

〔联邦德国〕 G. 格劳 著

光通信技术导论



科学出版社

光通信技术导论

〔联邦德国〕G. 格劳 著

陆善达 译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书为作者讲授光通信技术的教材。它全面而系统地论述了光通信技术领域各方面的问题。内容包括光波导、光源、调制、检波、噪声、接收、耦合以及光通信系统等。内容全面、取材新颖,深入浅出,理论联系实际,实用性强。

本书可供从事光导纤维、半导体光电器件、光通信研究的广大教学、科研和技术人员参考。

Gerhard Grau
OPTISCHE NACHRICHTENTECHNIK
EINE EINFÜHRUNG
Springer-Verlag Berlin
Heidelberg, New York, 1981

光 通 信 技 术 导 论

[联邦德国] G. 格劳 著

陆善达 译

责任编辑 陈 忠

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 1 月 第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1987 年 1 月 第 一 次 印 刷 印张: 13 1/2

印数: 0001—2,550 字数: 304,000

统一书号: 15031·768

本社书号: 4999·15—7

定 价: 3.15 元

译 者 的 话

光通信技术近年来得到了迅速的发展，已成为国际上科学技术研究的前沿学科之一。然而全面系统地叙述光通信技术的教科书还不多。本书作者格劳教授有丰富的教学经验，在高频技术和量子电子学方面有相当高的造诣。他的这本《光通信技术导论》在联邦德国得到好评。其中不少内容还取自他所领导的研究所的研究成果。

全书共分八章。在阅读本书任一章节以前，务必按作者的先阅读第一章。由于本书涉及面甚广，各个专业领域都要使用许多惯用符号，为方便读者，书中还编写了符号、缩略语和索引，对阅读很有帮助。所选的许多重要参考文献，对于想深入研究有关专题的读者也很有用。

本书能译成中文，应衷心感谢格劳教授的悉心指导，感谢格劳研究所的德国朋友们，特别是 E. Sauter 博士和 C. Fritzsche 博士研究生的多方面帮助。

限于译者水平，译文中缺点和错误恐难避免，请读者批评指正。

陆善达

1984年8月

序

光通信是现代一项重大的技术革命,是一门新兴科学,是国际上科学技术研究的焦点之一。近年来,我国在光通信技术方面也得到蓬勃的发展。

格劳教授于1981年出版的《光通信技术导论》专著,全面而系统地论述了光通信技术领域的各方面问题,包括光波导、光源、调制、检波、噪声、接收、耦合以及光通信系统。作者本人对噪声问题更有独到的研究,尤为本书特色。

本书中文译本的出版将对我国当前开展的技术革命深有裨益。本书内容全面、取材新、联系实际,实用性强,适于我国从事光通信研究的广大教学、科研和技术人员阅读。

本书作者格劳教授是国际著名的奥地利籍学者。他嗜爱中国文化,已学会讲中国话、写中国字。我相信,正如他本人在中文版序中所说,本书中译本的出版,将会对中奥友谊起促进作用。

黄宏嘉

1984年5月(上海科技大学副校长)

中 文 版 序

我所著《光通信技术导论》(1981年出版)现被译为中文出版,这对我来说是一件很荣幸的事。

本书是论述强度调制的光通信系统。虽然相干光通信技术已在实验室进行,但实现实用而可靠的、而且在成本上可与现有系统相竞争的相干系统还需相当长时间。因而,本书的内容对读者将继续有用。

感谢中国科学院学部委员、上海科技大学副校长黄宏嘉教授对中译本出版的促进和支持。感谢上海科技大学陆善达先生担任了繁重的翻译工作;他曾在联邦德国卡尔斯鲁厄大学两年,熟悉了光通信技术,并改正了德文版中一些未曾注意到的差误。同时感谢科学出版社出版了中译本。

在我的祖国——奥地利最近出版了一本书,其中追溯到四百年前开始的奥中接触,表明这些接触是对双方有利的。因为并非拘于先入之见、而是我们愿意借以相互学习。我希望这本书对中国读者有用。对我来说,本书中文本的出版将鼓励我学习中文,以便将来能直接欣赏用中国文字写的科学和文学的作品。

G. 格劳

1984.6.于卡尔斯鲁厄

原 版 序

光通信技术在人们疑虑的目光下得以存在和发展，其原因是很清楚的。它开辟了高效率、价廉、灵巧的通信途径，并与微电子学一起，在技术革新方面显示了不寻常的潜力。与目前常规技术相比，它既能节省原材料又能节约能源，而且它适应了向数字、集成网络转变的潮流。光通信将提供实现新型通信方式的可能性，只要这些通信方式有实现的必要，它们的应用便能得到社会的认可。

每一项新技术当然需要讲授，本书尝试编撰关于光通信技术的基本原理。通信工作者不会再对与光通信技术有关的量子理论和固体物理基础产生质疑，在六十年代随着激光技术和量子电子学的发展，光通信技术中许多基本问题已经得到了回答，只要稍作加工，就可以应用到技术方面，因此本书大部分工作是把其他领域中熟知的关系表示成通信工作者能够理解的形式，倘使不得不放弃某些关系式的推导时，将用容易理解的物理概念给予解释。本书中那些根据简单的物理模型得出的粗略关系式，有时相当成功地以惊人的精度与经过复杂而冗长的运算得到的结果相符。此外，本书对光通信领域中如此繁多的参考文献的取舍上，想必不会使有兴趣深入了解的读者失去查找有关专题的线索。

读者在详细阅读本书的任何一章以前，至少应该浏览一下作为全书引言的第一章，因为这一章里所作的一些讨论，对阅读其它各章有很大帮助。接下来叙述了作为传输介质的光导纤维，光源和光调制，光探测器，接收器和耦合器。因为光

通信中产生干扰的某些原因,通信工作者尚不熟悉,所以第五章讨论的噪声比一般通信技术书籍中详细一些是合适的。最后对光通信系统中的有关问题进行综合讨论来作为本书的结尾。本书是卡尔斯鲁厄大学两个学期使用的光通信技术教科书。

感谢我的同事 W. Freude 博士, O. G. Leminger 博士和 E. G. Sauter 博士,他们阅读了全部原稿,核对了所有方程式并提出了许多有益的建议。也应该感谢 F. Rühmann 先生为原稿的付印承担了一切准备和协调工作; G. Werthwein 夫人出色地把不太容易阅读的手稿打印成文; I. Kober 夫人为本书配制了插图。也感谢 Springer 出版社对本书的兴趣。最后应感谢我的妻子和儿子他们对我很长一段时间无暇与他们交谈极其体谅。

G. 格劳

1981年夏于卡尔斯鲁厄

目 录

第一章	光通信技术问题简述	1
第二章	光导纤维	21
2.1	石英的材料性质	21
2.1.1	折射率和衰减	21
2.1.2	材料色散	24
2.2	光纤中的模场	27
2.2.1	光纤模的名称	27
2.2.2	弱光导纤维	31
2.3	单模光纤	40
2.3.1	场分布,色散和偏振	40
2.3.2	单模光纤中的脉冲传输	45
2.3.3	弯曲损耗	52
2.4	多模光纤	54
2.4.1	无限延伸的抛物线型折射率分布和等效光纤	54
2.4.2	几何光学与色散关系	56
2.4.3	光线类型,模曲线图和模数计算	62
2.4.4	模激励和模功率分布,光纤的近场和远场强度	72
2.4.5	模色散和最佳折射率分布	82
2.4.6	脉冲响应和传递函数	89
2.4.7	模耦合的影响	95
2.4.8	色散测量和拼接光纤中的色散特性	100
2.5	光纤中的损耗	103
2.5.1	损耗概述	103

2.5.2	衰减的测量	105
2.6	光纤的制造	110
2.7	测量折射率分布	113
2.8	相干	118
2.9	非线性效应	122
2.10	光纤特征参量和光纤参数的选择	125
第三章	光源和光调制	127
3.1	材料,发光二极管和激光二极管	127
3.2	发光二极管 (LED)	132
3.2.1	器件结构	132
3.2.2	功率、光谱以及与光纤的耦合	137
3.2.3	LED 的调制	140
3.3	激光二极管 (LD)	148
3.3.1	LD 的工作原理	148
3.3.2	激光二极管的类型	157
3.3.3	平衡方程和激光管的特性曲线	161
3.3.4	阈值电流与温度依赖关系	169
3.3.5	激光管的辐射特性	174
3.3.6	激光管的动态特性	185
3.3.7	光调制的基本原理	192
3.3.8	LD 的直接调制	193
3.3.9	调制线路	200
3.3.10	新型激光管	204
第四章	光探测器	208
4.1	基本原理	208
4.2	光电二极管用材料	218
4.3	PIN 二极管	224
4.3.1	器件结构和特性	224
4.3.2	动态光电流	228
4.4	雪崩光电二极管 (APD)	233
4.4.1	构造,静态特性和上升时间	233

4.4.2	APD 的动态特性	237
第五章	噪声	245
5.1	光通信技术中的噪声	245
5.2	激光器的噪声	248
5.3	光的相干性	255
5.4	模分配噪声	260
5.5	模噪声 (Modenrauschen).....	263
5.6	光探测器中的噪声	277
5.6.1	产生函数,自然光和理想激光的接收	277
5.6.2	PIN 二极管中的噪声	281
5.6.3	APD 中的噪声	285
5.7	四端网络的噪声	290
5.8	不稳定噪声和探测器阈值的确定	296
第六章	接收器	301
6.1	光模拟接收器和数字接收器的基本原理	301
6.2	模拟接收器的计算	316
6.3	数字接收器的计算	323
6.3.1	判定器上的信号和噪声	323
6.3.2	接收功率的确定	326
6.3.3	狄拉克光脉冲	329
第七章	耦合器	335
7.1	引言	335
7.2	光源与光纤的耦合	337
7.3	光纤与光纤耦合	341
7.3.1	接插连接	341
7.3.2	粘接和焊接	350
7.3.3	光分束器	353
第八章	光通信系统	362
8.1	光通信系统与常规通信系统	362
8.2	几个光通信系统的实例	369

参考文献.....	373
符号和缩略语.....	391
索引.....	398

第一章 光通信技术问题简述

光通信系统的基本原理如图 1.1 所示：一个合适的半导体器件（激光二极管 LD，发光二极管 LED）通过电流激励来发光，所发射的光沿一根介质波导（玻璃纤维）被传播到接收端去（对地面系统来说，自由空间的光传播显然不予考虑）。信号先被转换成连续的或数字调制的光强，最后在接收器中由光探测器重新转换成电流。显然只有当传播介质（玻璃纤维）在衰减、色散、抗电磁干扰、造价等诸方面，均明显地优于一般导体（铜线、同轴电缆）时，光通信系统才可以取代常规的通信系统

介质波导

为简单计，介质波导的作用姑且用一个对称的层型波导（图 1.2）来解释：折射率为 $n = n_1$ 的芯（这里为一个在 y 方向无限延伸，而波在 z 方向传播的中间层）夹在折射率为 $n = n_2 < n_1$ 的包层中（包层位于中间层的上半部和下半部）。假定两种介质均无损耗（即 n_1, n_2 为实数），几何光学中的光线沿

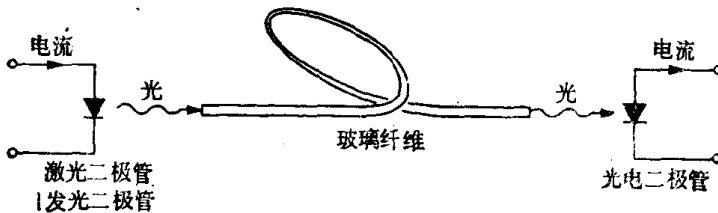


图 1.1 光通信系统的基本原理。

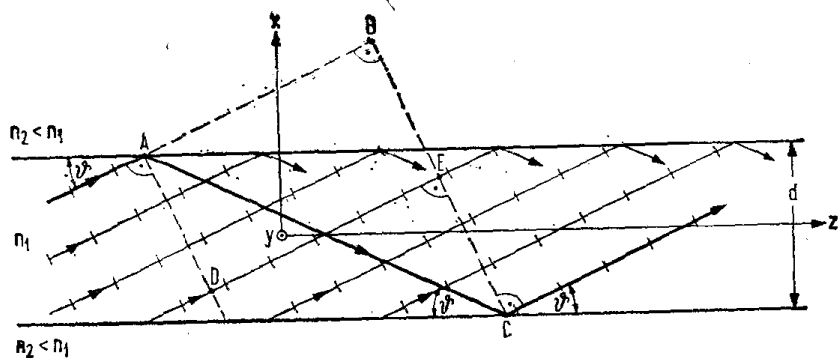


图 1.2 层型介质波导

\mathbf{s} (单位矢量)方向传播, \mathbf{s} 在局域平面波 $\sim \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ 取时间平均的局域波印亨矢量方向上. 局域传播矢量

$$\mathbf{k}(\mathbf{r}) = k(\mathbf{r})\mathbf{s}(\mathbf{r}), \quad k(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r})k_0, \quad (1-1)$$

$$k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$$

当 $\lambda \rightarrow 0$ 可由波动理论过渡到几何光学. $\lambda \rightarrow 0$ 的几何光线, 只存在于场 $\sim \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ 不等于零的地区, 即 \mathbf{k} 的所有分量为实数的区域. 若上述的 \mathbf{k} 为虚数, 例如 $k_x = -j|k_x|$, 则在 x 方向得到一个如 $e^{-|k_x|x}$ 的瞬衰场. 这样一个无损耗介质, 在一个方向用一个指数衰减的场描写. 由于在垂直于传播方向出现了一个指数衰减场, 以致这样一个平面波人们亦称为“横向衰减波”. 转化为几何光学时 ($\lambda \rightarrow 0, |k_x| \rightarrow \infty$) 因为在 \mathbf{k} 为虚数的区域是一个瞬衰场, 所以几何光学中存在着突变的明一暗边界. 当光线只可能存在于 $n = n_1$ 层中而 $n = n_2 < n_1$ 为阴影区时, 则介质波导(图 1.2)能理想地在 z 方向传播光. 在波导轴线方向, 场的传播常数 $k_z = \beta = \text{常数}$. 在层内 k_x 应为实数, 层外为虚数[即 $\lambda \rightarrow 0$ 时等价于层外 x 方向的场是瞬衰的. 当然对于 $x < 0$ 要取 $k_x = j|k_x|$, 从而当 $x \rightarrow -\infty$ 时, 场 $\exp(|k_x|x)$ 趋于零]. 这一

切如何达到呢? 在层内, 对与轴线成 ϑ 角的光线

$$\begin{aligned} k^2 &= n_1^2 k_0^2 = k_x^2 + k_z^2 = k_x^2 + \beta^2 \\ &= k_x^2 + n_1^2 k_0^2 \cos^2 \vartheta, \\ k_x^2 &= k_0^2 (n_1^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta) \geq 0. \end{aligned} \quad (1-2)$$

在层内存在相应于一切 ϑ 角的光线. 对于一个以传播常数 β 在 z 方向传播的电磁场图象, 不但必须要求在芯内而且也要要求在包层中 $k_x = \beta = \text{常数}$, 在包层中则还要求 $k_x^2 < 0$ (这样 k_x 为虚数, 场在横向衰减, 包层中能量沿 z 方向传输, 在 x 方向不存在能量辐射). 在包层中

$$\begin{aligned} k^2 &= n_2^2 k_0^2 = k_x^2 + k_z^2 = k_x^2 + \beta^2 \\ &= k_x^2 + n_1^2 k_0^2 \cos^2 \vartheta, \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} k_x^2 &= k_0^2 (n_2^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta) < 0 \\ \vartheta &< \arccos(n_2/n_1) = \vartheta_T. \end{aligned} \quad (1-3)$$

光线与波导轴线的夹角 ϑ 小于 ϑ_T (全反射临界角) 时, 芯中的光线在 $\lambda \neq 0$ 时进入包层成为横向衰减场. 当 $n_2 \leq n_1$ 时 ϑ_T 才有实数解, 这与包层折射率必须小于芯射率的前提条件相一致.

然而并不是所有 $\vartheta < \vartheta_T$ 的光线都能形成波导模, 只有那些相互间构成建设性相干的局域平面波才会形成波导模. 例如从底面向顶面传播的光线具有位相面 \overline{AD} , 传播一段距离后, 它应该平移到 \overline{EC} . 因此, 一方面在 C 点反射后光线的局域平面波位相, 应该等价于想象中光线由 A 点延长到 B 点的局域平面波位相; 另一方面, 可直接由 A 点反射前的局域平面波位相、 A 点反射所引起的相移、反射光在 \overline{AC} 段上的相移以及在 C 点反射所引起的相移, 全部相加得到在 C 点反射后局域平面波的位相. 在 C 点这样考虑得到的二种位相, 只有在位相差等于 2π 的整数倍时, 才是建设性相干. 局域平面波在 A 、 C 点的全反射可用一个复振幅反射系数 R 来描述, 它

的位相依赖于偏振 (\mathbf{E} 或 \mathbf{H} 平行于边界面), 依赖于 n_1, n_2 及角 ϑ (参阅文献[134]). 因此如能满足下述条件, 就产生建设性相干

$$\begin{aligned}
 -n_1 k_0 \overline{AB} + 2m\pi &= -n_1 k_0 \overline{AC} \\
 + 2\text{arc}R(\vartheta, n_1, n_2) \\
 m &= 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned}
 \tag{1-4}$$

在(1-3)式定义的 $\vartheta < \vartheta_T$ 范围内, 对给定的某个偏振, 由(1-4)式可以得到有限个 ϑ_m 值, 它们构成了传播模(限制在芯内的陷阱光). 这就是多模波导, 它传输有限个 TM_m 模 ($=E_m$ 模, \mathbf{H} 平行于界面)和 TE_m 模 ($=H_m$ 模, \mathbf{E} 平行于界面). 对较大的 m 值, 一旦 $\vartheta < \vartheta_T$ 的条件不能满足, 则光线也可进入包层, 在 $\pm x$ 方向形成有能量传播分量的辐射模(折射光). 对已知的折射率 n_1, n_2 , 一定可以使厚度 d 作得如此小(或者对确定的芯厚度 d , 使折射率差 $n_1 - n_2$ 作得如此小), 以致对确定的波长由(1-4)式只能得到唯一的一个解 $\vartheta < \vartheta_T$, 那么就存在唯一的一个传播模, 从而得到单模波导.

每一个模的波场, 因而可由二类光线的局域平面波叠加而成, 一类局域平面波相应于由下往上传播的光线, 另一类相应于由上往下传播的光线. 每一类这样的光线具有这样一种性质, 即在考察区域内任一处同一类光线并不相交(在空间每一点只经过所考察的这类光线中的一根光线), 每一根光线是一个曲面族 $S(\mathbf{r}) = \text{常数}$ 的正交规迹 ($S(\mathbf{r}) = \text{常数}$ 称为波阵面, $S(\mathbf{r})$ 叫做程函), 具有这种性质的光线人们称为法线汇. 如要考虑与这些光线相应的局域平面波的偏振, 则可以在图 1.2 波导的芯中想象有四组法线汇, 二组相应于从下到上传播, 具有相同位相面、但有不同极化方向的光线 (\mathbf{E} 或 \mathbf{H} 平行于界面, 这二组线汇用 $K1E, K1H$ 表示). 类似地另二组由上向下传播的光线汇用 $K2E, K2H$ 来表示. 一个 TE_m

模 (E 平行于界面) 将由 $K1E$ 、 $K2E$ 线汇的局域平面波叠加而成。二组线汇的相对位相由这样的条件来确定: $K1E$ 在顶面反射后成为 $K2E$, 然后经底面反射后, 必须重新成为 $K1E$, 为形成波导模线汇, 必须按方程 (1-4) 所确定的那些角度来传播。根据在底面和顶面线汇的接续条件, 相应平面波的强度也应相等。层内每一位置上能流的时间平均值是在二组光线的合成方向即 z 方向传播。若在 $z = \text{常数}$ 的平面上考虑相互相交光线的局域平面波, 它们的相对位相随 x 而变, 有的地方构成建设性干涉, 有的地方构成破坏性干涉。这样在 $z = \text{常数}$ 平面上的所有位置, 波印亭矢量的时间平均值沿 z 方向, 它的大小在 0 和极大值间作周期性变化。最低阶模 $m = 0$ 在层内 x 方向有一个极大值, 较高阶模相应于有 $m + 1$ 个极大值。合宜而又巧妙地表示属于某个法线汇的光线, 是采用由二光线所限定的区域内传播相同的功率。在非均匀介质中传播的光线不是直线, 它们在考察面上的间距 (在 $S(r) = \text{常数}$ 的程函面上测量) 反比于局域能流密度, 即与相应的局域平面波场强的平方成反比。由此即可得出, 在焦散面上 (此面与某个法线汇的所有光线相切) 场强以 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 趋于无限大 (r 为离开焦散面的距离)。由于 $\lambda \neq 0$, 在焦散面的另一侧实际上存在瞬衰场, 故这一奇点不会出现。

上面概略叙述过的层型波导的这些关系, 可以类似地用到圆柱型芯的玻璃纤上去。很显然, 在多模波导中不同的模相应的光线, 对轴有不同的倾斜度。在 $z = 0$ 和 $z = L$ 的两个平面间, 属于不同模的光程, 其长度是不同的, 通常相应于不同的信号渡越时间。在多模光纤 $z = 0$ 处注入一个短脉冲, 若它激励出所有的传播模, 则在 $z = L$ 处出现一系列时间上分开的等于传播模数目的脉冲。这个效应称为模间色散或简