

光纖通訊系統

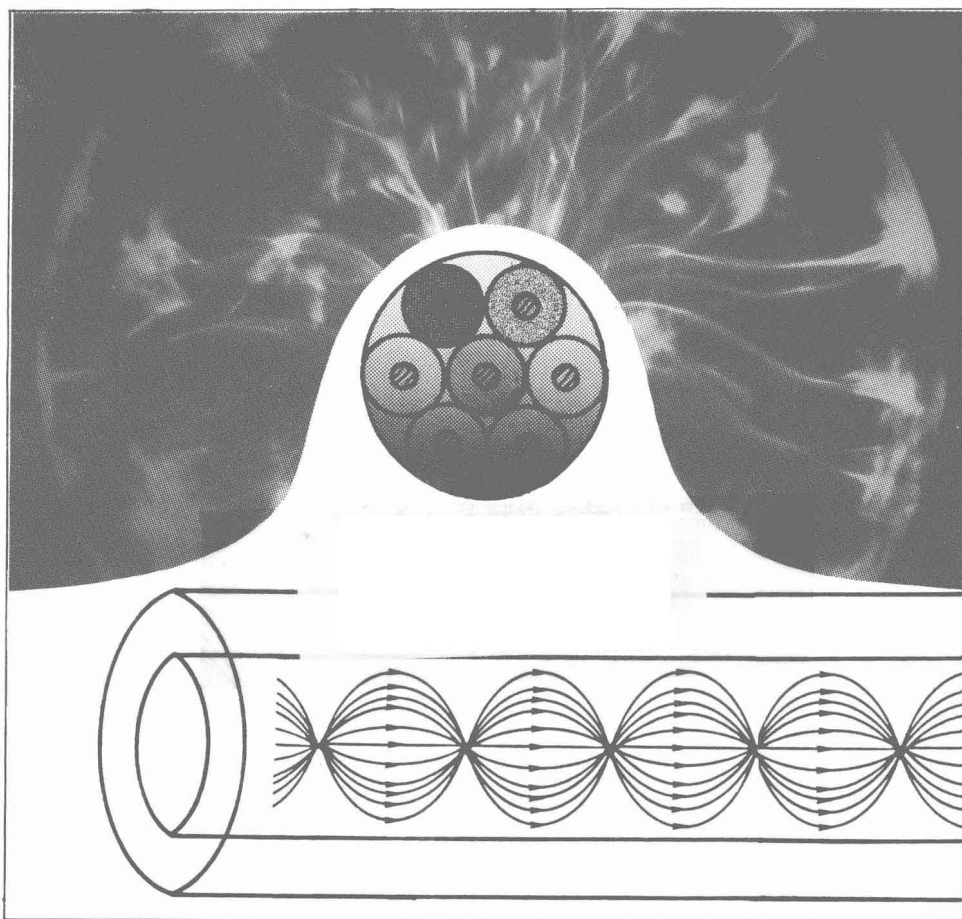
林 愷 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

光纖通訊系統

林 愷 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

法律顧問：陳培豪律師

光纖通訊系統

林 愷 編著

定 價 新台幣 **180** 元

再版 / 79年12月

圖書編號 **0221913**

版權所有・翻印必究

出版者 / 全華科技圖書股份有限公司

地址：台北市龍江路76巷20-2號2樓

電話：5071300(總機) FAX:5062993

郵撥帳號：0100836—1 號

發行人 / 陳 本 源

印刷者 / 宏懋打字印刷股份有限公司

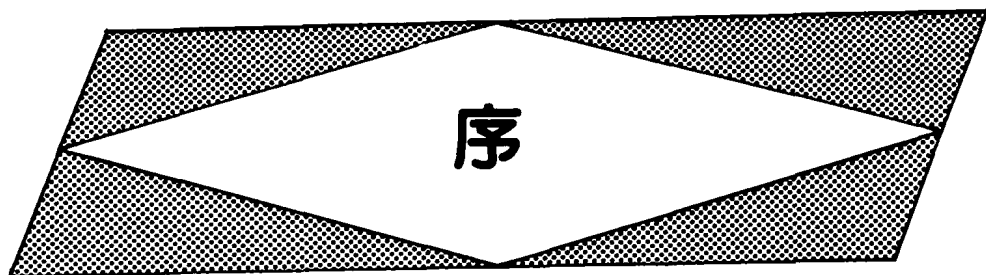
行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號 ISBN 957-21-0016-5

我們的宗旨：

**提供技術新知
帶動工業升級
為科技中文化再創新猷**

資訊蓬勃發展的今日，
全華本著「全是精華」的出版理念
以專業化精神
提供優良科技圖書
滿足您求知的權利
更期以精益求精的完美品質
為科技領域更奉獻一份心力！

為保護您的眼睛，本公司特別採用不反光的米色印書紙！！



在中國古代，曾於邊疆軍防上使用烽火台的裝置，以烽火傳遞告警的軍情。這便是光通訊的最原始型態。但是，一旦天候差，能見度不佳時，烽火的傳遞便產生問題。直到本世紀，科學家便開始尋找一種類似管子之類的東西，使得光可以在其中傳送。如此一來，天候不佳問題便不再對通訊產生障礙。當然，很容易地，科學家們便想到使用玻璃管子作為傳輸的媒介。但是，實驗結果却發現光在玻璃之中傳送的能量衰減損失太大，以致於只要傳送某個極短距離後光線便已消失殆盡。光在玻璃之中能量損失太大的問題一直到六〇年代，經由玻璃製造過程的嚴密雜質控制才得以解決，於是進入了實用的階段。自此之後，無論是光學纖維材料製造技術或是光纖維通訊系統使用元件，經過無數科學家與工程人員的大力研究開發與改良之下，進展可謂是一日千里。相信不久將來，它必能取代傳統電線電纜而成為傳輸媒體的主流。生於這個時代的人們又怎能對它不聞不問、不稍作瞭解呢。

本書首先介紹了有關光通訊以及光纖維通訊的發展歷史背景。然後針對光纖維通訊將會牽涉引用到的基本光學及光波原理作一簡單說明。第二章則詳細敘述了有關光纖維的種種特性以及其對於傳送資訊數量、速度的影響。末了，簡單講解光纖維製造過程。第四、五、六共三章則分別就光纖通訊系統使用之元件——光源，光檢測元件，調

變電路等等作一詳盡的解說。尤其在第六章中，將特別針對目前光纖通訊網路的最新發展予以介紹。第七章說明了光纖通訊系統中的雜訊種類及其對系統的影響。最後，第八章則分別就類比及數位光纖通訊系統的設計流程及注意事項一一解說，並以實例說明。

作者撰寫此書的動機是希望以近乎口語化的說明（改進其他翻譯書籍文字不夠流暢的缺失），使讀者閱讀時不會因文字生澀而却步，從而產生興趣。本書雖經作者親自校訂，但是疏誤遺漏在所難免，還望讀者來函不吝指正。



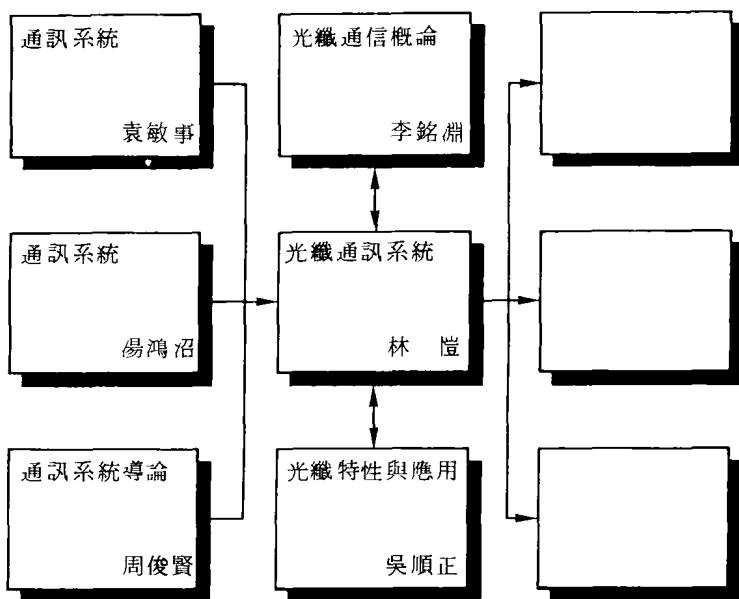
編輯部序

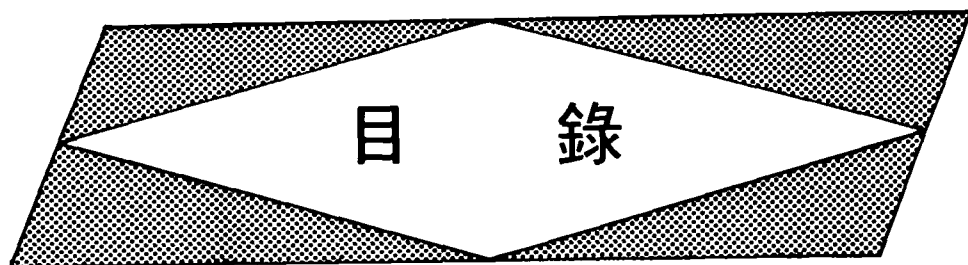
「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

近年來，光電工業已成為繼資訊工業之後，又一倍受國人矚目的科技工業，而光纖通訊正是光電工業發展的重點之一。但觀坊間目前仍鮮有此類相關書籍，本書透過淺易的文字編寫，簡單易讀，由「光學應用」至「光纖系統」，每一單元各自獨立，可依讀者的需要而閱讀。適合大專學生或從事光纖系統工作者，是一本相當好的入門書。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

流 程 圖





第一章 光纖通訊導論	1
1.0 引 言	1
1.1 通訊系統基本架構及組成	3
1.2 光的本質	9
1.3 光纖維通訊優缺點	11
1.4 光纖通訊應用領域	14
第二章 光學及光波基本原理	19
2.0 引 言	19
2.1 光線行進原理	19
2.2 張角數值	21
2.3 電磁波	22
2.4 色散、脈衝失真以及資訊速率	24
2.5 光波共振特性——雷射共振原理	34
2.6 不同介質之間光波的反射與折射	37
2.7 臨界角之反射	39

第三章 光纖維特性	41
3.0 引 言	41
3.1 光纖的種類	42
3.2 光纖衰減特性	49
3.3 光纖的模態 (modes)	53
3.4 資訊速率	56
3.5 光纖製造	63
第四章 光源及光檢測元件	65
4.0 引 言	65
4.1 發光二極體	65
4.2 雷射二極體	75
4.3 光檢測器原理	80
4.4 半導體光二極體	85
4.4-1 PN 接面光二極體	85
4.4-2 PIN 型光二極體	87
4.4-3 累增型光二極體	93
第五章 調變電路	95
5.0 引 言	95
5.1 發光二極體調變電路	95
5.2 雷射二極體調變電路	101
5.3 類比調變信號格式	104
5.4 數位調變信號格式	108
第六章 光纖通訊系統相關元件	117
6.0 引 言	117
6.1 光纖連接與衰減	119
6.2 光纖之接續	125
6.3 光纖連接器	130

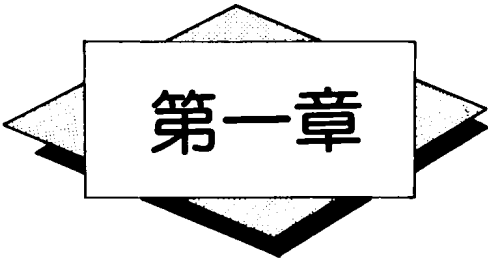
6.4	光源與光纖間耦合方式	138
6.5	通訊資料分配網路型態	143
6.6	方向耦合元件	153
6.7	星形耦合元件	154
6.8	光開關元件	155
6.9	波長區分多工方式	157

第七章 光纖通訊系統中之雜訊問題 161

7.0	引 言	161
7.1	熱雜訊	162
7.2	散彈雜訊	164
7.3	信號雜訊比值	166
7.4	信號傳輸錯誤率	175
7.5	其他雜訊型態	179
7.6	接收電路設計	184

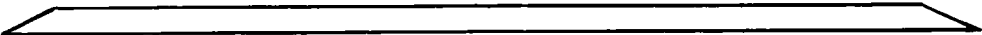
第八章 光纖通訊系統設計 191

8.0	引 言	191
8.1	類比通訊系統設計	191
8.2	數位通訊系統設計	198



第一章

光纖通訊導論



1.0 引言

在本章裡，我們將要定義：何謂**光纖通訊**。同時，將以它與目前各種其他通訊技術及方式作一個比較，想看一看究竟光纖通訊方式有著哪些個優點。當然，到目前為止，光纖通訊仍然存在着某些困難，我們也會做個簡單的說明。也許讀者對這個新的技術並無任何的概念，因此，我們在本書裡將花費一些篇幅對於**光纖維**（fiber）、**光學**（optics）、**通訊**（communication）等幾個預備知識作一簡單的介紹與說明。讀者若是對這些主題已經清楚的話，自然可以略過不讀。

首先，讓我們來回顧一下光纖通訊的歷史背景。遠古以來，“光”（light）總是存在的，但是，真正使用光來作為通訊的媒介應該是在人類有語言文字之後很久的事。以中國為例，古代中國邊疆的防線綿延數千里，為了能夠傳達任何敵人攻擊的消息，於是在防線上每隔數里或數十里設置一個烽火台，該台地勢高聳，目的則是儘量讓鄰近的烽火台無論在什麼樣

的氣候之下都能確實清楚地看到它。當有戰事發生，烽火台上便點起烽火，隣近烽火台一看到它便也立刻點上烽火。如此一來，消息便可以立刻傳遞開來，這便是**光通訊** (optical communication) 的最早型式之一。在這種通訊型態之下，消息的接收是依靠人的眼睛，消息的解釋與處理則是經由人的頭腦。它所傳達消息的速率相當緩慢，而且每次烽火傳送的距離又因受限於人的視覺能力，故距離相當近。一直到十九世紀末葉，大約在西元 1880 年左右，**亞歷山大·葛拉汗·貝爾** (Alexander Graham Bell) 發明了**光電話** (photophone) 才使得光通訊技術向前邁進了一大步。現在到處都可以看到各種的燈光，大多數仍然在傳達某些特定的訊息，例如早期的船與船之間，或者船與岸上之間都是使用燈光的“明滅”來傳遞特殊的字母或符號。還有，現在每輛車子在轉彎時所打出的方向燈，以及交通號誌等都是光通訊世界的一分子。

以上所提的這些例子中，它們所傳遞的**訊息容量** (information capacity) 都是相當低的。對於這個問題的突破則要首推在 1960 年代左右，有關**雷射** (Laser ;Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 的發明。因為雷射具有相當純淨 (purity) 光譜效應的特點，所以它適用於各種光通訊系統。主要是以它作為訊息的載體或載波 (carrier) 之用。早期直接將雷射光導入大氣之中 (所謂的未加導引波 (un-guided wave))，這種通訊方式相當簡單易行，但是缺點是它需要一個潔淨且穩定的大氣狀態。因為如此才可以使得雷射光線直進且不受干擾地一直傳遞直到檢光的裝置處。另外，它還產生一個很嚴重的問題，那就是：雷射光本身即是一種聚光能力極高的裝置，若是人的眼睛不慎直視到它，眼睛將有失明的憂慮。由於上述這些問題以及雷射光只能走直線的缺點，於是人們開始研究：能否找到一種導引波 (guided wave) 的方式讓雷射光在某種導體內傳送，如此可以一舉而解決以上諸問題。很自然地，人們想到“玻璃”。光在玻璃之中傳送的各種理論於是相繼被發表出來。但是，經實驗却發現理論與實用之間有着極大的差異，那就是：光在玻璃導管之中的**傳輸衰減** (transmission attenuation) 相當大，大約是每公里 1000 分貝以上。這個瓶頸一直到 1970 年代才得到進一步的改善。當時

可以經由玻璃導管製作過程的精密控制而使得衰減值大約在每公里20分貝左右。從此之後，光纖通訊便蓬勃起來。

1.1 通訊系統基本架構及組成

通訊系統基本架構如圖 1-1 所示。

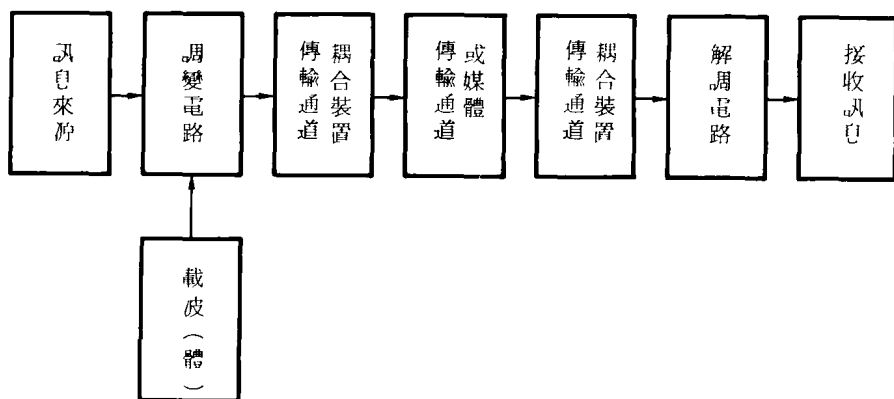


圖 1-1 通訊系統基本架構圖

基本上，任何型態的訊息若要經過某些傳輸媒體（medium）來達成傳送的目的時，必須將原始的訊息經過某些適當的型式轉換，然後可能經由適宜的傳輸載體（波）（carrier）來完成傳遞的作用。所以，通訊系統的基本架構必須包括以下幾項，我們在此逐一加以說明：

- (1) **訊息來源**：訊息來源的型態很多，包括有經過麥克風而來的聲音電氣訊號；電視的影像信號；圖片訊息；電報訊息；終端機與主電腦之間的數位資料……等等皆是。不論是一般的電氣通訊或是光纖通訊系統，訊息來源皆代表電氣訊息的方式，用以區別於更原始的喉音音波等等。
- (2) **調變電路（modulation circuit or modulator）**：在這裡，調變電路基本上有兩種功能：一是將原始電氣訊息轉換成適當的格式（format）；另一種功能則是將此轉換過的格式信號加入載波之中。至於調變的格式原則上可分成兩類：**類比格式（analog format）**及

數位格式 (digital format)。所謂的類比格式是指連續的訊息，而且接收訊息的一端也必須盡量忠實無誤地取得完全的原始訊息。例如電話系統之中，聲音的傳送基本上便屬於此類。而所謂的數位格式是指離散 (discrete) 的訊息，在接收訊息的一端只要知道訊息的本身是什麼，至於離散訊息與訊息之間的時間間隔可以完全不必理會。這便是數位與類比系統最大差異之處。例如電腦與終端機之間便是傳送數位格式的訊息。

- (3) **載體 (波) (carrier)**：載波 (以後通稱為載波) 顧名思義，它代表某種傳送工具，目的在達成訊息傳送功能。在一般電氣通訊系統中，載波常指的是高頻率的正弦波，例如調幅或調頻廣播系統中的中心頻率指的便是此載波頻率。若是在光纖通訊系統中，它便指的是“光”的本身。而這“光”的本身一般而言，實際上是由**雷射二極體 (Laser Diode 或簡稱 LD)**以及**發光二極體 (Light Emitted Diode 簡稱 LED)**來發出。並不是一般的燈泡或燈管所能達成。這兩個光纖通訊的元件可以稱為是光振盪器 (optical oscillator)。在理想的情況之下，這些光源將會產生既穩定而且是幾近單一頻率 (波長) 的光波。同時可以具有足夠的發光功率以達成長距離的傳輸功能。但是，實際上經製造出來的這些光源既不是發出單一頻率的光波而且光功率也只有幾個毫瓦特而已。還好，担任接收光波的光二極體 (Photo Diode 簡稱 PD) 具有相當敏銳的**靈敏度 (sensitivity)**，使得在某些情形之下這些光源仍可適用。不過，如果想大大地拉長傳輸距離時，那麼，光源便是距離的限制因素。LED 或是 LD 等小體積的發光源體，它們所消耗的電氣功率並不太大。同時，對它們進行調變的方式也並不太困難。它們的發光特性可以敘述為：由給予光源元件的電流大小以決定發光的光功率值。換句話說，發光源的元件特性可以由類似圖 1-2 的型式表達出來。

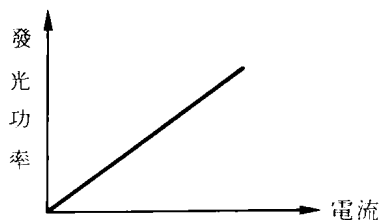


圖 1-2 發光源元件特性舉例

當然，不同的元件將有不同的圖形，這個圖也大大地決定了使用的狀況。一般製造者在賣出這些元件時也必須附上這些特性曲線圖。一般稱此圖為該發光元件的 **L-I 曲線** (Light power-Current curve)。

載波的選定主要是依據傳輸媒體的特性。例如：在電氣的同軸電纜通訊系統中，因為每一條電纜有其適於傳送電氣訊號的頻率範圍，所以，我們必須依據它而適當地選擇載波。同理，在光纖通訊系統中，因為光纖導體本身對於各種不同波長的光所展現出來的傳輸衰減特性也不盡相同，所以，當我們在選擇光源元件時，也必須考慮光纖媒體本身的特性，適當選取適宜發光波長的光源載波元件。

- (4) **傳輸通道耦合裝置**：所謂的傳輸通道耦合裝置目的是在使調變電路的輸出能夠最方便且最有效率地饋 (feed) 入傳輸通道之中。在無線電或電視廣播系統時，它指的便是發射天線 (antenna)，此時的傳輸通道便是大氣。在一般有線的導引波系統 (例如電話系統) 中，它指的便是很簡單的一個接頭。若是在大氣光視線通訊系統時，此耦合器指的便是一個透鏡，用它來將發出的光聚集起來對準接收裝置發射出去。倘若是光纖通訊系統時，此時所謂的通道耦合裝置 (channel coupler) 必須能夠將光源發出的光束 (light beam) 有效地投射入光纖維導管之中。然而，要使光束投射入直徑約 50 微米 (micro-meter; 10^{-6}m) 的光纖維導管之中實在不是一件容易的事。所以，光纖通訊系統之內的傳輸通道耦合器可以是類似圖 1-3 的結構。

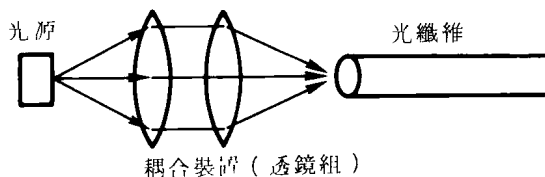


圖 1-3 光纖維傳輸通道耦合裝置舉例

當然，若想得到更好的**耦合效率**（coupling efficiency），必須有更複雜、更精細的耦合裝置設計，成本花費自然要增加。所以，這一切決定於系統設計，有關系統設計，我們在最後一章將會提到。

(5) **傳輸通道**（transmission channel）或**媒體**（medium）：一般電氣通訊的傳輸通道有：

- 大氣（atmosphere）：例如無線電、電視廣播。
- 對線（pair of lines）：例如電力系統、電話系統便是。
- 同軸電纜（coaxial cable）：例如社區共用電視系統（CATV）便是。
- 導波管（wave guide）。

而在光通訊的領域裡，傳輸通道有二：

- 大氣：提供光的直視通訊之用。
- 光纖維：它屬於有線方式的光通訊，也是本書所要探討的主題。

現在我們先簡單地說明一下有關光纖維方式的傳輸通道所具有的一些特性。當然，它與傳統電氣電纜的特性有著相當大的差異。光纖維有時也稱為玻璃纖維（glass fiber），我們對光纖維特性的要求主要的有：低傳輸衰減及大的**光線接收錐角**（light acceptance cone angle）。當傳輸的距離要求相當遠時，這兩個要求便顯得相當重要。當然，這也與光檢測體的光接收靈敏度有關。另外，還有一個要求因素是光纖維的光傳播時間（light propagation time）。影響一個光波在光纖維中傳播所花費的時間，其因素主要有二：

- (1) **光纖維的長度**：長度越長當然所花費的時間自然越高。
- (2) **光波的波長**（或光波的頻率）：因為光纖維的折射率是波長（或頻率）的