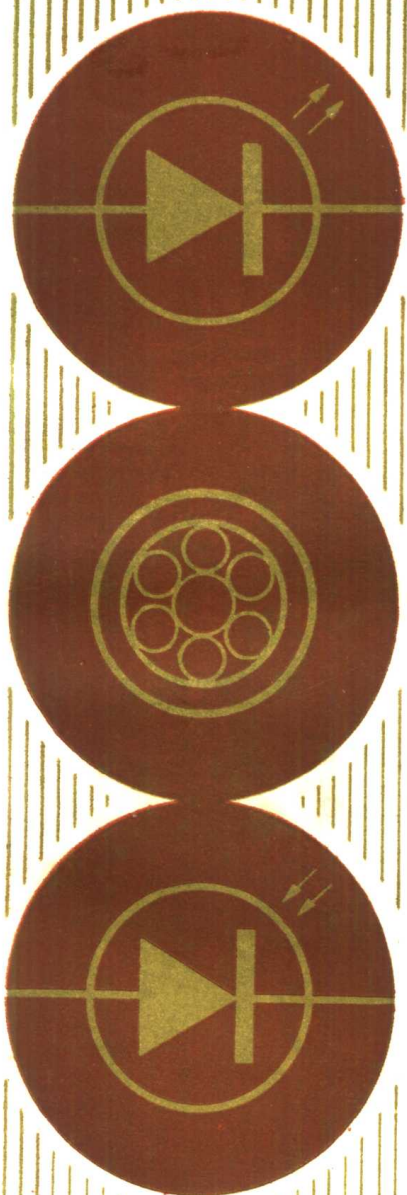


光纤通信技术丛书

光源和检测器



潘中浩 刘其沅 杨同友 编
杜宝勋 审校
人民邮电出版社



光纤通信技术丛书

光源和检测器

潘中浩 刘其沅 杨同友 编
杜宝勋 审校

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书主要介绍半导体激光器、发光二极管和光电检测器的工作原理，器件的特性参数、使用方法和它们的发展趋向。在了解工作原理的基础上讨论如何把光电子器件用在光端机和相关的测试仪表上。书中还介绍了光电子器件测试方法和判断器件质量优劣的方法。

本书可供从事光纤通信工作的技术人员和邮电学校相关专业师生学习参考。

光纤通信技术丛书

光源和检测器

潘中浩 刘其沅 杨同友 编

杜宝勤 审校

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：787×1092 1/32 1988年2月第一版

印张：7²⁸/₃₂ 页数：126 1988年2月河北第1次印刷

字数：178千字 印数：2 000 册

ISBN7115—03467—2/TN

定价：1.70元

出版者的话

为了普及光纤通信技术，为我国通信现代化服务，我们组织编写了一套“光纤通信技术丛书”，陆续出版。

这套丛书准备结合国内光纤通信发展现状，介绍光纤光缆及其测试技术、有源无源光电器件、光端机、光纤通信系统及其测试等。该丛书将包括《光源和检测器》、《光纤技术》、《光纤测试》、《通信光缆》、《光纤通信专用网》、《无源器件》、《光纤通信系统测试》、《34Mb/s光端机》等十余种。丛书读者对象主要是从事光纤通信维护、施工、研制生产人员和有关院校通信专业的师生。

我们殷切希望广大读者对这套丛书提出意见和建议，帮助我们做好这一工作。

录

• 1 •

第四章 半导体光电检测器的工作原理与结构····· (94)

- 第一节 光电检测器的物理基础····· (95)
- 第二节 $p-n$ 结的光电效应····· (100)
- 第三节 半导体光电检测器分类····· (104)
- 第四节 光电检测器的特性····· (105)
- 第五节 短波长光电检测器····· (114)
- 第六节 实用化硅雪崩光电二极管性能的比较····· (142)
- 第七节 硅光电二极管的制作····· (156)
- 第八节 长波长光电检测器····· (161)

第五章 半导体光电检测器的参数、测量及应用····· (177)

- 第一节 量子效率和响应度····· (178)
- 第二节 击穿电压和暗电流····· (181)
- 第三节 倍增因子····· (182)
- 第四节 击穿电压温度系数····· (184)
- 第五节 光谱响应范围····· (185)
- 第六节 简易测量····· (189)
- 第七节 器件特性的图示与记录····· (192)
- 第八节 噪声特性····· (193)
- 第九节 器件电容····· (200)
- 第十节 响应时间····· (202)
- 第十一节 截止频率····· (213)
- 第十二节 在光纤通信接收机中的应用····· (215)

第六章 新型半导体光电器件····· (223)

- 第一节 隐埋条形结构半导体激光器····· (223)

第二节	长寿命半导体激光器.....	(225)
第三节	动态单纵模半导体激光器.....	(227)
第四节	外差光纤通信用的半导体光源.....	(229)
第五节	吸收区和倍增区分开的雪崩光电二极管...	(231)
第六节	高速长波长雪崩光电二极管.....	(235)
第七节	隐埋结构长波长雪崩光电二极管.....	(237)
第八节	超晶格雪崩光电二极管.....	(239)
第九节	波分复用光电检测器.....	(240)
第十节	长波长PIN-FET单片集成组件	(242)
第十一节	长波长光电晶体管.....	(243)

第 一 章

光电器件在光纤通信系统中的作用

光纤通信系统是以光为载波、以光纤为传输介质的通信系统。因此，在发送端有产生光载波的半导体光源，并将电信号转变为光信号；在接收端有将光信号转变为电信号的半导体光电检测器。在这一章里，首先介绍光纤通信系统的组成和信号传输原理，然后叙述光电器件在光纤通信系统中的作用。

第一节 光纤通信系统的 信号传输原理

光纤通信系统的组成如图 1-1-1 所示，它包括发送、传输和接收三个部分。在加上适当的接口以后，就可以作为一个单

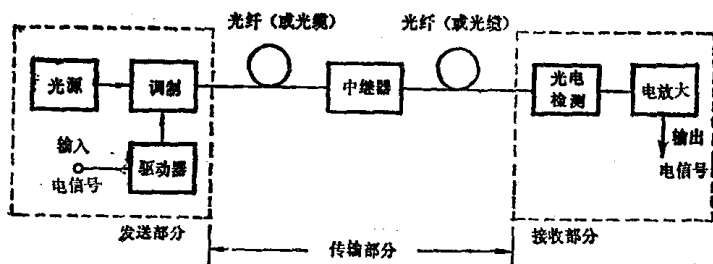


图 1-1-1 光纤通信系统的组成

独的“光线路”插入现有的通信系统。

根据传输信号的形式，可以把光纤通信系统分为数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统。因为光纤的频带很宽，对传输数字信号十分有利，所以大容量、长距离的光纤通信系统均为数字光纤通信系统，短距离、小容量的光纤通信系统通常是模拟光纤通信系统。

一、发送部分

发送部分由光源、调制器和驱动器组成。光纤通信系统要求光源有一定的输出光功率，一定的谱线宽度，工作寿命在十万小时以上。在光纤通信系统中，广泛使用半导体激光器或发光二极管。短波长($0.85\mu\text{m}$)的AlGaAs激光器和发光二极管已经实用化了，完全可以满足光纤通信系统的要求；长波长($1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$)的InGaAsP激光器和发光二极管正在发展之中，还需要进一步提高器件的性能才能满足实用化的要求。

可以采用两种调制方式。第一种调制方式是直接调制，即用电信号调制半导体激光器或发光二极管的注入电流，使其输出光的强度随着调制信号发生变化。这种调制方式不要求有单独的调制器，光的产生和调制是在半导体激光器或发光二极管内同时完成的，它是目前广泛采用的调制方式。直接调制的主要限制因素是调制速率，当调制速率较高时，半导体激光器的噪声变大，谱线变宽，还可能产生附加的寄生振荡。

第二种调制方式是间接调制，这种调制方式的特点是要求有单独的调制器，例如电光调制器、声光调制器和磁光调制器。电光间接调制可以实现强度调制、相位调制或偏振调制。间接调制的优点是调制速率较高，但是技术难度较大，只能在对调制特性有特殊要求的系统中使用。

二、传输部分

传输部分由光纤（或光缆）和中继器组成。在短距离光纤通信系统中，通常不需要中继器。

半导体光源输出的光通过耦合器进入光纤，要求耦合器有较高的耦合效率。光源和光纤不同，耦合效率也不同。就光源而言，激光器的耦合效率较高，发光二极管的耦合效率较低；就光纤而言，多模光纤的耦合效率较高，单模光纤的耦合效率较低。光源与光纤的耦合，还要注意光反射的问题。因为由光纤反射回激光器的光，影响激光器的正常工作，所以要在光源和光纤之间加上隔离器，以消除反射光的影响。

光纤的种类很多。目前使用的光纤有三种：多模突变型光纤、多模渐变型光纤和单模光纤，如图1-1-2所示。该图表示了三种光纤的折射率分布和光在其中传播的情况。

损耗和带宽表示光纤的传输特性。光纤的损耗主要由石英材料的纯度来决定，金属杂质（铁、钴、镍、铜等）和氢氧根都是有害的，必须努力加以去除。目前，在波长为 $0.85\mu\text{m}$ 时，损耗为 2dB/km ，波长为 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 时，损耗分别为 0.5dB/km 和 0.2dB/km ，基本上达到了损耗的理论极限。

多模光纤的带宽由多模畸变来决定，单模光纤的带宽由材料色散和波导色散来决定。光纤的材料色散与光源的谱线宽度有关，单模光纤通信系统要求光源的谱线宽度越窄越好。更值得注意的是，光纤的材料色散在波长 $1.3\mu\text{m}$ 附近几乎为零。光纤的波导色散与其结构的均匀性有关，当然越均匀越好。

为了进一步降低光纤的损耗，人们正在研究超长波长（ $2\mu\text{m}$ 以上）光纤，这是一种非石英系玻璃或单晶材料的光纤，例如 ThB （碲化钼）光纤，它在 $1\sim 10\mu\text{m}$ 波长范围内的损耗为

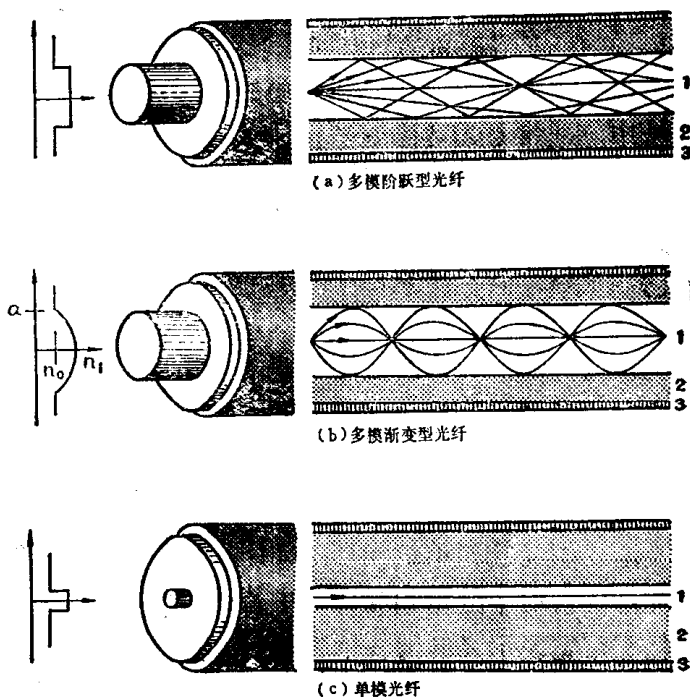


图 1-1-2 目前使用的三种光纤

10^{-3}dB/km 。

另外，还必须考虑光纤接头和连接器的损耗，因为光纤传输线是由许多段光纤连接而成的。目前，每段光纤长度可达40公里，每个接头的损耗约为 0.02dB ，每个连接器的损耗可以低于 0.5dB 。

在长距离光纤通信系统中，要求每隔一定的距离加入一个中继器。理想的中继器应该是直接光放大的中继器。但是，在目前的光纤通信系统中，均采用光电转换的中继器。也就是说，中继器是由光接收机和光发送机组成的，接收机中的光电检波器把来自入端光纤的已经衰减了的光信号变为电信号，然

后把电信号放大并用它来调制发送机中的半导体光源，最后使光源输出的光信号耦合进入出端光纤。

随着器件的理论研究和制作技术的发展，已经在实验室中使用了半导体光放大器，这就使直接光放大的中继器成为现实。

三、接收部分

接收部分由光电检测器和电信号放大器组成。光电检测器把接收到的光信号变成电信号，然后把电信号放大，还原成原来的信息。因为光电检测器接收到的光信号很微弱，所以要求它是低噪声、高量子效率、快响应速率和有倍增效应的器件。

目前，在光纤通信系统中使用的半导体光电检测器，有PIN光电二极管和雪崩光电二极管。前者是无增益的器件，后者是有增益的器件。短波长的Si-雪崩光电二极管已经实用化了，长波长的InGaAsP-PIN光电二极管已经研制成功。

接收机的主要指标是其灵敏度。为了提高接收机的灵敏度，设计者必须合理选择光纤通信系统需要的光电器件。

可以采用两种接收方式。第一种接收方式是直接检波，即用光电检测器直接把光信号变为电信号。这种接收方式是目前广泛采用的接收方式。第二种接收方式是外差接收。首先，接收机产生的本地光振荡与来自光纤的光信号在混频器中差拍形成中频光信号；然后，光电检测器把这个中频光信号变为中频电信号。这种接收方式的优点是能够大幅度地提高接收机的灵敏度。但是，因为技术难度较大，所以目前还处于研究阶段。大量的理论和实验结果表明，外差接收是一种很有发展前途的接收方式。

四、接口

因为光纤通信系统必须与现有的通信系统连接使用，所以二者之间的接口是必须解决的问题。就接口设备而言，有的比较简单，有的相当复杂，这要根据具体情况加以考虑。下面以数字通信为例来说明接口的重要性。

在光纤通信系统中，光端机与PCM电端机连接时，二者之间的接口不是简单的连接，必须考虑到信号的码型问题。因为PCM电端机的信号为双极性码，在光纤通信系统中传输的信号为单极性码，所以必须在PCM电端机和光通信系统的端机之间加上码型变换的接口设备。

此外，接口设备的码速必须符合国际电报电话咨询委员会(CCITT)的建议标准。表1-1列出了CCITT的码速和话路数标准(表中5次群尚未列入国标和CCITT建议)，设计者必须采用这个标准。

表 1-1

地区	系列	复用次数	0次群 (kb/s)	1次群 (Mb/s)	1.5次群 (Mb/s)	2次群 (Mb/s)	8次群 (Mb/s)	3.5次群 (Mb/s)	4次群 (Mb/s)	5次群 (Mb/s)
日本	码速		64	1.5	—	6.3	32	—	100	400
	话路数		1	24	—	96	480	—	1440	5760
北美	码速		64	1.5	2.2	6.3	45	90	274	—
	话路数		1	24	48	96	672	1344	4032	—
欧美	码速		64	2	—	8	34	—	140	560
	话路数		1	30	—	120	480	—	1920	7680

根据CCITT标准，PCM电端机的信号都是双极性码。但

是，码型因复用次数而异。例如，二次群（8.448Mb/s）和三次群（34Mb/s）采用HDB3码，四次群采用CMI码。但是，将双极性码变成单极性码之后，原来码型的特点就完全消失。为了适应信号在光纤内传输，必须对单极性码重新进行编码，这就是所谓“光线路码”的问题。这个问题也是接口必须考虑的重要问题。

如果光线路码的连“0”码或连“1”码太长，则会出现以下两个问题：（1）定时信号的提取有困难；（2）信号脉冲有直流漂移。为了解决这两个问题，通常采用如下两个办法：

1. 对输入信号进行扰码，使码流中的“0”码和“1”码出现的概率大致相等；

2. 在输入信号上附加冗余码，把连“0”码或连“1”码的个数控制在一定长度以内。

在采用第一个办法时，码流中的连“0”码或连“1”码的数目是随机的；在采用第二个办法时，码流中的连“0”码或连“1”码的数目是确定的，同时还可以利用冗余码对系统进行监测。因此，许多数字光纤系统采用第二个办法。这个办法的具体内容通常是mBnB字变换码和mB1C冗余比特插入码。

mBnB字变换码是，将m个二进制信号码编成一组（即一个字），变换成n个二进制信号码为一组的线路码，例如1B2B码、3B4B码、5B6B码、17B18B码等。

mB1C冗余比特插入码是，在二进制信号码流中进行 $m+1/m$ 的码速变换，每隔m比特插入1比特冗余补码C。采用mB1C冗余比特插入码，可以改善“0”码和“1”码的平衡度，还可以用C码对光纤通信系统进行监测。

第二节 半导体光电器件在光纤通信系统中的作用

这里所说的半导体光电器件，系指半导体激光器、发光二极管和光电检测器。半导体光电器件具有体积小、重量轻、效率高、寿命长等优点。半导体光电器件的性能对光纤通信系统的性能具有决定性的影响。

中继距离是光纤通信系统的重要指标之一，而中继距离的长短取决于光源、光纤和光电检测的特性。光源的输出功率越大、谱线宽度越窄，光电检测器的噪声越低、量子效率越高，光纤通信系统的中继距离就越长。

半导体激光器与发光二极管相比，不仅谱线宽度窄得多，而且耦合进入光纤内的功率大得多。因此，从增大中继距离的观点看来，应该用半导体激光器作为光源。例如：对于一个损耗限制系统，光纤的损耗为 3dB/km ，接收机的灵敏度为 -60dBm ，在使用半导体激光器作为光源时，耦合进入光纤内的功率约为 0dBm ，中继距离可达 20km ；然而，在用发光二极管作为光源时，耦合进入光纤内的功率为 -18dBm ，中继距离只有 14km 。

显然，如果光纤的损耗和耦合进入光纤内的功率已经确定下来，则中继距离就由接收机的灵敏度来决定。光电检测器的噪声和量子效率是影响接收机灵敏度的主要参数，因而也是影响中继距离的主要参数，设计者必须充分考虑这些因素。

半导体光电器件的寿命对光纤通信系统的可靠性有决定性的影响。光纤通信系统的可靠性是用其平均故障时间(MTBF)

来衡量的。假设半导体光电器件的故障概率为1000菲特(10^{-6} /器件·小时)；如果在光纤通信系统中有10个半导体光电器件，则其平均故障时间(MTBF)为 10^6 小时，这就要求半导体光电器件的寿命在10万小时以上。

光纤通信系统的发展以光电器件的发展为前提条件，新型半导体光电器件的出现将导致新型光纤通信系统的出现。例如，单纵模高稳定度的半导体激光器的出现将促进外差光纤通信系统的发展。

在我国，相对于光纤通信的发展来说，半导体光电器件的发展是一个薄弱环节，这是影响光纤通信系统走向实用化的主要矛盾，我们应该集中力量来为发展半导体光电器件作出贡献。

第 二 章

半导体光源工作原理及器件结构

第一节 光源、激光和激光器

谁都见过烛焰、白炽灯发光。但发光的原理却一直到近代物理学发展起来后，才得到正确的解释。我们知道，来自烛焰或白炽灯的光是由为数极多的原子或分子发射的光波组成的。各个原子从能量较高的状态跃迁到能量较低的状态，就将其多余的能量以光的形式发射出来（见图2-1-1）。有人把光简单地看成是一种正弦波，其实光不是无限连续的，每个发光中心的发光仅持续极短的时间，相互独立的发光中心各自发射一段又一段叫作波列的光波（见图2-1-2）。这些光波在频率上、

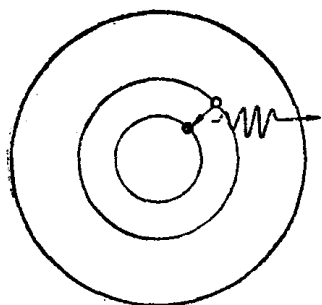


图 2-1-1 原子跃迁发光

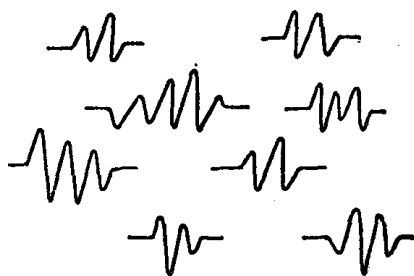


图 2-1-2 各个原子发射的光波