

通信工程丛书

# 光纤通信工程

赵梓森 等 编著

光纤通信

中国通信学会主编 • 人民邮电出版社

73.4610  
776  
3

通 信 工 程 丛 书

# 光 纤 通 信 工 程

赵梓森 等编著

中国通信学会主编·人民邮电出版社出版

8710658

## 内 容 提 要

本书较全面地介绍了以光纤作为传输介质的光通信系统的技术问题，并侧重于问题的工程性，对于制造工艺、器件机理以及有关数学理论不作过多阐述。书中涉及光纤光缆、光电子器件、发信装置、接收装置和光纤通信系统等各个方面。

本书可供光纤通信领域的工程技术人员和高等院校的师生阅读参考。

D060/5

### 通 信 工 程 丛 书 光 纤 通 信 工 程

赵梓森 等编著

责任编辑：李树岭

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

北京兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 销

开本：850×1168 1/32 1987年2月 第一版

印张：17<sup>16</sup>/<sub>32</sub> 页数：280 1987年2月北京第一次印刷

字数：465千字 印数：1—8,500册

统一书号：15045·总3245-有5473

定价：3.85元

## 丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员系统地掌握有关专业的基础理论知识，提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力。了解通信技术的新知识和发展趋势，以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献，我会与人民邮电出版社协作，组织编写这套“通信工程丛书”，陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发，密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要，阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识，包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求，以及技术更新等方面。力求做到资料比较丰富完备，深浅适宜，条理清楚，对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材，不仅介绍有关的物理概念和基本原理，而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际；论证简明扼要，避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们，我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议，使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

一九八四年七月九日

## 前 言

光纤通信是一门新的通信技术，有很多的优点，它的出现，将使通信技术发生重大变革。本世纪末，人类将进入一个信息时代，光纤光缆便是传输信息的主要介质。世界各国均已觉察到光纤通信的重要性，纷纷集中人力物力，积极发展，现在已进入实用阶段。

同样，光纤通信在国内也已取得了很大的进展，正开始推广应用，希望了解和掌握光纤通信技术的人正在日益增多。为了适应这种需要编写了本书。

本书是“通信工程丛书”之一，着重于工程应用和系统设计。对于制造工艺、器件机理以及有关数学理论不作过多阐述。必要的原理和概念，也作了适当介绍。阐述时，力求深入浅出、通俗易懂。

本书内容包括：光纤光缆、光电子器件和光通信系统等。本书的对象是从事通信的工程技术人员以及通信专业院校师生。

本书由武汉邮电科学研究院赵梓森（第一、九、十一、十五章）、黄嘉义（第十二、十四章）、邹林森（第二、五、十三章）、黄定国（第三章）毛谦（第八、十章），中国科学院半导体研究所杜宝勋（第六章）、王树堂（第七章），电子工业部1423所叶学玲（第四章）组成的《光纤通信工程》编写组编写。

由于作者水平有限，错误之处望读者提出批评指正。

编者

1984.4

# 目 录

## 第一章 概论

|                 |   |
|-----------------|---|
| 1.1 光纤通信发展史     | 1 |
| 1.2 光纤通信的优点及其应用 | 4 |
| 1.3 光纤通信的调制方式   | 5 |
| 参考文献            | 7 |

## 第二章 光纤及其特性

|                      |    |
|----------------------|----|
| 2.1 概述               | 9  |
| 2.2 数值孔径和射线在光纤中的传播路径 | 17 |
| 2.3 光纤传输的波动理论        | 26 |
| 2.4 光纤的色散和带宽         | 40 |
| 2.5 光纤的机械特性和温度特性     | 51 |
| 2.6 单模光纤及其参数         | 55 |

## 第三章 光纤制造工艺

|                  |    |
|------------------|----|
| 3.1 概述           | 61 |
| 3.2 光纤预制棒的熔炼工艺   | 62 |
| 3.3 光纤的拉制工艺      | 69 |
| 3.4 光纤的一次涂覆和套塑工艺 | 71 |
| 3.5 光纤材料及其提纯     | 74 |

## 第四章 光缆

|                  |     |
|------------------|-----|
| 4.1 概述           | 81  |
| 4.2 光缆结构         | 85  |
| 4.3 光缆的温度特性      | 95  |
| 4.4 光缆的机械性能和例行试验 | 100 |

## 第五章 光纤光缆的测量

|               |     |
|---------------|-----|
| 5.1 衰减和衰减谱的测量 | 107 |
| 5.2 带宽的测量     | 117 |

|                 |                      |     |
|-----------------|----------------------|-----|
| 5.3             | 折射率分布的测量             | 125 |
| 5.4             | 数值孔径的测量              | 140 |
| 5.5             | 几何特性的测量              | 145 |
| 5.6             | 模内色散(波长色散)的测量        | 149 |
| 5.7             | 各种测量方法的评述            | 153 |
| 5.8             | 单模光纤特性测量             | 155 |
| 5.9             | 预制棒的质量检查和纤芯-包层半径比的测定 | 159 |
| <b>第六章 光源</b>   |                      |     |
| 6.1             | 概述                   | 165 |
| 6.2             | 电注入半导体发光             | 169 |
| 6.3             | 半导体光源的制作             | 179 |
| 6.4             | 半导体发光二极管             | 185 |
| 6.5             | 半导体激光器               | 196 |
| 6.6             | 半导体光源与光纤的耦合          | 217 |
| 6.7             | 半导体光源的退化和寿命          | 223 |
|                 | 参考文献                 | 226 |
| <b>第七章 光检测器</b> |                      |     |
| 7.1             | 概述                   | 227 |
| 7.2             | 光电二极管                | 237 |
| 7.3             | 雪崩光电二极管              | 254 |
| 7.4             | 小结与展望                | 270 |
|                 | 参考文献                 | 274 |
| <b>第八章 光发送机</b> |                      |     |
| 8.1             | 概述                   | 277 |
| 8.2             | 光源器件的驱动和光功率控制        | 278 |
| 8.3             | 发送光功率的监测和控制          | 293 |
| 8.4             | 光源的保护                | 302 |
| 8.5             | 外调制技术                | 308 |
|                 | 参考文献                 | 315 |

## 第九章 数字光接收机

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 9.1 概述 .....                                  | 317 |
| 9.2 电子线路的考虑 .....                             | 319 |
| 9.3 数字光接收机的噪声 .....                           | 325 |
| 9.4 PIN光接收机的灵敏度和误码率计算 .....                   | 334 |
| 9.5 APD光接收机的误码率计算 .....                       | 337 |
| 9.6 APD光接收机的灵敏度和最佳倍增 .....                    | 339 |
| 9.7 S. D. Personick—CCITT光接收机灵敏度计算方法<br>..... | 341 |
| 9.8 数字光接收机设计考虑 .....                          | 352 |
| 参考文献 .....                                    | 359 |

## 第十章 线路码型

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 10.1 概述 .....           | 361 |
| 10.2 光纤通信常用线路码型 .....   | 363 |
| 10.3 编译码器 .....         | 386 |
| 10.4 误码检测方法 .....       | 399 |
| 10.5 线路码型的参数和性能比较 ..... | 406 |
| 10.6 典型方案 .....         | 412 |
| 参考文献 .....              | 419 |

## 第十一章 数字光纤传输系统的估算

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 11.1 传输距离的估算和系统富余度 .....              | 421 |
| 11.2 光纤线路的传输特性 .....                  | 424 |
| 11.3 系统传输距离和光纤带宽的关系 .....             | 429 |
| 11.4 确定系统传输距离的图解方法 (CCITT方法)<br>..... | 433 |
| 11.5 光纤线路的接续损耗指标的确定 .....             | 436 |
| 11.6 其他问题的考虑 .....                    | 439 |
| 参考文献 .....                            | 447 |

## 第十二章 实用化系统

|                         |                                 |     |
|-------------------------|---------------------------------|-----|
| 12.1                    | 概述 .....                        | 449 |
| 12.2                    | CCITT关于光纤数字线路系统的建议 .....        | 450 |
| 12.3                    | CCITT关于数字系统的接口建议 .....          | 455 |
| 12.4                    | 维护告警系统和公务系统 .....               | 458 |
| 12.5                    | 远距离供电和遥信系统 .....                | 460 |
| 12.6                    | 机架结构 .....                      | 464 |
| 12.7                    | 光缆通信系统在通信网中的应用 .....            | 466 |
| <b>第十三章 光缆线路工程实施</b>    |                                 |     |
| 13.1                    | 光纤和光缆的接续 .....                  | 469 |
| 13.2                    | 光缆敷设 .....                      | 474 |
| 13.3                    | 光缆线路测试 .....                    | 476 |
| 13.4                    | 光缆线路的维护 .....                   | 482 |
| 13.5                    | 光缆可靠性考虑 .....                   | 484 |
| 13.6                    | 典型的光缆线路资料 .....                 | 485 |
|                         | 参考文献 .....                      | 486 |
| <b>第十四章 其它光纤通信系统的应用</b> |                                 |     |
| 14.1                    | 概述 .....                        | 487 |
| 14.2                    | 模拟信号直接光强调制系统 .....              | 488 |
| 14.3                    | 模拟信号直接光强调制系统的主要指标——信噪比<br>..... | 495 |
| 14.4                    | 应用实例 .....                      | 506 |
| 14.5                    | 多终端网络光纤通信系统 .....               | 508 |
| <b>第十五章 光纤通信系统的展望</b>   |                                 |     |
| 15.1                    | 单模光纤传输系统 .....                  | 517 |
| 15.2                    | 光波长划分复用 .....                   | 527 |
| 15.3                    | 光外差技术 .....                     | 530 |
| 15.4                    | 光纤新材料 .....                     | 541 |
| 15.5                    | 集成光学与光纤通信 .....                 | 542 |
|                         | 参考文献 .....                      | 550 |

# 第一章 概 论

## 1.1 光纤通信发展史

所谓光通信就是利用光波来载送信息，实现通信。

广义地说：古代的烽火台、现在用以指挥交通的红绿灯均可算是光通信。然而近代的光通信是指容量大、传输距离远的光通信，而不是那种简单的原始装置。

容易想像，利用光在空气中直线传播的特点，进行大气传输光通信，不需任何通信线路，简单经济。1960年Maiman发明了激光器，产生了单色相干光，使高速的光调制成为可能。美国林肯实验室首先利用氦氖激光器通过大气传输了一路彩色电视。相继出现各种各样的大气传输光通信实验。后来发现大气传输光通信有许多严重的缺点：

(1) 气候对通信的影响十分严重。大雾时，通信几乎中断。

(2) 由于大气气温的不均匀、使它的密度或折射率不均匀，以及大气湍流的影响，使光线发生漂移和抖动。通信的信噪比变劣，传输不稳定。

(3) 大气传输通信设备要求设在高处，收发两端直线可见。这种地理条件使大气传输光通信的使用有局限性。

光实质上是频率极高的电磁波 ( $3 \times 10^{14}$  赫以上)，可以预计用光作载波进行通信，容量一定很大，是现有通信方式的千百倍，具有很大的吸引力。

为了避免大气气候对光通信的影响，有人在一条很长的管道内进行光传输。为了防止光线发散，在一定距离的管道内放置聚焦透镜，所以这叫做透镜光波导。虽然实验是成功的，但这种方法太复

杂。安装机械精度极高，轻微的振动和温度变化均会引起严重的影响，不能实用。

1966年，英籍华人高锟（C.K.Kao）和Hockham预见利用玻璃可以制成衰减为20dB/km的通信光导纤维（简称光纤）。当时，世界上最优良的光学玻璃衰减达1000dB/km左右。1970年，美国康宁玻璃公司首先制成衰减为20dB/km的光纤。之后，世界各国纷纷开展光纤通信的研究。当时出现各色各样的光纤。有采用多组分玻璃作材料，有采用石英作材料，有采用塑料作材料制成的光纤，有采用液体作心材料的液心光纤等等。液心光纤是在玻璃毛细管内充有透明的液体如 $\text{CCl}_4$ （四氯化碳）等。液心光纤的衰减可达4 dB/km，但由于液体的折射率受温度影响，严重地破坏了光波导的传输性能，而且工艺复杂，强度也不好，故未被采用。多组分光纤和塑料光纤工艺简单，经济，但衰减较大，可用于短距离光纤通信。石英光纤衰减小，性能稳定，强度大，因此被广泛采用。

光纤的主要作用是引导光线在光纤内沿直线或弯曲的途径传播。光纤是由两种折射率不同的玻璃构成的，即折射率较大的芯玻璃在中心，折射率较小的包层玻璃在外表。当光线在光纤波导内传播时，由于全反射原理，光线不致射出光纤以外。

有人在玻璃丝外，镀金属反射膜来构成光波导，实验证明它的衰减约200dB/km，不如石英光纤，这是因为介质全反射的损耗小于金属膜反射。

为了实现长距离的光纤通信，必须减小光纤的衰减。C.K.Kao早就指出降低玻璃内的过渡金属杂质离子是降低光纤衰减的主要因素，据此，在1974年，光纤衰减降低到2 dB/km。另外，玻璃内的OH离子对衰减也有严重的影响，在1976年，降低OH含量就出现低衰减的长波长窗口1.2, 1.3, 1.55 $\mu\text{m}$ 。于1980年光纤衰减低达0.2dB/km (1.55 $\mu\text{m}$ )，接近理论值。这样，使得进行长距离的光纤通信成为可能。

要实现大容量的通信，就要求光纤有很宽的带宽。单模光纤的

带宽最宽，是理想的传输介质，因此，最早考虑的是采用单模光纤。但是它的纤芯直径很细，仅几个微米，所以工艺要求极高，在70年代初，难以达到，所以，大多研究纤芯直径较大的多模光纤。由于光能在光纤中传播、各模式之间有光程差，造成光纤有较大的色散，即光纤的带宽不很宽。1976年，日本板玻璃公司研制出渐变型光纤，又称自聚焦光纤(SELFCO)，大大地改善了光纤的带宽，可达1千兆赫·公里。在80年代，由于光纤制作工艺的进步，单模光纤也研制成功，带宽达几十千兆至数百千兆赫·公里。这一成果，使得超大容量的光纤通信成为可能。

要实现光纤通信需要有适当的光源。70年代光纤低衰减“窗口”在光波长 $0.85\mu\text{m}$ 处的近红外区。所以当时主要发展GaAlAs(镓铝砷)注入式半导体激光器(Hall, Nathan, 1962年)。由于制造半导体激光器的工艺极为复杂，当时的激光器尚不能在室温下运用，寿命很短，甚至有些著名半导体专家也曾失去信心。经过艰难的工作，1970年制出了室温连续运行的GaAlAs双异质结注入式激光器(Hayashi等)。与此同时，发展了GaAlAs发光二极管(Burrus, 1971)。发光二极管寿命长，但速率较低，功率小，谱线宽，属于非相干光源。随着工艺的进步，短波长( $0.85\mu\text{m}$ )GaAlAs激光器的外推寿命已达几十万小时。为了配合光纤的长波长“窗口”( $1.2, 1.3, 1.55\mu\text{m}$ )，研制出InGaAsP(铟镓砷磷)长波长激光器和发光二极管。

光检测器件也有相应地发展。研制出适用于短波长的光电检测器，如Si-PIN管(硅光电二极管)和Si-APD管(硅雪崩光电二极管)。也研制出适用于长波长的光电检测器，如InGaAsP/InP的PIN管和APD管，还有Ge-APD管。然而长波长的光电检测器的性能尚不能与短波长的相比，更好的长波长器件尚有待探索。

1976年后，各种实用的光纤通信系统陆续出现。美国在亚特兰大安装了商用系统，码率为44Mb/s，传输距离为10km左右。日本最早把光纤通信系统用于电力部门。在80年，世界许多国家都研制成

商用的光纤通信系统，短波长系统，码率一般在140Mb/s以下，传输距离约10km左右。这些系统已经优于现有的电缆系统。在实验室中，长波长多模光纤传输码率32Mb/s，传输距离达53km。单模光纤码率1Gb/s，传输距离达84km；码率445Mb/s，传输距离达134km。光纤通信系统具有容量大，传输距离远的优越性已经充分显示出来。

近年来，各种光频复用技术、相干光通信和集成光学有一定进展，超低损耗的光纤材料也在探索。新一代光纤通信技术将要来临，前景宽广。

## 1.2 光纤通信的优点及其应用

光纤通信的主要优点是容量大、传输距离远。如果与电缆或微波通信相比，已经显示出明显的优越性。具体比较如下：

| 通信手段 | 容量 (路)         | 中继距离 (公里) | 1000公里中继器个数 | 备 注     |
|------|----------------|-----------|-------------|---------|
| 微波   | 960            | 50        | 20          |         |
| 小同轴  | 960            | 4         | 250         |         |
| 中同轴  | 1800           | 6         | 166         |         |
| 光缆   | 1920           | 30        | 33          |         |
| 光缆   | 14000 (1Gb/s)  | 84        | 11          | Bell实验室 |
| 光缆   | 6000 (445Mb/s) | 134       | 7           | NTT实验室  |

光纤通信的其他优点还很多：可以节省铜和铅，1千公里的光纤线路可以节省铜150吨、铅500吨；光纤是玻璃制成的，不怕潮湿；光纤通信不受电磁干扰，无金属光缆，可以在强电场环境下工作，如在电力网或变电所内作通信控制线路；光纤的抗腐蚀能力强，可以在具有有害气体环境下工作，如化工厂矿等；光纤的重量很轻，安装于飞机、火箭、导弹、潜艇内，可以减轻负载，从而减少燃料，提高速度；光纤光缆具有抗核辐射能力；在军事上，制作轻质光缆，每公里仅5公斤左右，用直升飞机空投临时紧急光纤线

路，可以应付敌方突然袭击采用的强烈干扰。

随着通信事业的发展，人们将进入信息社会。各种业务，如电视商品信息、信息库的信息共享、文化娱乐……，将要迅速发展。这就要求多路图象、数据信道直接接到用户。宽带的用户光纤系统也必将发展，那时光纤通信将普及到各个用户。

目前，光缆通信系统的各种应用及其带来的好处见下表（表1·1）：

表1·1

| 应用场合              | 光 纤 特 点 |     |     |     |     |     |
|-------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   | 抗干扰     | 绝缘好 | 重量轻 | 频带宽 | 抗辐射 | 抗腐蚀 |
| 电力通信、控制系统         | ○       | ○   |     |     |     |     |
| 铁道通信、信号系统         | ○       |     |     |     |     |     |
| 电子计算机联线           | ○       |     |     |     |     |     |
| 飞机、导弹、军舰、潜艇通信控制系统 | ○       |     | ○   |     |     |     |
| 高能物理、抗核辐射通信       |         | ○   |     |     | ○   |     |
| TV中心或工业TV传输       | ○       |     |     | ○   |     |     |
| 化工厂内通信控制系统        |         |     |     |     |     | ○   |
| 矿井、水下系统           |         | ○   |     |     |     |     |

### 1·3 光纤通信的调制方式

要实现光通信就必须对作为载体的光进行调制。采用机械的办法可以实现光调制，但速率很低。利用电光晶体或磁光晶体可以对穿过晶体的光束调制，速度很高，电光调制速率可达数千兆赫。注入式半导体激光器可以利用注入电流直接调制发出的光束，速率可达1千兆赫。由于光纤通信中大多采用半导体注入式激光器，调制方式大多采用直接调制。调制光功率的调制方式称为光强调制

(IM)。

光的频率调制，虽然也有一些试验，由于目前技术水平所限，尚不能实用。

最简单的光强调制的光纤通信系统的原理方框图如下。

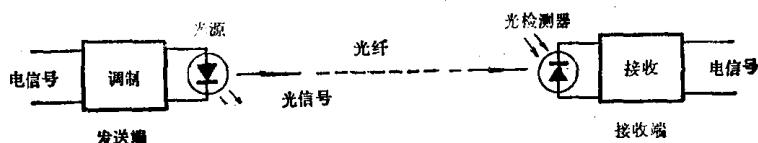


图 1-1 光纤通信系统原理图

发送端带有信息的电信号，经调制电路，驱动光源，实现光强调制。被调制后带有信息的光束进入光纤，传输到接收端。光接收机上装有检测器，把光强调制的光能还原成带有信息的电信号，这就是光纤通信的基本原理。

利用光强调制可以实现模拟通信和数字通信。例如，用电视或话音信号直接调制光强就可实现模拟光通信。如把数字码流直接调制光强，就可实现数字光通信。

由于目前的光源和光电检测器件的非线性比较严重，不能采用模拟频分复用多路通信，因为光器件非线性产生的串音十分严重。在非线性要求低的情况下，如传送电视信号或单路宽带音频信号，光强模拟调制即光调幅方式可以达到要求。

多路通信的光纤通信系统，通常采用数字方式。它对光电器件的非线性要求低。所以数字通信在光纤通信中占重要地位。由于光纤的传输频带很宽，正能满足数据信道的宽带要求。数字通信伴随光纤通信而得到发展。市内电话的时分程控交换系统属于数字通信范畴，将光纤通信和程控交换相结合，是相当理想的。

把调频的电信号，送入光源中进行光强调制，也可以实现多路传输，因为光源的非线性对调频信号影响较小。同样可以采用脉冲调频、脉冲调相和脉冲调宽的光强调制来传输多路复用信号。它们属于模拟通信范畴。它们的抗干扰特性优于调幅制式，所以传输距

离可以更远。

光频划分复用通信是较有前途的复用方式，它利用不同光频的光源，经分别调制后，发出不同频率的光信号，注入同一根光纤中传输，在接收端利用滤光片把它们分开，就可实现光频划分复用，即同一根光纤可传送几个信道，使传输容量增大几倍。

此外，利用光的方向性，在一根光纤上，用一种光波长，实现收发双向光纤通信，实验证明也是可能的。

其他光纤通信的新制式，如光外差技术等，将在后面介绍。

### 参 考 文 献

- 〔1〕 Miller, Chynoweth, Optical Fiber Telecommunications  
p. p 1~15 (1979)
- 〔2〕 Link, R. A. IOOC Post-Deadline Paper p.32 (1983)
- 〔3〕 Ichihashi, Y. IOOC Post-Deadline Paper p.34 (1983)
- 〔4〕 大越孝敬，光学纤维基础，刘时衡等译，人民邮电出版社p.p 1~  
17 (1979)

