

光纤通信

上

[美] S·E 米勒 A·G 楚诺委斯 主编

光 纤 通 信

上 册

〔美〕S.E.米勒 A.G.楚诺委斯 主编
白其章 宋丽文 徐乃英 译

人 民 邮 电 出 版 社

OPTICAL FIBER
TELECOMMUNICATIONS
STEWART E. MILLER
ALAN G. CHYNOWETH
ACADEMIC PRESS 1979

内 容 提 要

本书是由美国贝尔电话研究所从事光纤通信研究工作的四十余位专家集体撰写而成的。

本书较全面地讨论了现代光纤通信系统各方面的概念、基本原理以及有关工艺上的一些问题。全书共二十一章，各章之间都具有相对的独立性。中译本分上、下两册，上册主要内容是讲光纤的传播特性、色散特性、非线性特性、光纤的设计、材料的选择、预制棒的制备、光纤的拉制、涂敷。下册主要介绍光纤的特性、成缆、接续、连接；光源、调制及检测器以及接收机的设计、系统设计等。

本书可供从事光纤通信科研、设计、制造、和教学人员参考。

本书上册序言、前言、第1、3、4章由白其章译，第2、5、6、10章由宋丽文译，第7、8、9章由徐乃英译。白其章同志校。

光 纤 通 信

上 册

〔美〕S.E.米勒 A.G.楚诺委斯主编

白其章 宋丽文 徐乃英 译

责任编辑：李树岭

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1983年12月第 一 版
印张：11 16/32 页数：184 1983年12月河北第一次印刷
字数：302 千字 印数：1—7,600册

统一书号：15045·总2762—有5318

定价：1.80 元

译 者 序

光纤通信是一门新兴的科学技术。它的发展异常迅速，目前，世界各国在 $0.85\mu\text{m}$ 左右的短波长范围内建立起来的许多光纤通信系统大多已投入使用，而在 1.3 和 $1.55\mu\text{m}$ 左右的更长波长范围内的单模或多模光纤试验线路也日益增多，并取得了很多成就。同样，我国的光纤通信技术也在顺利地发展着。

当前，在讲述光纤通信的许多著作中，美国贝尔电话研究所编辑的这本书受到了有关方面的重视。这是一本全面叙述光纤通信系统及其各个组成部分的基本原理和应用技术的书。它的内容十分广泛，不但包括了光纤光缆、光源器件、检测器件、光发送机及光接收机等各方面的基本知识，而且，还涉及到光纤的非线性特性、光纤材料的全面分析、光纤光缆的设计及制作工艺、光源调制技术以及未来应用方向等内容。

在本书的编写工作中集中了贝尔研究所的四十多位知名学者和专家，由一位或数位同一专业的专家学者撰写本专业的有关章节，因而本书的各章节都具有较高的学术水平，能反映出当代的最新成就。此外，本书的编写还着重于全面性的综合论述，因而对每一专题，涉及的面是很广泛的，除了重点叙述原理及基本技术外，还摘要介绍了同行专家们的大量文献，并在每章后面逐一列出这些参考文献的出处，有利于读者在需要对有关专题作进一步深入理解时查阅。

在阅读本书时，译者认为有两点值得提出来供读者参考，一点是本书是一本整体性很强的著作，同时各章之间又具有相对的独立性。因而除可通读外，对于那些想学习某一专题内容的读者，则可径直重点阅读有关章节。再一点是阅读本书一些章节时，初读容易

感到涉及面广、头绪较多，叙述简炼，理解不深，这时建议反复阅读，并结合查阅所附参考文献深入学习，往往就会感到有较大收益。

由于本书涉及的专业知识面广，译者水平有限，难免有不妥之处，切望读者批评指正。

译者

1982年9月

序 言

科学技术上的进展通常是由一些逐渐增多的创造革新积累而成的，而这些创造革新推动现有技术前进的步伐相对来说往往是很小的。那些重大的突破和完全崭新的技术很少经常地出现。但是它们一旦出现，就不仅仅是给现有的科学技术带来新的推动力，而且还为满足社会需要提供出新的产品和服务项目。科学发现的结果常常开辟出前所未见的应用方向，而在另外一些情况下，虽然已可能预见到这些应用，但却需要科学上的发现来实现这些应用。1958年在汤斯 (Townes) 和夏洛 (Schawlow) 发表的著作中首次提到的激光器就是同时属于这两种情况的一项科学发现。在激光器出现后的这二十年中，不仅仅在理解光学现象和在许多科学分支里应用的光学工具上出现了使人震惊的科学进步，而且还产生出一些具有重大潜在用途的新技术。其中，用于通信领域的光电子技术 (Optoelectronic technology) 就是突出的一项。

利用光线来通信，并不是一个新的概念。一个世纪以前，贝尔 (A.G. Bell) 曾寻求过用可见光束来传送语言，而且它的光话机 (Photophone) 已能够在几百米的距离内传送语言信息。用今天的标准来看，他的光束调制和信号检测的方案都是很粗糙的，他的系统也被证明是不切实际的。然而，它却是光通信的雏型。

自从十九世纪中叶，麦克斯韦 (J.C. Maxwell) 和法拉第 (M. Faraday) 提出具有划时代意义的理论以来，从原则上说，整个电磁波谱都可以用做通信媒质。这两位先驱者对于电磁辐射本质的理解，引导赫芝 (H. Hertz) 于1887年发现了长波长的辐射现象，然后又引导马可尼 (G. Marconi) 于1895年把它应用于无线电。从此，通信信号的传输历史便大体上成为一部向愈来愈短的波长、最

后导致向微波前进的记录。这种向更高频率的有次序的开拓，以及由此而提供的频带宽度的增大，使得一些有远见卓识的工程师如哈特莱 (Hartley) (1945年) 和蒂勒尔 (Tyrrell) (1951年) 等人能从第二次世界大战开始出现的微波时代，看到了未来的发展方向，并阐述了下一个合乎逻辑的阶段到来的情景——关于更高的光通信频带的利用阶段 (贝尔研究所内部资料)。这样，在激光器出现的1960年以前，就已经有了理论和启发性推测的背景，所以当它一出现，便几乎立刻被看成是光通信系统中的一个关键性元件。

第一个实用的激光器于1960年由梅曼 (Maiman) (休斯航空公司) 制成，它的出现大大鼓舞了光通信研究工作的开展。于是从六十年代早期开始，康福尔 (Kempfner) 和米勒 (Miller) 以及他们在贝尔研究所克劳福德山实验室的同事们制订了一项广泛的研究计划，来探讨光波传输的基础技术以及光通信系统的组成要素。与此同时，固态物理学家和化学家在过去未知的或尚未探索过的固体光学性质方面，以及在发现和发展新的激光器、发光二极管、和非线性光学材料方面，开始了紧张的研究活动。这些研究活动为新的光电子技术提供了基础依据，并且使光通信逐渐趋近于实现。

可是有关传输媒质的问题尚未解决。一开始，玻璃纤维曾是很吸引人的，但是它的损耗过大，使它不可能得到实际应用。1966年，英国工程师高 (Kao)* (标准电信研究所) 提出了新的见解，他认为玻璃纤维的损耗是能够被降低的，于是一些机构开始了玻璃纤维的研究工作。1970年，康宁玻璃公司得到了损耗低于20dB/Km的成绩。随后的几年里，经过贝尔研究所和康宁公司的研究和发展，得到了优质的材料和生产光纤的方法，并使损耗降到1dB/Km，甚至更低。这时，能够在室温条件下连续工作的半导体激光器也已研制出来。依据上述取得的成就，虽然还有许多工程事项尚待完成，但一项实用通信系统的全部要素终于被人们所掌握。到了七十年代

*高即高锟，为英籍华人——译者注。

中期，商用系统的实验模型开始出现。

在从激光器概念的形成到完成第一个实用光通信系统的整个时期内所取得的进展，是包括电气工程师、物理学家、以及材料方面的科学家和工程师们在内的一项跨学科努力的成果。每一个专家组都鼓励和帮助了其他专家组的工作；如果没有这样的密切合作，切实可用的系统就不会顺利地实现。这种跨学科的研究和发展曾使半导体电子学别具一色（还有其他一些实例），可是这种情况在许多其他技术领域中却是不常有的。虽然如此，如同在半导体电子学中的情形那样，跨学科的努力推动了固态电子学尤其是光通信技术的惊人进展。在同一所工业研究机构中包括着学科范围很广泛的众多人才，将促进这种新光学科学技术的跨学科式的探索，其结果是在这场向着一项较大的新系统技术的异常迅速进军中，无论是科学上的或者是技术上的任何重要方面都不会不被注意到。

关于未来的光通信能说些什么话呢？现在来确切回答这个问题尚为时过早。只能有部分把握地说，光波传输系统将在同较长波长的无线电系统、波导系统、及铜线系统的竞争中占据一块地盘；但还不能肯定地说，它在代替或替换这些已经建立的传输技术方面将会达到什么程度。人们可以有把握地预言，光通信系统将在同短距离大容量的通信线路，例如数据线路和市内电话中继线路等的竞争中，无论在技术上还是在经济上都会得到成功。对于陆地及海底的长距离通信系统以及对于市内配线网，光通信系统可能被证明在技术上是行得通的，但是在经济上目前尚不能完全肯定。不过，电子学技术尤其是半导体电子学的历史已经提供了充分的乐观理由，在完全崭新的技术的早期阶段，可能看到的仅仅是开始的情景，而不可能预见到还有多少新发展将会出现，更不可能预见出将从第一批研制系统的总结经验中能得到些什么。现在，光通信系统正是处在这种阶段；它有待于人们去研究那些如集成光学那样的高级研究概念能否发展到这一地步，即它能使电子工程师超越常规的传输技术并开发出一整套基于光子而不是基于电子的光电子学部件和制式系

列。有一件事是肯定的，这就是上述远景的内在激发力将在今后的岁月里给从事研究发展的科学家和工程师们提供源源不断的动力。

N.B. 汉奈 (*Hannay*)

于贝尔研究所

前 言

正如N. B. 汉奈在本书序言中所描述的那样, 光纤通信已从理想变为现实。世界上有数以千计的科学家和工程师正从事着第一代商用系统的设计工作以及探索着对第二代商用系统具有潜在性应用价值的新设想。对基本原理的全面综合论述将推动上述两方面工作的进展。如同电子工业的其他学科一样, 光纤通信基本原理的文章在科学期刊中已得到迅速发表。重点的评论性文章在大约五年前已开始出现。本书可做为了一本基础教科书, 它为现代光通信系统的所有方面提供了科学的和工程的基本原理, 这些方面计有: 光纤、光缆及接续; 光源、包括激光器和发光二极管; 检测器; 发送机和接收机; 系统设计原则; 以及潜在性应用。本书同时给出了大量的原始科学文献的参考索引, 以便读者能回溯并检验本书中叙述的那些推荐内容的来源。

作为一本基础教材, 本书对于科研、教学、工业生产以及其他部门的学生、科学家和工程师们都会是有用处的。上述任一部门的专家将发现本书在复习他们本身专业范围以及在获得他们的工作同其他专业间的正确关系方面, 都是有益的。由于本书把通信系统的所有各个侧面都汇编在一本册子内, 因而设计工程师们也将发现本书对他们是有帮助的。

光纤通信把从事于通信领域、玻璃制造工业以及半导体电子工业部门的工作人员的合作成果集中在一起。后一部门在当前生产出最引人注目的光源和检测器, 以及用于发送机和接收机中的晶体管和集成电路。在所有这些领域里工作的人员将会发现本书是一本有用的参考书。

本书是按照适合于对光通信尚无专门知识的大学毕业水平的读

者们能够理解的程度而编排的，然而它仍提供了全面的综合论述。最初的两章叙述了历史背景，给出了详细的各章结构，并使读者对于新的传输媒质—玻璃纤维的发展有一通盘的了解。在这头两章的后面，各章专门内容的深入论述可以有选择地阅读，而不必顺序读完前面的各章。虽然在科学期刊上已有很多评论性文章，本书有的地方也确实有些重复，但是第3章至第21章实质上仍是独立的论述。全书从头到尾对于重要的物理量还采用了一整套前后一致的符号。

本书同已出版的其他书籍的不同点，在于本书对所有专题的论述都具有全面的综合性质。其次，本书的全体作者是从同一个研究机构中选出来的，这个机构本身从事于光通信技术及系统的所有科技发展方面。作者人数超过了四十人—每一章都由一位或数位工作于自身专长部门的研究人员撰写而成。本书重点放在具有持久价值的基础科学和设计原则方面，而不是放在一些具体设计的选择方法或标准化上。

目 录

第一章 光通信的发展..... (1)

A. G. Chynoweth 及 S. E. Miller

- 1.1 光源及检测器 (1)
- 1.2 传输媒质—光纤波导的发展 (4)
- 1.3 光纤通信系统 (9)
- 1.4 光通信系统的其他方面 (12)
- 参考文献..... (16)

第二章 早期光纤：光纤类型的发展..... (18)

Enrique A. J. Marcatili

- 2.1 本章目的及同其它各章的关系 (18)
- 2.2 光纤内的光传播 (18)
- 2.3 损耗机理 (26)
- 2.4 光纤内的色散 (29)
- 2.5 光纤类型及它们的发展 (33)
- 参考文献..... (37)

第三章 光纤的传播特性..... (38)

Dietrich Marcuse, Detlef Gloge 及 Enrique

A. J. Marcatili

- 3.1 模的概念 (39)
- 3.2 阶跃型光纤 (41)

3.3	梯度型光纤	(47)
3.4	包层效应及漏泄波	(55)
3.5	由恒定光纤曲率引起的损耗	(63)
3.6	光纤间的串音	(66)
3.7	光纤的激励	(68)
3.8	光纤末端的近场及远场	(72)
3.9	接续损耗	(75)
3.10	耦合模理论	(82)
3.11	模混合效应	(90)
3.12	随机弯曲引起的辐射损耗	(94)
	参考文献	(100)

第四章 光纤的色散特性..... (102)

Detlef Gloge, Enrique A. J. Marcatili,

Dietrich Marcuse 及 Stewart D. Personick

4.1	引言	(102)
4.2	单模光纤内的脉冲失真	(104)
4.3	多模光纤内的单个模	(107)
4.4	理想多模光纤内的脉冲失真	(111)
4.5	激励、损耗和模耦合的影响	(116)
4.6	光纤的频域特性	(120)
	参考文献	(125)

第五章 光纤的非线性特性..... (127)

Rogers H. Stolen

5.1	引言	(127)
5.2	受激喇曼散射 (SRS)	(129)

5.3 受激布里渊散射 (SBS)	(135)
5.4 随光强度而变的折射率	(138)
5.5 相位匹配参量相互作用	(143)
5.6 损伤	(148)
5.7 未来的方向	(149)
5.8 结论	(150)
附录: 受激喇曼散射 (SRS), 受激布里渊散射(SBS) 和自相位调制 (SPM) 的临界功率 (P_c)	(150)
参考文献.....	(152)
第六章 光纤设计要点.....	(155)

Detlef Gloge 及 Wiliam B. Gardner

6.1 引言	(155)
6.2 光纤直径	(156)
6.3 包层厚度	(156)
6.4 合成散射和折射率差	(159)
6.5 LED系统的注入损耗	(160)
6.6 微弯损耗	(162)
6.7 低毕特率系统	(165)
6.8 高毕特率系统	(166)
6.9 工作波长	(168)
6.10 光纤参数的容差.....	(169)
参考文献.....	(170)

第七章 材料的性质与选择.....	(171)
--------------------------	----------------

Brian G. Bagley, Charles R. Kurkjian,

James W. Mitchell, George E. Peterson 及 Arthur R.

Tynes

7.1 引言	(171)
7.2 材料各方面的一些基本考虑	(171)
7.3 材料各方面的特性表征	(197)
参考文献.....	(234)

第八章 光纤预制棒的制备..... (240)

*William G. French, Raymond E. Jaeger,
John B. Macchesney, Suzanne R. Nagel,
Kurt Nassau 及 A. David Pearson*

8.1 引言	(240)
8.2 多组分玻璃及纤维的制备	(241)
8.3 高二氧化硅块料玻璃	(249)
8.4 用汽相沉积法生产的高二氧化硅纤维	(256)
参考文献.....	(267)

第九章 光纤的拉制与控制..... (271)

*Raymond E. Jaeger, A. David Pearson,
John C. Williams 及 Herman M. Presby*

9.1 引言	(271)
9.2 玻璃的馈送	(279)
9.3 热源	(283)
9.4 拉丝机构	(288)
9.5 直径的均匀性	(289)
9.6 涂敷与加套	(300)
9.7 综合设备	(301)
参考文献.....	(303)

第十章 涂层和套层..... (307)

Lee L. Blyler, Jr., Bernard R. Eichenbaum

及 *Harold Schonhorn*

10.1 涂层的作用.....	(307)
10.2 对涂层的要求.....	(309)
10.3 二氧化硅的表面处理.....	(314)
10.4 涂层的涂敷技术.....	(326)
10.5 聚合物包层光纤.....	(338)
参考文献.....	(349)

第一章

光通信的发展

光纤通信有着许多来源。在A.G.贝尔(*Bell*)发明电话后不久(1880年),他曾通过一束光线在长达数百米的距离上传送过话音。但是由于当时采用的技术并不能实现这个新奇的概念,所以后来没有什么进展。十九世纪四十年代和五十年代在贝尔研究所还曾作过一些利用可见光进行通信的试验,最后的一次曾经要求采用相干光源以便得到高效率的信息传输(*Kompfner*, 1972)。

一切形式的光通信都需具备三项内容:(1)可见光或近红外光的光源,它被载有信息的信号所调制;(2)传输媒质;(3)检测器,它把调制波恢复为同该系统输入信号实际上完全相同的基带信号。

1.1 光源及检测器

激光器的发明和实验论证给光通信前景带来了新生命,并促使人们尽极大努力来获取使它成为现实所必需的科学和技术。激光器(*Schawlow*及*Townes*, 1958)是相干光源,从原理上讲,它有可能把适用于微波领域中的全套通信技术都用在光波领域。激光器功能的实验室验证,首先是红宝石激光器(*Maiman*, 1960),其后是气体激光器(*Javan*等人, 1961),给这种可实现性提供了直接论据。数年后,氦氖气体激光器成为光通信研究中的主力;如果没有它,光通信是不会得到后来的进展的(*Gordon*及*White*, 1964)。虽然如此,但是首次暗示出具有实用的低成本的光通信,并具有通常固体器件所带来的小型化和高可靠性的巨大潜力的却是半导体激光器(*Hall*