

光纖系統運用於保護電驛簡介

■ 李河樟

台電電力調度處

壹、前言

電力系統愈龐大複雜，對於故障清除時間要求愈快。因此，高壓輸電線路兩端保護電驛，必須具有快速動作之性能。此一要求，一般而言並不困難，但對於線路兩端之保護區域邊緣，則必須倚靠某些型式之通訊頻道才能達成。在線路兩端的這些通訊頻道，是用來判斷故障點是否在其保護範圍之內，以決定電驛是否應該動作。用於保護電驛之通訊頻道包括：1.電力線載波(PLC)，使用30~300KHz之頻率，利用電力線本身來傳送訊號；2.金屬副線，使用60Hz或音頻經副線來傳遞訊號；3.微波系統，利用微波通訊系統傳遞保護電驛所需訊號，此一訊號在保護設備端仍為音頻。4.光纖頻道(Fiber-Optic Channels)。

以近代科學而言，光纖為目前所有用來作為通訊媒介中，最為先進的一種科技。光纖通訊具有許多優點，諸如：不受電磁感應干擾；不產生雜音，亦不

受雜音干擾；不怕受潮，絕緣性能極佳；容量大，耐久性高等等。對於電力工程，特別是保護電驛，更具有極為顯著的特點。一般運用於60周波之副線或音頻頻道，都會因雜訊或是外來電壓干擾而引起電驛誤動作。雖然雜訊及外來電壓對上述兩種頻道均會產生干擾，但通常雜訊對於音頻的干擾較對於副線嚴重；而外來電壓(與副線平行之電力線所產生的縱向感應電壓，以及接地網的電位湧升)則對於副線產生極為嚴重的困擾，對於上述兩種困擾，如利用光纖將很容易的可以解決。

使用光纖並不是就沒雜訊，而是光纖所提供的通訊頻道，可以與這些雜訊做有效的隔絕。例如圍繞在光纖頻道周遭的光線都可認為是雜訊，但是光纖電纜因具有不透明的外層遮蔽，而可防止所有外界的干擾，因而在訊號的傳遞過程當中幾乎沒雜訊加入。由於光纖具有上述諸多優點，未來其運用將極為廣

泛，包括通訊、控制、保護電驛等，而在各種不同運用上，對於光纖的需求亦有所區別，本文將僅就光纖系統的基本原理，及其在保護電驛應用相關部分加以介紹。

貳、光纖系統主要原理

光纖系統之主要組成元件包括：1. 光源(發送部分)2. 光纖電纜(傳輸部分)3. 檢光器(接收部分)，如圖一所示。這些元件組成通訊頻道上之光源及電子--光的互相轉換功能。茲將各元件分述如下：

一、光纖電纜

把許多光纖芯線絞合在一起即為光纖電纜，依其架設方式的不同，大致上可區分為：地下光纜、架空光纜、海底光纜及光纖複合電纜(如 OPGW : Optical/Ground Wire)。光纖電纜是從發訊端將光訊號引導到遠方受訊端的傳遞媒介，它必須具有下列必要功能：1. 不能使光纖電纜內的光波洩漏出去，2. 光訊號在光纖電纜傳輸過程中的損失程度，須在對方受訊器仍能有效接收到訊號的範圍之內。依此需求所發展出來的光纖電纜有許多不同的類別，如以光纖材料的折射率(係數)(Refraction Index)分布情形來區別則有：1. 突變折射率光纖(Stepped-index fiber)，2. 漸變折射率光纖(Graded-index fiber)兩種；如以光訊號在

光纖芯線內部的傳輸模態(Mode)區分則有：1. 單模態光纖(Single-mode fiber)，或 2. 複模態光纖(Multi-mode fiber)兩類。

在一般運用上光纖電纜可分為如下三大類：1. 突變折射率複模態光纖(Stepped-index Multi-mode fiber)，2. 漸變折射率複模態光纖(Graded-index Multi-mode fiber)，3. 突變折射率單模態光纖(Stepped-index Single-mode fiber)。

首先從光纖電纜的折射率談起，折射率為物質的一種特性，各種物質皆各有其不同的折射率，它是光在大氣中行進的速度(c)與光在物質中行進的速度(v)的比例，即物質的折射率 $n=c/v$ ，一般使用於光纖電纜的材料，其折射率大約在1.46~1.96之間，其實也很少有物質的折射率大於此值。要注意的是，折射率會隨著光的波長之不同而改變，又折射率在光纖電纜扮演極為重要的角色，因此，在運用上必須同時考慮光源的波長與光纜的類別。

說明折射現象的簡單公式稱為斯涅爾定律(Snell's law)，圖二說明光束從折射率 n 的物質進入折射率 n' 之另一種物質的情形。當光束的入射角為 90° 時，則以直線方式進入另一種物質；如果光束的入射角為 ϕ ，而 $\phi \neq 90^\circ$ 時則其行進方向不再是直線，而是方向稍有改變，亦即

產生折射現象，行進方向相對於第二種物質表面的角度為 ϕ' ，因此當光束通過物質表面時，其方向會產生改變，斯涅爾定律即以公式 $\eta \sin\phi = \eta' \sin\phi'$ 來解釋此一現象。而當入射角度到達某一特定值時，會使得所有折射光束正切於物質表面，如圖二之光束3，此入射角度被稱為臨界角 ϕ_c ，假如入射角大於 ϕ_c ，則所有入射光線均會被反射回去，如圖二之光束4。

此一原理應用在光纖電纜上的情形，可以用圖三來說明。為了使光纖系統能正常運作，光纖電纜芯線的折射率必須大於外層被覆體的折射率，而被覆體的折射率亦須大於空氣的折射率。光源所產生的光線，以相對於光纜軸心某種角度進入到芯線，這些進入光纜芯線的光線，最後均可能遇到芯線與被覆體之介面，假設這些光線相對於其介面垂直線之角度大於臨界角 ϕ_c ，則這些光線被反射回光纜的芯線，如此經過多次反射、折射，而輾轉傳達到光纜的另一端。此臨界角為 $\sin\theta_c = \eta_2/\eta_1$ ， η_1 為芯線的折射率， η_2 為被覆體的折射率。當 ϕ' 為 90° 則 $\sin 90^\circ = 1$ ，假設在芯線與被覆體介面的入射角小於臨界角，則光線經折射進入到被覆體，這些進入被覆體的光線稱為被覆模(Cladding Mode)，如圖三所示。對於被覆體與芯線介面的臨界角

θ_c ，相同的光束在空氣與芯線材質之介面有其一致的入射角 θ_a ，這一可在光纖內產生臨界角的 θ_a 之值，稱為光纖的受光角(Acceptance Angle)，也就是說光線的入射角如果在 θ_a 範圍以內，則此光線即可進入光纖的芯線，且能維持在芯線內部，任何光線的入射角如果大於 θ_a ，則此光線就會進入被覆體，甚至於跑出光纖電纜。另外，與光纖電纜特性有極為重要關係的是光纖的孔徑NA(Numerical Aperture)，其定義是：

$$NA = \sin\theta_a = \sqrt{\eta_1^2 - \eta_2^2}$$

很顯然的光纖孔徑越大，受光角也就越大，與光源的耦合效果就越好；但光纖孔徑越大，其負面影響是造成光波模態會嚴重分散，會造成訊號的嚴重失真，也會導致頻寬變得很窄小。一般常用的範圍是 $NA=0.2$ 左右。

如圖三所示，以不同的角度進入光纖電纜的光線，到達電纜另一端的行進距離各不相同，而同一光源的所有光線均具有相同的波長及行進速度，但因其行進距離不同，使得到達接收端的時間有所差異。故如以一脈衝訊號進入光纖，則在接收端所收到的脈衝波峰將被擴散開，此即所謂的離散(Dispersion)特性"d"，它是以訊號傳遞中每公里偏差多少奈秒(ns/km)來表示。由於離散度的多

寡，將直接影響到發射端能提供多快的脈波，而不使接收端前一脈波的尾端與後一脈波的前端互相干擾，因而使得運用於光纖的訊號頻率必須受限制，也就是說離散度影響了光纖系統的頻寬，所以在光纖電纜的規格上，應列有頻寬這一項資料。

(一)、突變折射率複模態光纖

所謂複模態光纖，即在光纖中有各種模態的光線在其芯線內傳輸，由於各種模態傳輸時間有所差異，會造成傳輸訊號失真而使頻寬受限。圖四即為此類光纖之一例，因折射率在芯線與被覆體之間的介面突然改變。因此，從光纖進口端入射近來的光線，有部分在被覆體介面產生全反射，進入芯線傳輸到對方，部分光線則跑出芯線而消失掉。突變折射率複模態光纖的芯線大小，通常為50、62.5或85微米(μm)的直徑，加上被覆體總直徑約為125微米。

複模態光纖其芯線的直徑，對於所使用的光源波長而言是相當大的，足以容許很多種模態的光線在光纖內行進，也就因為有這麼多的不同模態光線存在，故其離散度就會很大，頻寬也就受到局限了。

(二)、漸變折射率複模態光纖

由於突變折射率複模態光纖失真較大，且頻寬受到限制，在保護電驛運用上有諸多缺點。因此很快又發展出漸變折射率複模態光纖，此類光纖就如圖五所示，它的特點在於其折射率隨著芯線的橫切面而逐漸改變，芯線的中心折射率最大，越接近被覆層越小，折射率的變化可用下列公式表示：

$$\eta_r = \eta_c(1 - \alpha r^2)$$

η_c ：芯線中央的折射率

r ：離開芯線中央的距離(μm)

α ：常數

不同模態的光波，在漸變折射率光纖電纜內行進的方式，從圖五可以看出它並非從被覆層突然反射回來，而是進入光纖後逐漸彎曲，其結果是不同模態的光波，其行進路徑之距離較為相近，因此其離散度較小，失真亦減少，對於訊號的頻寬限制也就減低了。此類光纖電纜其芯線直徑與突變折射率者相同。

(三)、突變折射率單模態光纖

這類光纖是經過多方研究改進，最後所研發出來的一種光纖電纜，其理論根據是：將光纖芯線直徑盡量縮小到比光波訊號的波長還小時，則能通過光纖內部傳遞的光波只有單一模態存在，因

此沒有各模態間傳送過程的時間差，其離散度必定非常小。

光波在光纖內傳送模態數量 N 可由下式表示：

$$N \approx a[\pi(NA)d/k]^2$$

NA(Numerical Aperture)：光纖的孔徑

a：0.5 突變折射率

a：0.25 漸變折射率

d：光纖芯線的直徑

k：光波波長

圖六為單一模態光纖之一例，其芯線直徑為9微米(μm)，所使用的波長為1300或1550(nm)奈米。從圖上可見其離散度極小，頻寬較大。使用波長較長的光源，可降低模態數量，即降低離散度，減少訊號失真，另一優點為減少訊號在光纖內的損失。表一為各種光纖電纜的特性，特提供做為參考，但要注意的，此表的數字會隨著科技的發展而有所改變。因此，運用上如須較精準的計算時，請參考光纖電纜製造廠提供的規格數據。

表一、各種光纖電纜特性比較表

光纖電纜類別	芯線大小 μm	外徑 μm	孔徑 NA	頻寬	損失 dB/km
MM,SI	50~500	125~800	0.2~0.3	0.03~0.05	4~8
MM,GI	50,62.5,或85	125	0.2~0.3	0.2~1	3~5 1~2*
SM,SI	9	125	0.1 0.3**	20* 20**	0.5* 0.3**

註：MM,SI=突變折射率複模態光纖
(Multi-mode stepped-index)

MM,GI=漸變折射率複模態光纖
(Multi-mode graded-index)

SM,SI=突變折射率單一模態光纖
(Single-mode stepped-index)

*：1300 nm(奈米)波長之光波

**：1550 nm 波長之光波

除了上述兩種波長之外，未有標記者為850nm 波長之光波。

二、光源

光源為送訊端之主要設備之一，它的功用是將電的脈波轉變為光的脈波，再投射到光纖電纜。常用的兩種光源為射光二極體(LED Light Emitting Diode)及雷射二極體(LD Laser Diode)，兩種光源各有其特長，在決定使用何種光源時，必須考慮的因素很多，通常應包含下列諸點：輸出能力、耦合損失、波長、反應力、線性度、溫度、成本及使用年限等。

1.輸出能力及耦合損失

在光纖運用上，光源的輸出功率與耦合損失兩種特性是極為重要的衡量指標。LD 之輸出功率約在2mW 到20mW 之間，而 LED 則為0.1mW 到2.0mW。在耦合損失及二極體發光面積兩特性上，雷射二極體皆較佳。圖七為 LED 及 LD

兩者之間的比較，從圖上可看到 LD 的發光面積及光錐均較小，LED 之輸出光錐大於120度，幾乎是全方向發射，而 LD 之輸出光錐僅為10度左右。前面已提及，受到光纖受光角的限制，並是所有的波皆容許進入光纖。一般光纖能夠接受光錐的最大角度為28度，由此點可以很明顯的看出，LD 能夠提供的有效光源高於 LED 甚多，故對於與光纖芯線一樣大小的發光面而言，LED 與 LD 比較其耦合效率低5~10dB 左右(此一現象已隨科技的進步而有逐步改善)。因而大容量之光纖系統，尤其是使用單一模態光纖者，皆選用雷射二極體為光源。

2.波長

從傳遞訊號損失的觀點而言，光源的波長是一種相當重要的因素，光纖電纜具有低損失的波長，其範圍可分成如下三組：820nm~860nm、1300nm 及 1500nm。波長愈長其損耗就愈小，但是在這些波長之間，其中光波的損耗卻非常高，如考慮光源輸出功率及傳遞訊號過程所造成的損失，一般應用上 LED 可使用於850nm 及1300nm 之波長的光源；LD 則可適用於上述三組波長之光源。但基於其他因素的考量(如成本)，850nm 之 LED 通常使用於短距離、小容量之通訊傳輸系統；另一方面，LD 則普遍使用

於1300nm 及1500nm 波長，適用於長距離、大容量之通訊系統。

3.反應力(Response)

LD 與 LED 在產生訊號的能力上有很大的不同，LED 產生的脈波頻率約為50MHz，LD 所產生的脈波在理論上可達 GHz 以上。

4.線性與溫度

在訊號轉換過程中，如採用訊號之強弱來直接調變時(類比輸送方式)，就必須考慮電流對光輸出特性的線性耦合，以減低訊號的失真。雖然 LD 的線性較 LED 差，但兩者皆非線性設備。因此，大部分的光纖系統皆為數位化訊號。至於對溫度的效應方面，LD 對溫度的安定性極差，但可經特殊的負回饋回路設計來穩定其輸出，如圖八所示；而 LED 對溫度效應較為穩定，其驅動回路較簡單，如圖九所示。

5.成本

LD 設備的成本遠高於 LED，這不只是因為材料本身，回路設計的成本亦遠高於 LED。電路成本佔所有設備成本相當大的比例，從圖八及圖九所代表的 LD 及 LED 驅動回路可知。由於 LD 的電路相當複雜，成本又高，大部分的保護電驛設備均使用 LED 光源。

6.使用年限

LD 及 LED 的使用年限都很長，故在設計考量上並不很重要。所謂光源的使用年限其定義為：光源從開始使用到其輸出功率為初始值的一半之時間。目前光源的壽命皆很長，LED 約在百萬小時以上，而 LD 則在50萬到百萬小時之間，在正常使用下壽命幾乎不是問題。

如將 LD 與 LED 兩種光源作一總的比較可得下表：

表二、LD 與 LED 比較表

	LED	LD
輸出能力	0.1~2.0mW	2.0~20mW
放射角(光錐)	120°以上	10°~30°
耦合損失	10~20dB	3~5dB
波長	0.85μm	1.3、1.5μm
用途	短距離小容量通訊用	長距離大容量通訊用
成本	低	高(LED 的 4~5倍)

三、檢波器(Detector)

檢波器是一種接收光波並將其轉換成電的脈波之設備，由於光源所產生的光波訊號相位不甚穩定，所以接收端只能以所收到光波強度以其大小比例直接解調，檢出原來電流的變化。目前光纖通訊系統所採用的檢波器有兩種，一種

為 PIN(Positive Intrinsic Negative)二極體，另一種為 APD (Avalanche Photo Diode) 突崩光電二極體。在選擇檢波器時比較需要考慮的是：1.設備的雜訊，2.轉換功率，3.最大波長，4.成本等。表三為兩種檢波器主要特性的摘要，分別說明如下：

表三、PIN 與 APD 比較表

檢波器型式	平均壽命(Hr)	靈敏度(dBm)	轉換功率(A/W)	偏壓(V)	運作範圍(dB)	資料傳輸速率
PIN	>10 ⁶	-58 低	0.4~ 0.7	5~ 100	60	1~2 GHz
APD	>10 ⁶	-70 高	10~ 70	100~3 00	20	90~150 GHz

1.設備雜訊

光纖頻道上大部分的雜訊是由檢波器造成的，再加上靈敏度的關係，使得檢波器所能接受的最小訊號受到限制。APD 通常較 PIN 雜訊高，但 APD 的靈敏度較佳，所以其輸出功率較大，而一般第一級放大器會增加部分雜訊，故增加 APD 的輸出，將使放大器的設計較為容易。因此，對於檢波器的選擇，如果考慮雜訊因素，就必須同時包含檢波器及放大器。

2.轉換功率

轉換功率是檢波器對特定光波波長靈敏度的一種能力，為平均輸出電流除以光纖之輸入能量，單位為 A/W 。如表三所示，APD 之反應力遠超過於 PIN，故如果反應力因素為唯一考慮時，則應選用 APD 檢波器。

3. 最大波長

檢波器的最大波長即為其最敏感的波長，因此在光纖系統運用上，儘量使光源的波長與檢波器的最大波長一致。

4. 成本

APD 的成本高於 PIN，這不單單是由於零件本身的價格，而是其整體回路所導致，APD 最大的一項缺點是其所需要的偏壓較高，約為百伏特以上，這造成相關回路的成本提高。故如僅以成本為主要考量，則 PIN 二極體為一較佳的選擇，況且其運作範圍又較寬廣，可靠度及訊號傳輸速率也較 APD 優越。

訊號接收器輸入的回路如圖九。訊號產生速率低於每秒 5Mbits，接收水準高於 0.3 微瓦 (μW) 的典型回路為一跨接電阻放大器及以 PIN 二極體為檢波器；如訊號低於 0.3 微瓦 (μW)，頻寬超過 100MHz，最好選用 APD 為檢波器；但是如果所傳輸的訊號，其資料產生速率很低的情況，則可使用 PIN 二極體。

參、光纖系統功能分析

光纖系統功能分析，包括接收訊號功率的大小，以及接收到的訊號與雜訊的比值。在任何通訊系統中，以系統功能的觀點來看，上述兩項均為極重要的指標。因此，在考量光纖系統功能之前，必須先瞭解整體光纖系統的損失到底發生在那裡，損失又是多少，以及雜訊是從何處來的。

一、光纖系統的損失

首先要探討的是光纖系統在何處會造成損失，在光纖系統內部最主要的損失區域為：1. 光纖電纜，2. 訊號源耦合，3. 連接器 (Connectors)，4. 絞合器 (Splices)，5. 光耦合到檢波器等。

光纖電纜的損失是以每公里衰減多少 dB 來計算的，不同型式的光纖其損失皆不相同，此項資料可由製造廠家提供的規範上得知。

對於保護電驛使用的頻道所需之光纖系統，訊號耦合到光纖電纜的損失是主要的考慮重點。原因在於大部分的電驛系統均使用 LED 為光源，且基於經濟與高密度通訊的需要而選擇單一模態光纖，對於此種光源及光纜的選擇並非是絕對的，也並不代表 LD 光源就不使用於保護電驛系統，只是在一般情況下，

整體成本較難以被使用者及製造廠所認同而已。

光耦合到光纖電纜的損失，其實尚須包括由於光源所產生的光錐、光纖的孔徑、光纖界面的反射及光源與光纖的距離等所造成的損失。由於光源與光纖面積不同而引起的損失，在使用 LED 及採用 50 μm 或 9 μm 的光纖芯線時，其損失將甚為可觀。此種耦合損失與 LED 發光面及芯線截面積的比例有關：

$$\text{dB}_{\text{Loss}}=10\text{LOG}(r_s/r_c)^2$$

r_s ：LED 發光體的直徑

r_c ：光纖芯線的直徑

通常 $r_s=200\mu\text{m}$ ，如果使用複模態光纖，其芯線的直徑 $r_c=50\mu\text{m}$ ，則因直徑不同所造成的損失為：

$$10\text{LOG}(200/50)^2=10\text{LOG}16=12\text{dB}$$

如使用複模態光纖，其芯線的直徑 $r_c=9\mu\text{m}$ ，則其損失為：

$$10\text{LOG}(200/9)^2=10\text{LOG}494=26.94\text{dB}$$

由此可見此種耦合損失相當嚴重，必須妥為規畫或選擇。

光投射到光纖所造成的損失，包括孔徑損失及反射損失，不同的光源與光纖組合，會有不同的孔徑損失，以 LED 突變折射率光纖為例，其孔徑損失計算式為：

$$\text{NA}_{\text{Loss}}=10\text{LOG}(\text{NA})^2$$

NA 的資料可由光纖製造廠之規範得知，也可以從光纖的芯線及被覆層材料的摺折射率求得：

$$\text{NA}=(\eta_1^2-\eta_2^2)^{1/2}$$

而在空氣與光纖芯線之間，因折射率不同造成的反射損失為：

$$\text{dB}_{\text{Loss}}=-10\text{LOG}[1-(\eta_a-\eta_g)/(\eta_a+\eta_g)]^2$$

η_a ：空氣的折射率(1.0)

η_g ：光纖芯線的折射率(假設為1.5)

$$\text{則 } \text{dB}_{\text{Loss}}=-10\text{LOG}[1-(1-1.5)/(1+1.5)]^2$$

$$=-10\text{LOG}(0.96)$$

$$=0.177\text{dB}$$

由本例可見此類損失並不很嚴重，在一般情形下，反射損失可以略估為 0.2dB。

在光進入光纖的過程中損失極為可關，不在實際運用上，可以設法加以改善。例如在光源與光纖之間設置一極小的透鏡，將光線聚集成一直徑非常小的光束，再投射入光纖，這樣可以很有效的改善此種損失。

至於連接器的損失(包括連接插頭與插座)，如果所使用的為通訊系統專用者，則在良好的接觸情況下，每一組件的損失不會超過 1dB。

光纖電纜芯線連接處絞合器的損失，以現在科技而言，已經可以大大的減少其接續所造成的損失。連接方式有

兩種基本方法，一為熔接方式，另一方式為機械式固定接頭。兩者皆為永久式接頭，而熔接頭的損失較小；如接頭要改為可分離式，則需要使用連接式插頭，其損失將較永久性接頭為高，而且每次分開後再接回去，其損失亦不同，所以已很少使用機械式的連接方式。

熔接接頭的作法，是將兩條光纖芯線的線頭排成直線，利用儀器校準好之後，以電弧光之熱量將光纖芯線熔化後焊接在一起。在熔接的過程中，藉著表面張力的幫助，可以減少光纖側面的不齊(減少訊號經過此接頭的損失)。一般熔接接頭的損失約在0.2~0.1dB 以下(機械式的連接頭其損失約可達1dB)。

任何兩條光纖只要經由絞合器連結在一起，則其接點的損失將隨著兩條光纖結合的情形而改變。如兩光纖芯線中心偏離所造成的損失，兩光纖間結合角度不當造成的損失，兩光纖間未緊密結合造成的損失，光纖芯線線頭不平整(或有斜角)造成的損失，或是因不同型態光纖結合造成的損失等等，如圖十所示。所幸，這些不當接續所造成的損失，目前已可藉由專用儀器自動對齊光纖芯線，輕易、有效的加以解決。

光纖系統另一可能產生損失的地方是光從光纖耦合到檢波器，當光波從光纖耦合到檢波器時，光纖的末端被裝置

在離開檢波器很近的地方，由於檢波器的表面積遠大於光纖芯線的橫截面面積，所以所有從光纖傳來的光波均可被檢波器接收，故此部分的損失極微少，設計上可以不需考慮。

二、光纖系統雜訊的來源

前面已提及在光纖通訊頻道裡，所有雜訊幾乎均在接收器上混入訊號中，檢波器及第一級放大器為雜訊的最主要來源，這些雜訊可以分成兩部分，即投射雜訊與溫度雜訊。

檢波器的溫度雜訊量與其等效負載阻抗 R_L 有關，溫度雜訊的產生是起因於設備內部的電子並非靜止不動，而是由於熱能而不斷的做不規則的運動，故其雜訊電流亦極不規則，溫度雜訊的等效模型如圖十一所示，其平均雜訊電流為

$$I_{nt}^2 = 4KT\Delta f/R_L$$

K ：波茲曼常數(1.38×10^{-23} 焦耳/ $^{\circ}K$)

T ：絕對溫度

Δf ：接收器頻寬

這些進入接收器的光能產生不連續的電荷載體，每一電荷載體促成一很小的脈波電流，這許多不規則的脈波電流加在所有即將由光能轉換成的電流上，由於電流脈波不規則的本質，使得這些電流成為雜訊，這就是所謂的投射雜

訊，是所有半導體設備共有的現象。對於定量的輸入光能，從檢波器出來的理想電流為一常數，但實際上的電流並不如理想，它是一連串不規則的脈波所組成，所以最終的訊號電流乃為理想的平均電流加上投射雜訊所產生的雜訊電流。檢波器的投射雜訊為

$$I_{ns}^2 = 2e(I_s + I_d)\Delta f$$

I_{ns} ：平均雜訊電流

e ：電子電荷

I_s ：平均光電流

I_d ：設備之暗流(Dark Current)

檢波器設備之暗流，係因其二極體上的背向偏壓，而使得在沒有光線時從設備上產生的洩漏電流。

三、訊號與雜訊比

檢波器的訊號與雜訊比，是決定通訊系統是否可以有效運作的指標之一，此一比值可以事先估算得知，檢波器的平均訊號電流為：

$$I_s = \delta e P / hf$$

P ：光纖入射功率

δ ：檢波器效率，即放射出電子數量/入射的光子量

e ：單位電子電荷(-1.6×10^{-19} 庫倫)

h ：蒲郎克常數(6.626×10^{-34} 焦耳·秒)

f ：入射光之頻率

必須注意的是，檢波器的電流輸出是正比於光纖輸入的能量。因此，假如接收光能的損失是3dB，則電能之損失為6dB，此乃因電流正比於光，而能量正比於電流的平方。換句話說，在光能每3dB的損失，即相對應於接收的訊號—雜訊比有6dB的損失。在負載電阻上的平均能量為 $P_{es} = I_s^2 R_L = (\delta e P / hf)^2 R_L$

雜訊一般可分為兩類，故雜訊能量亦有兩種計算公式，一為投射雜訊能量，一為溫度雜訊能量：

投射雜訊： $P_{ns} = I_{ns}^2 R_L$

$$= 2e(I_s + I_d)\Delta f R_L$$

$$= 2e\Delta f(\delta e P / hf + I_d) R_L$$

溫度雜訊： $P_{nt} = I_{nt}^2 R_L = 4KT\Delta f R_L / R_L$

$$= 4KT\Delta f$$

所以總雜訊為

$P_n = P_{ns} + P_{nt}$

$$= 4KT\Delta f + 2e\Delta f(\delta e P / hf + I_d) R_L$$

訊號與雜訊比 $SNR = P_{es} / P_n =$

$$(\delta e P / hf)^2 R_L / [4KT\Delta f + 2e\Delta f(\delta e P / hf + I_d) R_L]$$

上述式子提供一 SNR 計算方法，但在第一級放大器所產生的溫度雜訊也應加以考慮，這樣才能真正估算出在接收器上的 SNR。一個放大器的雜訊輸出，通常是以在放大器輸入端的等效雜訊功率來代表，而在輸入端的溫度雜訊為 $4KT_A\Delta f$ ， T_A 是放大器的絕對溫度°K，故在接收器上的 SNR 為

$$SNR = (\delta eP/hf)^2 R_L / [4K\Delta f(T+T_A) + 2e\Delta f(\delta eP/hf + Id)R_L]$$

此一公式是對進入檢波器的光能為定值的情況，在真正的光纖通訊系統中，不管是使用類比調變或是數位調變，其 SNR 均較為複雜。所幸在保護電驛運用上，大部分的產品，廠家都會提供產生最小輸出 SNR 時的最低限度訊號功率，或是指明在系統上總共容許損失的值。有了這些資料之後，剩下的是考慮光纖電纜、接頭、絞合器的損失就可以了。

肆、保護電驛運用光纖系統概念

在考慮光纖頻道直接運用於保護電驛時，本文建議兩種方法供電驛規畫、運用之參考，或許可充分利用光纖系統的優點，而免除以後諸多困擾。一種方式是使用音頻於光纖系統，則光纖系統將有許多頻道可供利用於保護電驛系統及其他用途，以共同分擔成本，節省投資；另一種方式為光纖直接驅動輸出到電驛系統，此種方式光纖只能使用於保護電驛一種功能。很顯然的，光纖只使用於保護電驛此方式是極不經濟的，是對於光纖頻道頻寬的一種浪費，目前的趨勢是避免作為單一功能使用。但是另一方面而言，如果使用單一用途光纖系統，可以很有效的提高保護電驛系統的

可靠度，從這一觀點來看，單一用途是否對光纖頻道頻寬是一種浪費，則是見仁見智的看法。

一種解決上述困擾的方法為使用雙重用途光纖系統，此種光纖被製成可以傳送兩種頻帶訊號，通常傳送頻帶為成對的 850/1300nm 或 1300/1550nm，保護電驛使用較低波長者，高波長者則使用於高密度的通訊傳輸。

現今輸電線路保護，使用差電流電驛為主保護方式已極為普遍，而其所使用的頻道媒體，絕大部分為金屬副線。此一方式，在某些特殊環境下，飽受感應電壓問題之困擾，偶會因感應電壓而引起電驛誤動作。針對此一問題，其改善方法之一為改採光纖做為訊號傳遞頻道，此不失為克服感應電壓問題的良策。但在規畫時，首先須決定光纖系統的運用方式，如係光纖電纜直接接於保護電驛系統，則從光纖電纜種類、長度，保護電驛系統所採用的光源、接收器的型式等做整體的考量，是事先不能不做的。

光纖系統之設計，要驗證是否可正常運作，通常以下列式子為計算準則：

$$P_T - P_R - M \geq L \times D + L_s \times N_s + L_c \times N_c + L_d \times D$$

P_T ：光源的輸出功率

P_R ：檢波器之最小收訊值

M ：光纖系統餘裕值

L：光纖電纜每公里損失值(dB/km)

D：光纖電纜長度

Ls：光纖絞合器(Splice)損失(dB/個)

Ns：絞合器數量

Lc：光纖接頭(Connetor)損失(dB/個)

Nc：接頭數量

Ld：光纖電纜每公里損失之變動值
(dB/km)一般為0.2dB/km

如某數位式差電流保護電驛系統，欲使用光纖系統為訊號傳輸頻道，已知光纖電纜長度為16公里，保護電驛所擬使用的光源為 LED，光波波長為850nm 或1300nm，接收器為 PIN 二極體。當使用光波波長為850nm 的光源耦合到50 μ m 漸變折射率光纖時，在光纖電纜上的容許損失為40dB；如使用1300nm 光源而光纖電纜使用50 μ m 漸變折射率，則容許在光纖電纜的損失為30dB；而當使用1300nm 光源耦合到9 μ m 單模態光纖電纜時，則在光纖電纜容許的損失值為15dB。

有了上述的基本資料之後，所擬使用的光纖系統能否有效運作，就必須逐一計算各種損失，查驗損失總和是否超越限制值，茲以上述差電流保護系統方式來做說明如下：已知光纖電纜總長為16公里，假設光纜每一公里為一單位。

一、嘗試從光源850nm LED 開始：

50 μ m 漸變折射率光纖損失為：

$$3\text{dB/km} \times 16 = 48\text{dB}$$

15個絞合器(熔接接頭)損失：

$$0.1\text{dB/個} \times 15 = 1.5\text{dB}$$

兩個連接器的損失：

$$1.0\text{dB/個} \times 2 = 2.0\text{dB}$$

整個光纖系統的損失為：

$$48 + 1.5 + 2.0 = 51.5\text{dB}$$

總損失超出光源850nm LED，接收器為 PIN 二極體的容許值，此系統將無法正常運作。

二、嘗試選用損失較低的50 μ m 漸變折射率光纖，其損失為1.5dB/km，及1300nm 的光源。

50 μ m 漸變折射率光纖損失為：

$$1.5\text{dB/km} \times 16 = 24\text{dB}$$

15個絞合器(熔接接頭)損失：

$$0.1\text{dB/個} \times 15 = 1.5\text{dB}$$

兩個連接器的損失：

$$1.0\text{dB/個} \times 2 = 2.0\text{dB}$$

整個光纖系統的損失為：

$$24 + 1.5 + 2.0 = 27.5\text{dB}$$

總損失雖然低於光源1300nm LED，接收器為 PIN 二極體的容許值30dB，但極為接近，餘裕度太少，故雖然可用但不能滿足對於可靠度要求極高的保護電驛系統。

三、再嘗試選用1300nm的光源，及損失更低的9 μ m 漸變折射率光纖電纜，其損失為0.5dB/km。

9 μ m 漸變折射率光纖損失為：

$$0.5\text{dB/km} \times 16 = 8\text{dB}$$

15個絞合器(熔接接頭)損失：

$$0.1\text{dB/個} \times 8 = 1.5\text{dB}$$

兩個連接器的損失：

$$1.0\text{dB/個} \times 2 = 2.0\text{dB}$$

整個光纖電纜的損失為：

$$8 + 1.5 + 2.0 = 11.5\text{dB}$$

總損失值較1300nm LED光源的27.5dB低，PIN二極體的接收器容許值為15dB。故此一光纖系統可正常運作，且尚有3.5dB的餘裕，使用距離與耐用年限均可加長。

現今的光纖技術，更已將光電耦合損失大為降低，使得容許在光纖電纜的總損失大為提高；同時改善光纖與波長的匹配關係，減低了每公里的損失，大大的延長了光纖使用距離。

伍、結論

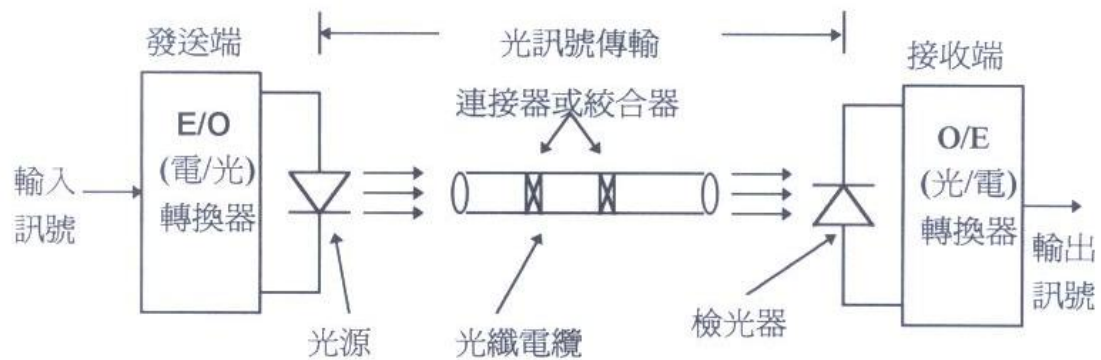
從以上的分析可以看出，保護電驛系統使用光纖，除了要考慮成本之外，尚須評估整體光纖系統的性能。當一光纖系統，經過詳細的評估而決定使用何種光源與光纜之後，爲了提高使用距離

及壽命，並加強可靠性，所能做的只有設法降低在光纜上的損失，亦即每一接頭要盡量做到完美無缺。另一方面，光纖電纜也並非是萬能的，如採用光纜是爲了解決某一難題，則是否會造成另一方面的問題，也是必須事先詳細探討。

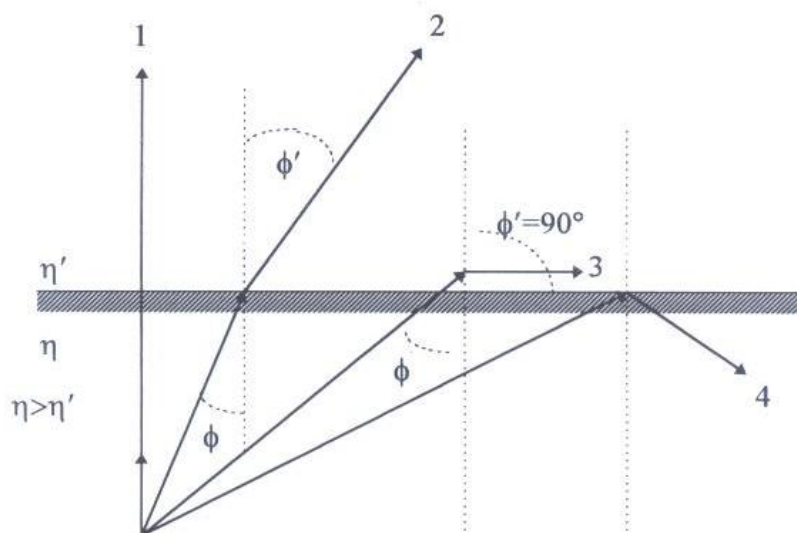
在推展光纜運用的發展上，此一基本方向的正確性是著勿庸議的，但如專用於保護電驛系統，則不如能與其他監視、控制系統共同使用，更能顯示光纖電纜的優越性。對於光纜運用、施工、維護、測試等各項工作，更應詳細規劃，訂定相關作業準則，以求整體光纖系統運用能更趨於完美。

參考資料：

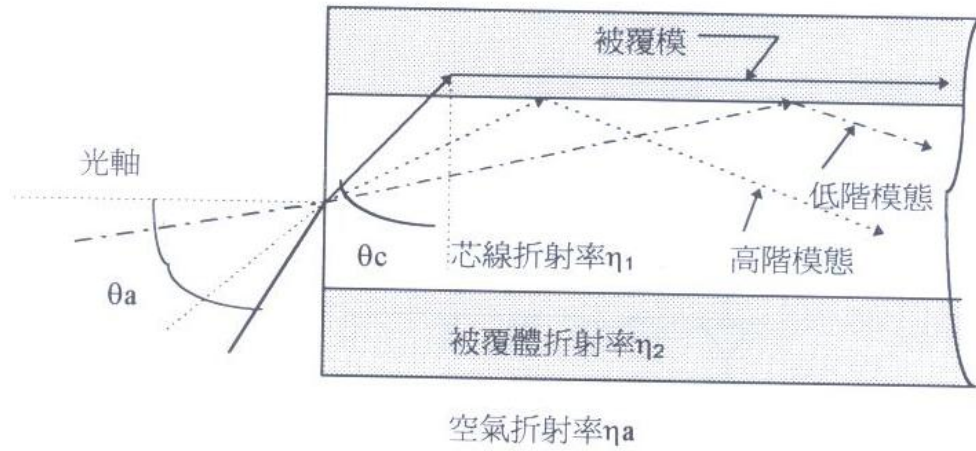
1. General Introduction To Fiber Optic Application By Dennis C. Erickson
2. Fiber Optic Applications In Electrical Power Systems By D.C. Erickson
3. Application Considerations Of Fiber-Optic Channels For protective Relaying By Loger E. Ray
4. Economics Of Conventional Communication Methods By S.A.L. Bhatia



圖一、光纖系統基本架構圖



圖二、折射定律說明圖

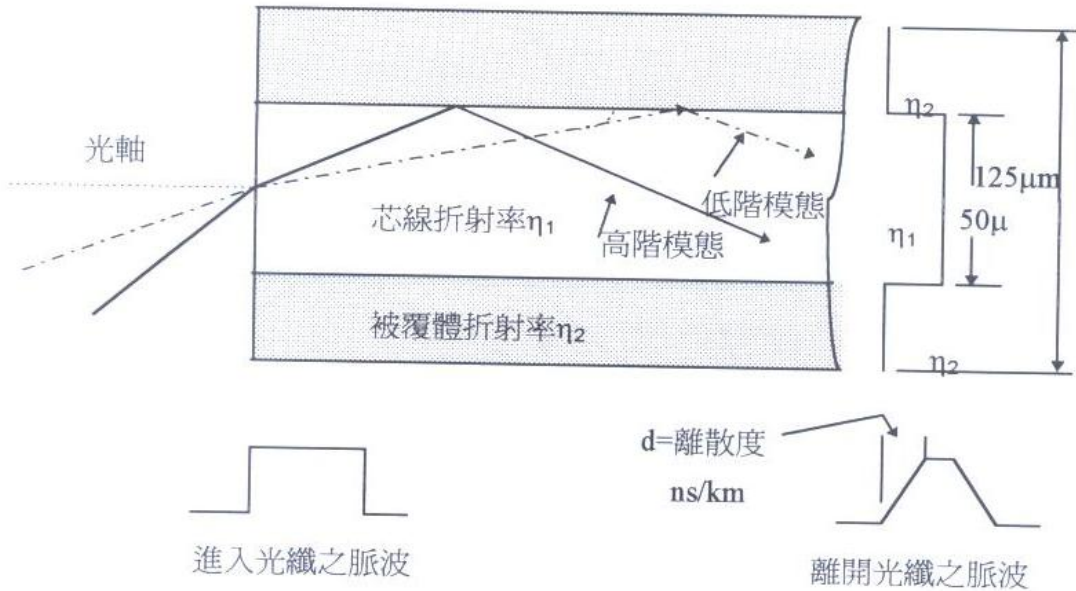


爲了光纖電纜能有效作用必須 $\eta_1 > \eta_2 > \eta_a$

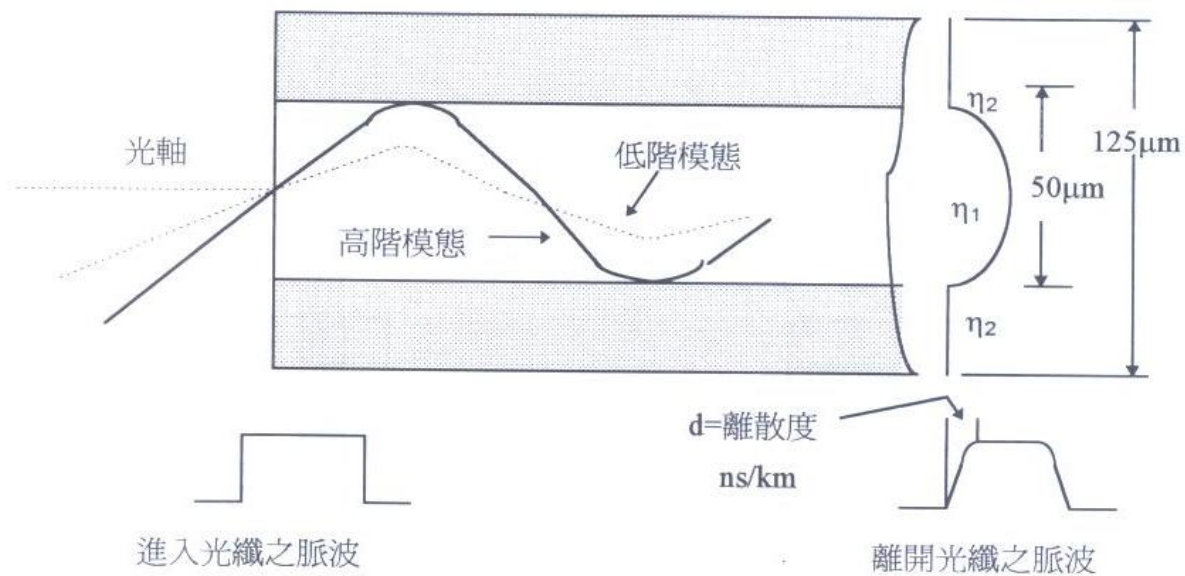
θ_c =臨界角 $\sin(\theta_c) = \eta_2 / \eta_1$

θ_a =接受角 $NA = \sin(\theta_a) = (\eta_1^2 - \eta_2^2)^{1/2}$

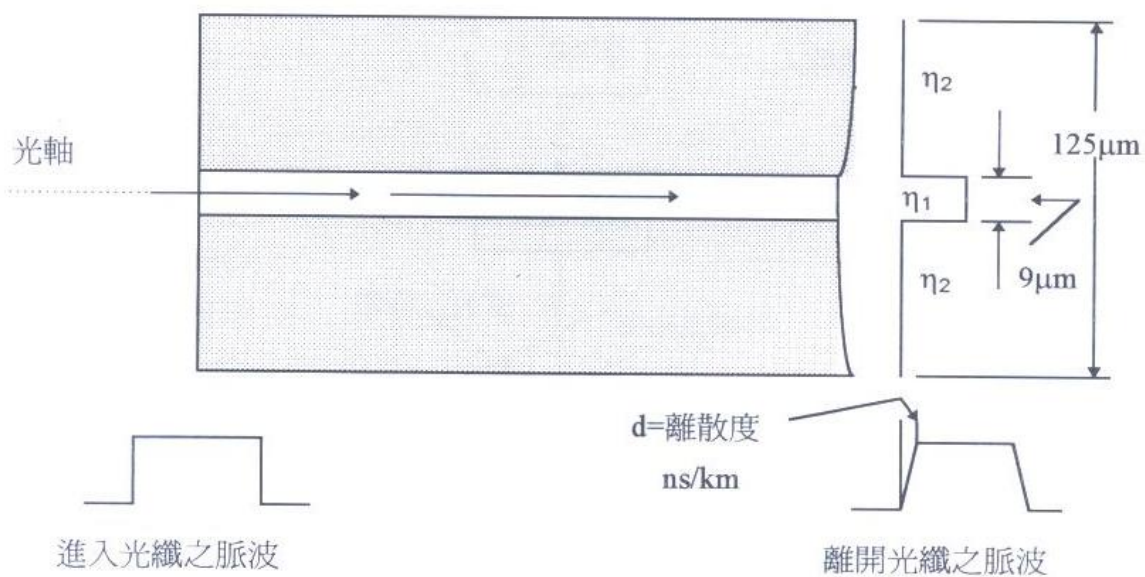
圖三、折射定律應用於光纖電纜



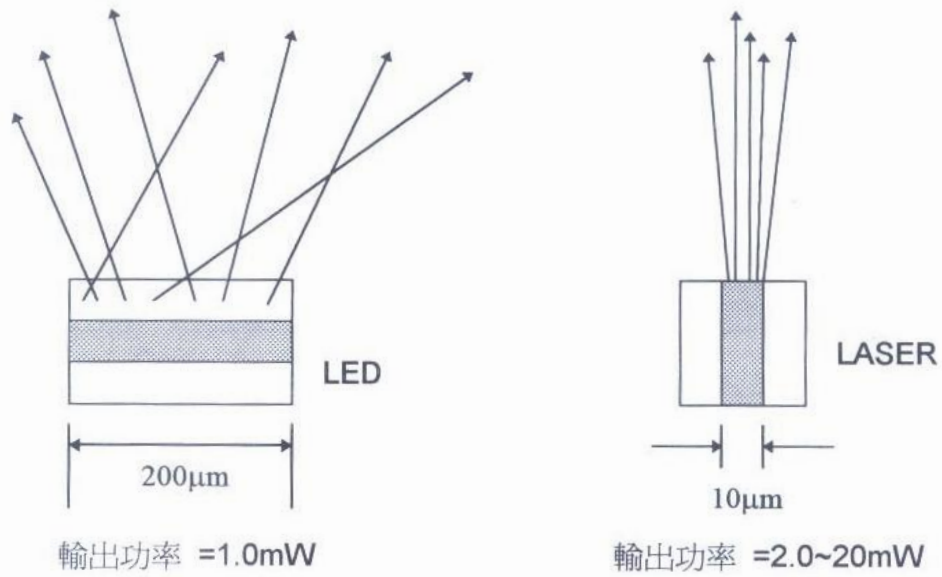
圖四、突變折射率複模態光纖電纜光波行進圖



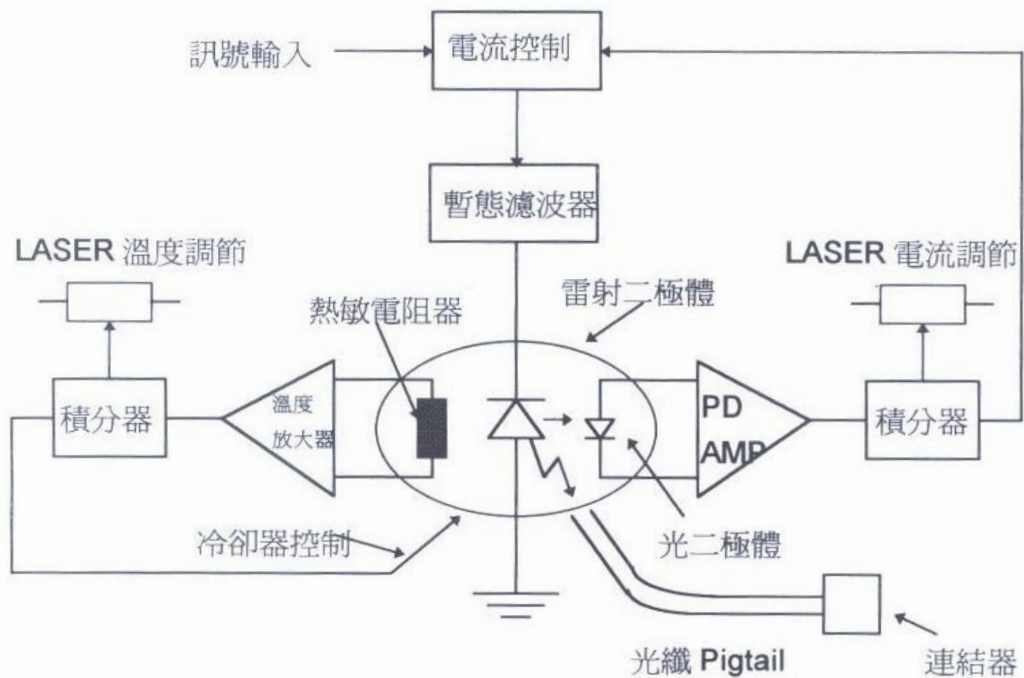
圖五、漸變折射率複模態光纖電纜光波行進圖



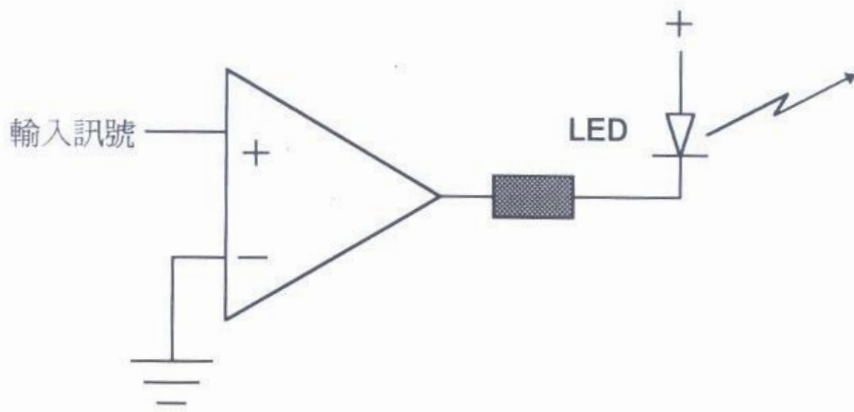
圖六、突變折射率單一模態光纖電纜光波行進圖



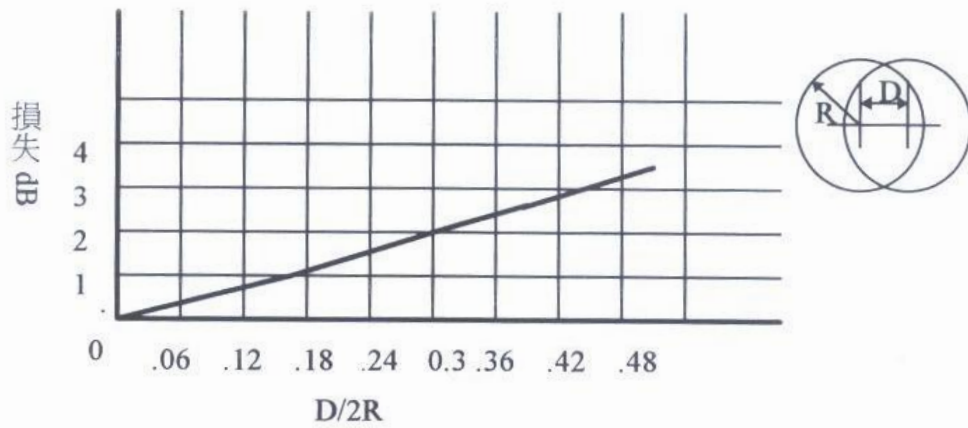
圖七、LED 與 LD 之特性比較圖



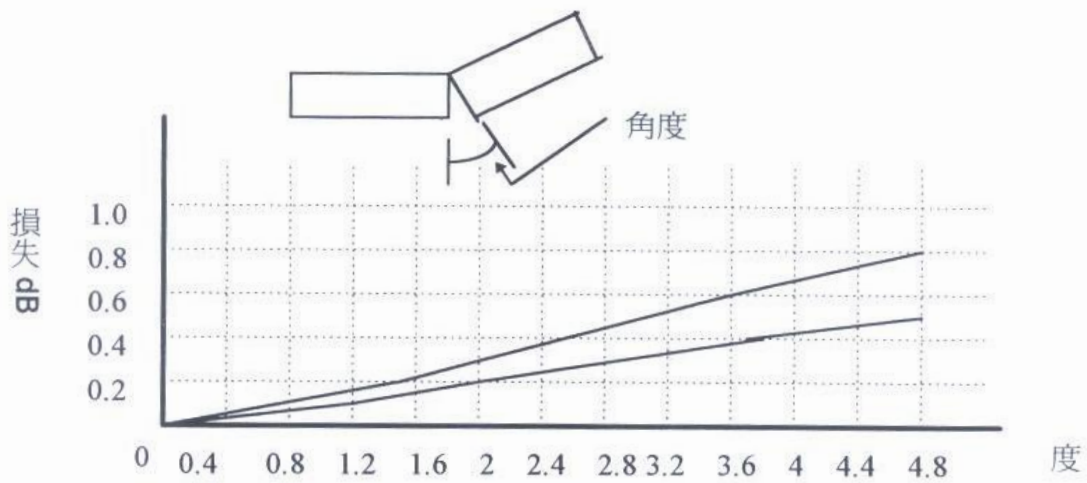
圖八、典型的雷射二極體發送器驅動回路圖



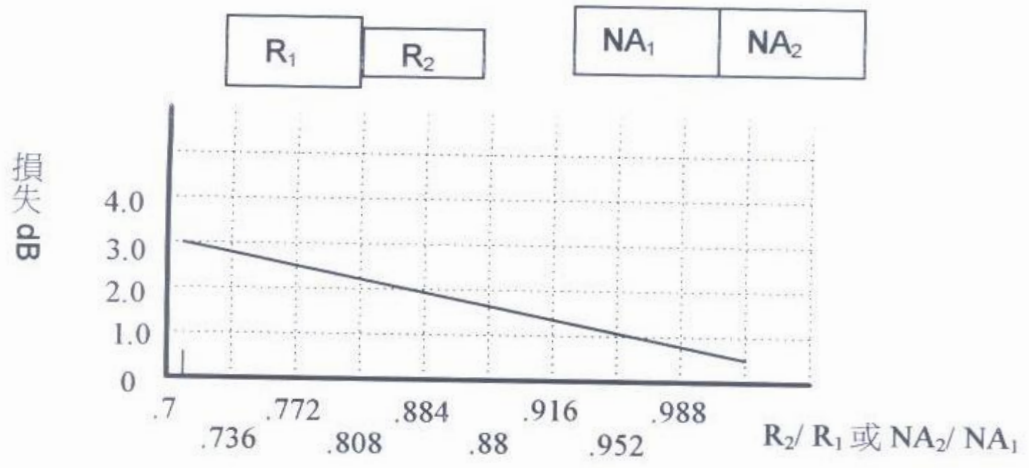
圖九、典型的 LED 驅動回路圖



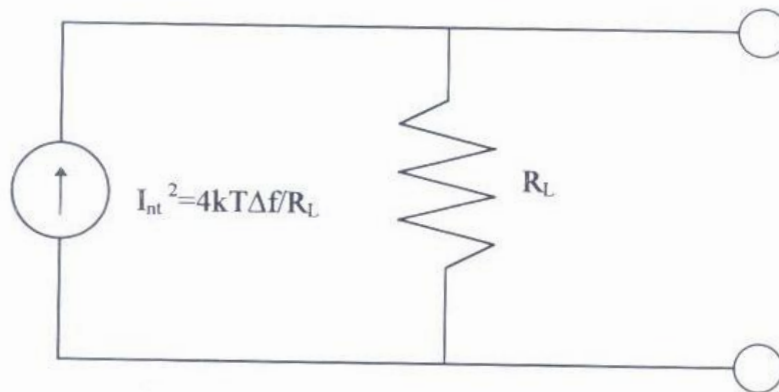
圖十、 a. 光纖芯線未對齊所造成的損失



圖十、 b. 光纖芯線不當結合角度所造成的損失



圖十、c. 不同光纖芯線直徑或孔徑結合所造成的損失



圖十一、溫度雜訊等效模型圖