訊元件，也就是目前台灣產業主要生產的被動元件作一介紹，其後並對元件的基本應用及系統架構做一說明。

1、波長無關耦合器(WIC Wavelength Independent Coupler)

波長無關耦合器的意義是將每一個通道的光源耦合到另外一端，其目的在於使能量能夠依照我們的要求做適當的分配，而與入射的光源波長無關。一般來說有50%/50%(3dB)四個連接埠，如下圖一所示，或5%/95%及10%/90%的三連接埠元件。前者主要應用在通訊系統的分配通路上，後者則可以用來監測傳輸系統的能量穩定性及光學特性參數的量測方面。其製作的方法有數種，其中較常用的是以電弧(Arc)加熱方式將兩段光纖熔接在一起，使兩段光纖的核心層作適當的耦合。理論上，一個好的耦合器其匯入的能量總合應與匯出的總能量相同，亦即額外損失值(EL Excess Loss)應儘量減少，一般來說在0.2至0.5dB左右。



$$EL = -10 * \log \frac{\sum P_{out}}{P_{in}}$$

2、波長相關耦合器(WDC Wavelength Dependent Coupler)

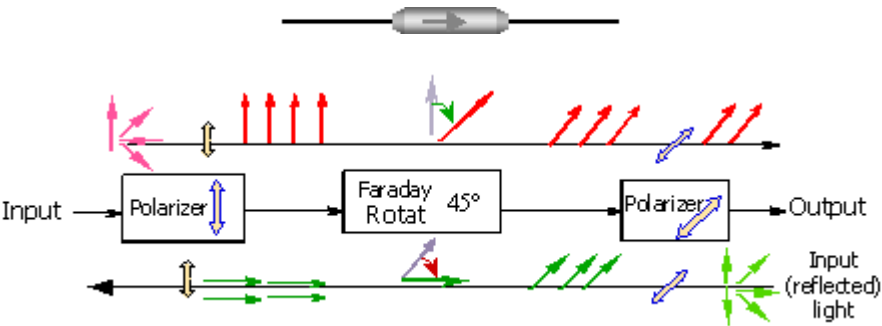
波長相關耦合器與波長無關耦合器的最大不同點在於它是以波長做為分配的依據，常見的如下圖二所示為三個連接埠的元件，其中若視Common端為光源的匯入端，而匯出的二連接埠則會因光源波長的不同而有選擇性，主要有1310/1550nm(傳統WDM Wavelength Dependent Multiplexer元件)，及1480/1550nm(前篇所提滲鉬光纖放大器激發光源的耦合器)等。其中以匯出的某一埠來說，其選定波長的滲入損失應小於1dB，而相對於其它波長的滲入損失應大於20至50dB左右，亦即隔離度(Isolation)需大於20dB以上，如此才有較好的選擇性。因光具有可逆性，因此波長相關耦合器可用來做為光源分波(DeMux 視Common端為匯入端)或合波(Mux 視Common端為匯出端)系統中的元件。一般來說，其內部構造主要是以薄膜濾片(Thin Film Filter)來當作波長選擇器，其原理將在其後詳述。

$$Isolation = -10 * \log \frac{P_1}{P_2} \text{ 其中 } P_1 \text{ 及 } P_2 \text{ 爲同一波長但兩不同匯出端的能量}$$



3、光隔絕器(Isolator)

光隔絕器的主要用途在於保護雷射及光放大器因反射造成的系統不穩定，它的優點在於有高反射損失(RL Return Loss)，使光波在介質不連續部分造成反射的能量減小，它主要的是利用磁光效應的法拉第晶體製成，如下圖三所示，一開始，光源由左端匯入，經過一偏極片後形成線性偏極態，我們假定為垂直線性偏極，經過一個法拉第晶體後將偏極態旋轉45度，再經過一個45度的線性偏極片匯出45度線性偏極的光源。若我們從反射的觀點來看，當光源從匯出端反射進入匯入端時為45度的線性偏極，而後經過法拉第晶體旋轉45度而產生45+45=90度的旋轉，此時便是水平線性偏極態，與匯入端的偏極片呈正交狀態，而使反射光源能量趨近於零。附帶一提的是光隔絕器是不可逆的元件，順向與逆向的滲入損失是不相同的，它的滲入損失在順向端為0.2至2dB，而逆向的滲入損失(IL Insertion Loss)為20到40dB，其反射損失(RL Return Loss)大於60dB。



$$IL = -10 * \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$RL = -10 * \log \frac{P_{reflect}}{P_{in}}$$

4、光衰減器(Optical Attenuator)

顧名思義，光衰減器的意思就是使入射的光能量減少，常用作為通訊系統或元件的測試，例如用來判斷光接收器的接收能力，或者鑑定通信線路的品質等，一般有固定式及可調式兩種。固定式一般採用衰減光纖，可調式的原理一般是採用衰減片，若是衰減片可在元件內部移動，衰減量就可依照需要做調整，而衰減片的損耗量也因此決定了光衰減的比例。

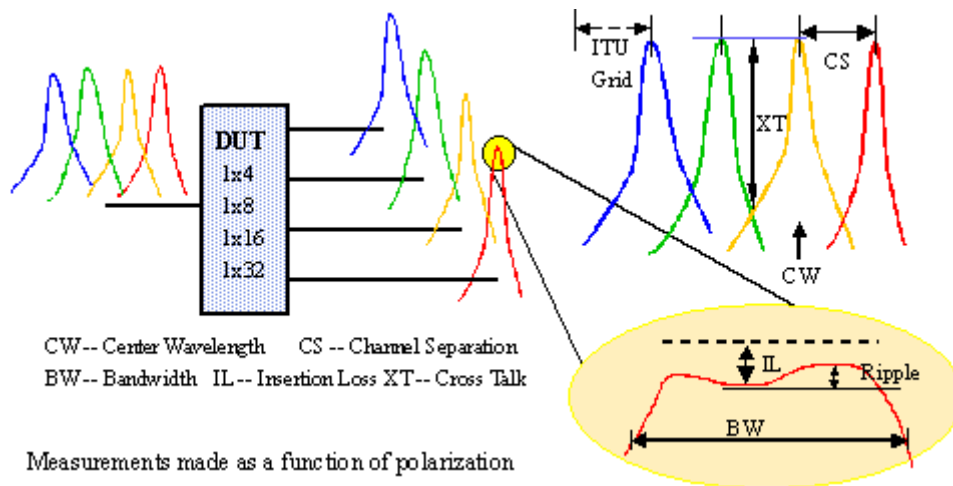
5、濾波器(Filter)量測參數

圖四是多通道濾波器在光譜分析儀中所顯現的示意圖，其目的是要使某些波段的光源能依照我們的需要通過或阻絕，通過的波段範圍我們稱為Passband，阻絕或截止的部分我們稱為Stopband。下表是一般常用來鑑定濾波器好壞的參數，及其基本的定義。

Pass Band	
名詞	定義及相關參數
滲入損耗(IL Insertion Loss)	光源通過待測物後產生的能量耗損比例，單位為dB。
反射損耗(Return Loss)	光通過元件後產生的反射能量比率，單位為dB。
波浪起伏(Ripple)	鑑定通過的波段能量是否穩定。

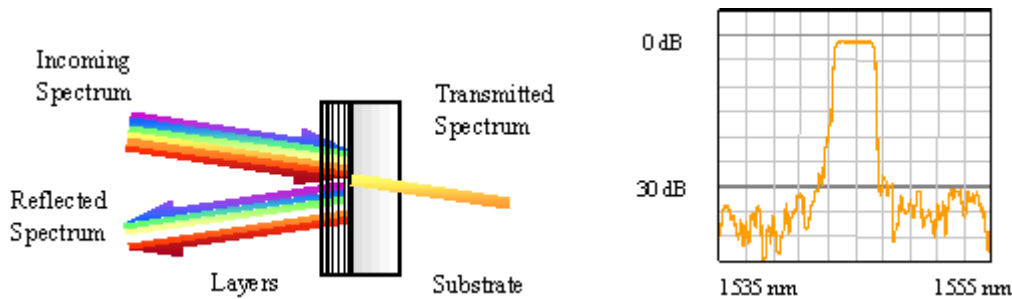
波長相關係數(CW Center Wavelength、CS Channel Space)	例如中心波長、各通道之間間距是否符合ITU-T規範。
波寬(Bandwidth)	鑑定濾波器波形空間寬度，如1dB波寬、3dB波寬為多少nm。
極化特性(Polarization Character)	常見有PDL(Polarization Dependent Loss)及PMD(Polarization Mode Dispersion)，前者為極化狀態造成滲入損耗的不穩定，後者為極化狀態不同在雙折射晶體下產生的速度延遲失真(Group Delay)，此外，還有所謂因極化造成的中心波長、線寬改變等，以上參數可視為極化狀態的函數。
Stop Band	
串音回絕(Crosstalk Rejection)	前一通道的邊界波形(waveform skirt)對下一個通道造成能量的影響，此與通道寬度(channel spacing)不同而有不同的定義，當通道寬度越窄定義越嚴格，單位為dB。

圖四為量測波形及參數示意圖，一般來說，濾波器的入射損失以及波浪起伏會影響數位通訊的能量耗損多寡而決定了有效傳輸距離，中心波長及穩定性會影響到載波的選擇性是否良好，而元件的極化特性會影響中心波長、線寬及能量的不穩定，進而影響到各通道之間間距。串音的影響可藉由改變濾波器的波形形狀來改進，它主要會影響到接收端的訊噪比(S/N Ratio)。一般而言，製作濾波器元件的方式主要有三種，分別是薄膜濾片、光纖光柵及陣列式波導三種，分述如下。



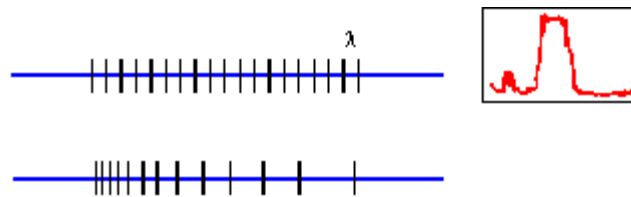
6、介電值薄膜濾片(Dielectric Thin Film Filter)

薄膜濾片，顧名思義就是在一片玻璃基板上面鍍上介電材質的薄膜，使其達到對波長選擇的能力，它的製作方式是利用蒸鍍(Vapor deposition)的方式將高低不同的折射率的介電材質依不同的排列組合鍍於玻璃基板上，其中高折射材質主要有銻氧化物(如 TiO_2 、 Ti_2O_5 等)，低折射率材質主要為矽氧化物(如 SiO_2)，而不同折射率的材質在邊界處產生多光束反射而會對某波長產生建設性及破壞性的干涉效應，因此當適當的控制薄膜厚度及排列組合，便會對某些特定波長的光源產生穿透或是反射現象，便能達到帶通(Band Pass)濾波的效果，一般來說，製作200GHz(1.6nm)通道間距的濾片，薄膜就需要約100層左右的組合，而100GHz(0.8nm)甚至更窄的通道便需要更多層的組合來達成波長波寬(Bandwidth)的選擇性，當然，越多層就會造成良率的下降，如此一來，良率與成本的考量將是一個相當大的挑戰。下圖五是薄膜的示意圖，而右方是通過光波的光譜圖，其中波寬也可以依照厚度等參數的調整而有多種選擇，一般在0.1~10nm左右。而滲入損失約為0.2~2dB，截止通道的能量約為30~60dB。



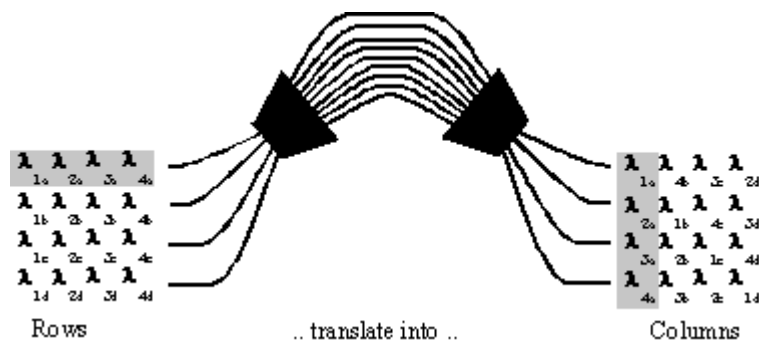
7、布拉格光纖光柵(FBG Fiber Bragg Grating)

布拉格光纖光柵是利用單模光纖，利用高能量的UV雷射光(Excimer Laser)並配合光罩(Mask)製作而成，當光纖受到高能量雷射光照射部分，其內部分子的鍵結的狀態改變而使折射率變大，若配合光罩在光纖上造成距離為週期性的折射率改變(如圖六縱線便是折射率較大的部分)，而週期性寬度若為某個波長的整數倍，則該波長的光源便會因此而產生反射，而其他波長的光源卻會因影響較小而通過，下圖六右方為光柵反射的光譜波形示意圖，圖中以兩個峰值，較高者為吾人希望在該波長產生的反射，而較低的峰值出現原因是週期性寬度是相對於另一個較短波長整數倍的解，一般落在選定波長的一半左右。另外，光纖光柵在製作過程中，對溫度影響相當敏感，因為光纖受熱冷卻會造成熱脹冷縮效應而使週期性寬度改變，而會產生中心波長飄移的效應。光纖光柵除了濾波器的用途外，並可以用作色散的補償，其做法是在光纖上製作非週期性的漸寬光柵，如圖六下所示。



8、陣列式波導(AWG Array Waveguide Grating)

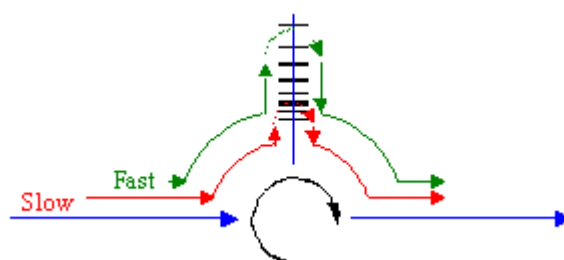
陣列式波導一般是採用半導體的製程方式，將不同折射率的材質做在一片平面基板上形成一平面波導，在製作過程中波導的路徑是經過計算的，當不同的波長光源經過耦合後，因走的路徑長度不同，而對不同的波長造成不同的相位延遲，進而產生對該波長的建設性或破壞性干涉，使得另一端匯出的光波會依照設計到達不同的通道上，因為它是利用不同相位延遲的原理的特性將特定通道、特定波長的光源匯入指定的通道中，因此又稱為相位陣列波導(Phase Array)。圖七為陣列波導的示意圖，假設匯入光波有16個，當我們將其中四個訊號以列(Row)的方式匯入同一通道中，在匯入端便將此四個訊號耦合，經過平面波導的分配下再將此四個訊號以行(Column)的方式展開，若只看圖中框線標示部分，這便是一個1x4的分波多工器(Multiplexer)，若以反方向來看就是一個4x1的合波多工器(DeMultiplexer)，值得注意的是分波器的規範會比合波器來的嚴謹，因為分波器要考慮到各通道間的串音問題，另外，因平面波導之故，波導的邊界不是圓形對稱，雙折射現象比光纖明顯，因此AWG對極化的特性較為敏感，因此在PDL及PMD的值，相對前兩者會較大，但卻因為半導體製程而可以使體積縮小。



名稱	介電質薄膜濾片	布拉格光纖光柵	陣列式波導
優點	薄膜濾片單價較便宜	波長選擇性佳，能輕易做到50GHz的間距。	能大量生產多通道系統
缺點	100GHz以下通道間距不易製作，越多通道成本越高	易受溫度影響，及支付專利費用	易受環境溫度影響，製程及封裝技術尚待克服。

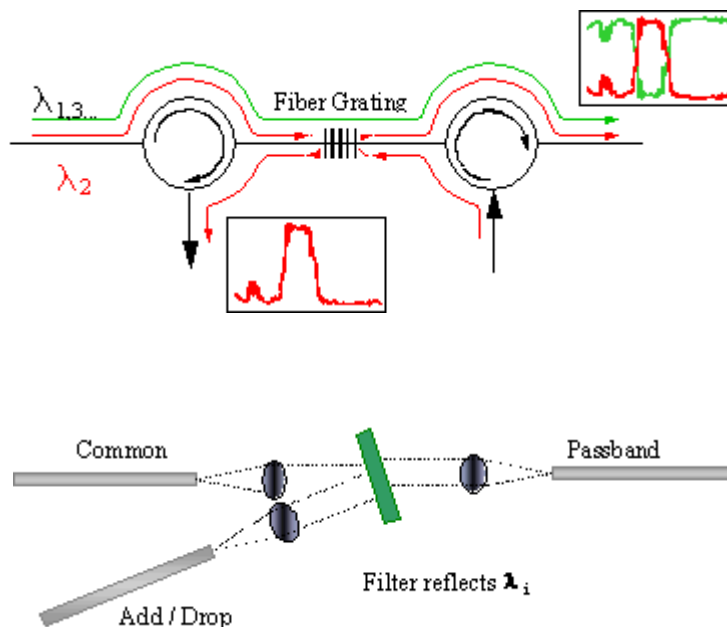
9、循環器(Circulator)

循環器是採用光學晶體製作，其原理與光隔絕器類似，一般常見有三連接埠及四連接埠元件，設計為單一方向的傳輸，即允許從一連接埠順向傳到下一連接埠，但卻不為可逆，其滲入損失約為0.3~1.5dB，隔絕度約為20~40dB。其主要用途在於各用戶端之間通道的連接上，並常配合光纖光柵使用，附帶一提的是，循環器配合漸進式光纖光柵可用作補償色散(Chromatic Dispersion)的訊號失真，如下圖八，色散現象可看做是不同波長的光，因在光纖中傳輸速度不同造成的群速度延遲(Group Delay)，若使用漸進式光纖光柵，速度較慢的波我們讓它跑的距離較短，相對速度較快的波讓它跑的距離較長，如此便將速度延遲的影響補償回來。



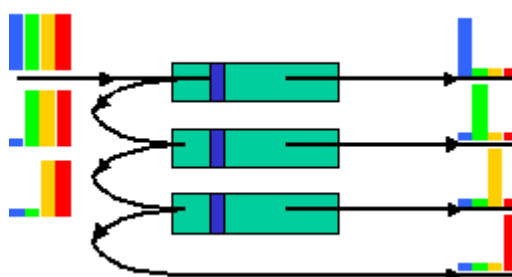
10、上傳、下載節點(Add/Drop Node)

在一個高密度分波多工系統(DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing)系統中，每一條光纖可能都有40個甚至到160個通道(channel)，當然，在匯入端與匯出端都是多通道進行光資料傳輸，但是若在光纖傳輸中我們只需要擷取某一個通道的資料做讀取、編輯卻不影響整個系統，上傳、下載節點模式便是一個相當好的選擇。典型的方式有循環器加光纖光柵或光學透鏡加薄膜濾片兩種。前者的操作原理如圖九上方所示， λ_2 為選定欲讀取或編輯的光波通道，在經過循環器後會將 λ_2 資料進行下載，進入光收發器模組的接收端，經過編輯後再把資料由光發射器上傳到系統之中。而使用薄膜濾片的方式如圖九下方所示，Common端為原始信號進入端，經過光學透鏡搭配濾片後將某個通道的光波取出，與前者不同的是上傳、下載都在同一條路徑上，若對光收發模組來說，就要配合耦合器及隔絕器來達到上傳下載的動作。



11、合波、分波多工器(Multiplexer/DeMultiplexer)

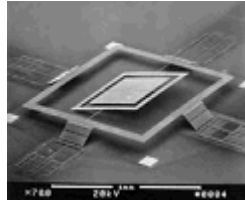
這是DWDM系統中的最重要的關鍵元件之一，主要的合波分波多工器構造有三類，一種是前所提的AWG，另兩種便是由薄膜或光纖光柵組成，AWG原理在前段已提到，不再贅述，而由薄膜或光纖光柵組成的元件，皆是利用不同製程的元件搭配組合出各通道的穿透、反射特性，下圖十便是以薄膜濾片為例，解釋一個1×4的分波多工器如何將四個光波解調出來，左方為光的匯入端，第一個薄膜濾片對第一通道為Pass，對於其他通道的光波則經過反射直接送入第二個濾片，在經過第二、第三個濾片後將所有通道的訊號依次分離出來，同樣的，以反方向來說，就是一個合波多工器。一般來說，分波器需要低滲入損失及高串音回絕特性，但合波器卻可以不需考慮串音問題，因此對於低滲入損失但高串音值的分波器而言，依舊可當作合波器使用。



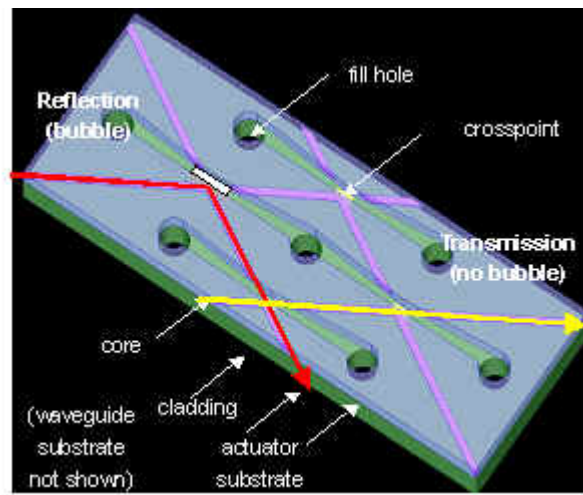
12、光開關器(Optical Switch)

光開關器被喻為是下一個世代光通訊的產品，因為它能使DWDM系統能夠更有彈性的利用，與前所提的通訊合分波多工器等被動元件，都算是光多通道切換系統(OXC Optical Cross Connect)中的一份子，但像分波多工器或光纖光柵等，在設計上就已經固定整個硬體的傳輸架構，較沒有彈性可以依照要求更改通道傳輸的路徑，因此當用戶端增多或者是需要更有效的利用現有的頻寬，光開關器就是一個很好的解決方案，它的目的是使光波各通道之間的切換，能夠在不需光電轉換的動作下，直接在光纖網路中依照我們的需要轉移到適當的路徑上。目前的技術已漸成熟，某些元件已經宣佈可大量生產，其做法大致上都朝向微機電系統

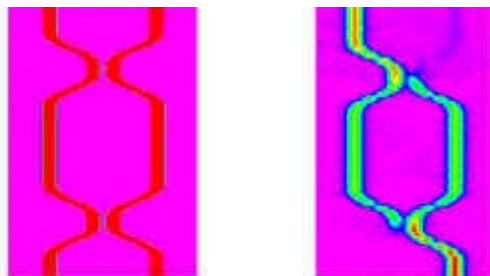
(MEMS Micro Electro Mechanical Systems)做改進，達到體積小、可靠度高的要求，在此介紹幾種光開關元件切換的方式，第一種是微反射鏡方式(Micromirror)，它是以半導體的製程做在矽晶圓上，加上光纖的結合以空氣作為傳輸的介質，一面反射鏡可以控制2x2通道的切換，若是以陣列的方式排列組合，便可以依照我們的需要做多對多通道的切換動作，若是反射鏡的控制軸能夠做到三軸方向的靈活轉動，其提供的效益就可以增加到256x256通道的切換。



雖然第一種切換方式可以量化生產並可擴展到多通道切換，但在實際操作上卻可能會因為機件的多次轉動後造成毀損的現象，在非常需要在可靠性表現的通訊上是不允許的，因此第二種是使用陣列式平面光波空腔體(Matrix of Planar Lightwave Circuits with Cavity)，主要是利用平面波導將所需的路徑設計出來後，利用油性物質充填於孔穴之間的縫隙中，當加熱圖中孔穴的部分時，會產生氣泡使縫隙中油性介質，因折射率變化而造成光的全反射(TIR Total Internal Reflection)，如此一來，控制陣列中孔穴的氣泡產生或消失便可將光波導入欲傳送到通路之中，目前已有32x32通道元件的問世。



第三種方式為光學積體電路(PIC Photonic Integrated Circuit)，它是利用Mach-Zehnder干涉原理製作而成，它是先將兩光波耦合後再將光路分成兩條，若其中一條通路利用熱光或電光效應使其折射率改變，而控制兩光路間的相位延遲比例，當兩條光路合在一起時，便會因建設性或破壞性的干涉而導入我們所欲到達的通道中，下圖是一個2x2的通道切換模式的例子。



九、結論

在高科技光電產業中，主要有分為光纖通訊、光電顯示器(液晶、電漿、發光元件)及光儲存媒體(如VCD、DVD)等三大部分，本文是針對光纖通訊方面的原理作一說明，一開始，本文從光通訊產業的趨勢及光通訊硬體架構中的物理光學基本原理做一介紹，其次是對通訊協定及光纖的光學特性做說明，再來是針對現今熱門的高密度分波多工系統中的主、被動元件操作原理及其相關知識做一闡述。當初在定文章的題目時因為涵蓋範圍相當廣，幾乎提到了現階段所有常見的光通訊元件及相關知識，因此分成三個篇幅將光通訊的原理作一簡單的介紹，若內容中有遺漏或是需改進的部分也請各方先進能不吝賜教。

安捷倫科技電子儀器事業群應用工程師祁子年謹誌於中壢

參考書籍：

- 1、Dennis Derickson, 1998, *Fiber Optic Test and Measurement*, Agilent Tech.
- 2、Agilent Customer Training Seminar, 2000, *Elements of Lightwave Technology*, Agilent Tech.
- 3、Harry J.R. Dutton, *Understanding Optical Communications*, 2001, Prentice Hall.
- 4、Stamatios V. Kartalopoulos, 2000, *Introduction To DWDM technology*, Lucent Technologies, IEEE Communication Society, Sponsor
- 5、Comprehensive Characterization of a DWDM Demultiplexer, 2000, *Agilent Tech Application Note*.

通訊寶典光纖通信, 1999, 廣磁叢書