



上海科技专著出版资金资助  
上海交通大学学术出版基金资助

# 高速光纤传输系统

苏翼凯 冷鹿峰 著



上海交通大学出版社

上海科技专著出版资金资助项目

上海交通大学学术出版资金资助项目

# 高速光纤传输系统

苏翼凯 冷鹿峰 著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书首先介绍了现代光通信系统的结构和组成部件,然后分析影响传输系统性能的因素和提高性能的关键技术,最后给出了一些系统的设计实例,这些实例均是作者完成的研究成果。

本书内容包括:光纤传输系统的器件;波分复用技术和相应的系统;传输系统的损伤因素;高速光传系统的关键技术;各种传输系统的设计和分析。读者在掌握本书内容后,可对光纤传输系统及其关键问题有透彻的了解,能够设计和评价传输系统和子系统。

本书可作为理工科大学研究生、教师及其相关研究人员教学参考书和参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速光纤传输系统/苏翼凯,冷鹿峰著. —上海:上海交通大学出版社,2009

ISBN978-7-313-05486-9

I. 高... II. ①苏...②冷... III. 光纤通信—通信传输系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 175691 号

### 高速光纤传输系统

苏翼凯 冷鹿峰 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林有限责任公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:15.5 字数:289 千字

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

印数:1~3 030

ISBN978-7-313-05486-9/TN·138 定价:35.00 元

---

版权所有 侵权必究

# 出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

# 前 言

2000年以来,全球网络带宽的年增长率接近100%。中国干线业务量和带宽实际年增长率均超过了200%,国际互联网带宽年增长245%,是全球带宽增长率的数倍。由于数据业务的快速发展,根据保守估计到2010年我国大城市单节点的端口容量将达到3~5Tbps。这对于下一代网络的干线传输、城域、接入环节均提出了更高的要求。高速大容量传输系统、城域网和低成本接入网络将成为下一代网络的重要组成部分。

近几年来,光传输系统在提高速率、增加传输容量、延长传输距离和降低成本这几个方面不断取得进展。新技术的出现使得传输容量和距离的大幅度提升成为可能,同时可以显著降低成本、提高系统灵活性和效率。本书首先介绍了现代光通信系统的结构和组成部件,然后分析影响传输系统性能的因素和提高性能的关键技术。最后本书给出了一些系统的设计实例,这些实例均是作者完成的研究成果。全书共5章。第1章介绍了光纤传输系统的器件,主要分为有源和无源部分。第2章介绍了波分复用技术和相应的系统,包括密集波分和粗波分。第3章分析传输系统的损伤因素,包括光信噪比、非线性效应、色散、偏振模式色散、放大器增益平坦度和发射机啁啾。第4章介绍高速光传输系统的关键技术,如各种新型码型、减小非线性的色散图设计、低噪声宽带放大器系统、前向纠错及自动补偿技术。第5章在前面几章的基础上给出了各种传输系统的设计和分析,包括大容量(3.2T)、高速(160G)、采用无制冷激光器的CWDM城域传输、基于Duobinary码型的电均衡、无源光接入网络、动态可重构网络和光网络中各种光信噪比的监视方案和演示。

读者在掌握本书的内容后,可对光纤传输系统及其关键问题有透彻了解,能够设计和评价传输系统或子系统。书中每章节后有参考文献以供读者了解某一技术的细节。

此书内容包含了作者们的多年研究成果,以在高校和工业界举办的多次光纤通信讲座作为基础。这些讲座的听众包括研究生、教师、工业界的技术人员、部门主管和科学界的人士。本书的章节由浅入深,由理论基础到实际应用,力求概念清晰、突出前瞻性。

## 2 高速光纤传输系统

---

本书编写过程中得到光传输与信息处理实验室的昌庆江、徐新余、田玥、高俊明、卢媛媛、刘芳菲、严慈朔、李强、王涛、田祥庆等成员的帮助,部分章节内容包含了他们的研究成果,在此深深致谢。

作者

2008年9月

# 目 录

|                     |        |
|---------------------|--------|
| <b>1 光传输器件</b>      | ( 1 )  |
| 1.1 光信号源和光发射机       | ( 1 )  |
| 1.2 光电检测器与接收机       | ( 8 )  |
| 1.3 光纤              | ( 14 ) |
| 1.4 光放大器            | ( 30 ) |
| <b>2 波分复用系统概述</b>   | ( 38 ) |
| 2.1 光复用器和光解复用器      | ( 38 ) |
| 2.2 波分复用光传输技术       | ( 50 ) |
| 2.3 DWDM 原理与系统组成    | ( 57 ) |
| 2.4 CWDM 简介         | ( 62 ) |
| <b>3 传输系统中的损伤因素</b> | ( 65 ) |
| 3.1 光信噪比            | ( 65 ) |
| 3.2 非线性             | ( 72 ) |
| 3.3 色散              | ( 84 ) |
| 3.4 偏振模色散           | ( 97 ) |
| 3.5 增益平坦度           | (108)  |
| 3.6 啁啾              | (109)  |
| 3.7 总结              | (112)  |
| <b>4 传输系统关键技术</b>   | (117)  |
| 4.1 码型              | (117)  |
| 4.2 码型转换            | (132)  |
| 4.3 色散图             | (139)  |
| 4.4 拉曼(Raman)放大器    | (143)  |

## 2 高速光纤传输系统

---

|          |                      |              |
|----------|----------------------|--------------|
| 4.5      | 前向纠错 .....           | (151)        |
| 4.6      | 信号再生与电补偿 .....       | (157)        |
| 4.7      | 相位编码调制的相干检测 .....    | (167)        |
| <b>5</b> | <b>系统分析与设计 .....</b> | <b>(178)</b> |
| 5.1      | 高速长途传输系统 .....       | (178)        |
| 5.2      | 城域传输 .....           | (191)        |
| 5.3      | 接入系统 .....           | (198)        |
| 5.4      | 动态可重构网络 .....        | (220)        |
| 5.5      | 网络中的光信噪比监测 .....     | (229)        |

# 1 光传输器件

## 1.1 光信号源和光发射机

在光信号被送入光纤数据链路之前,电信号必须要转换成光信号才能在光纤中传输。光发射机就是把输入的电信号转换为光纤中传输的光信号的器件,主要包含接口电路、信号驱动电路和光信号源。接口电路接收到来的电信号,对其进行处理,使其适应信号驱动电路,信号驱动电路通过改变电流强度调制光信号源。

光信号源的作用是完成电-光能量的转换,它是光纤通信的核心器件。光纤数据链接的性能依靠耦合光纤中光信号功率的大小。本节主要讨论光信号源的类型和光产生的机制。

### 1.1.1 光源的性质

低损耗光纤和半导体光源技术的进步大大推动了光通信的发展。能够成功应用于光纤系统的半导体光源所具有的物理特性主要包括:

- 与低损耗光纤相融合,能够将光有效地耦合到光纤中。
- 光发功率足够大,克服光纤衰减和链接损耗,以便在接收机处能够进行信号检测。
- 能够发射使光纤损耗和色散最小化的光波长。
- 具有使色散最小化的窄频谱宽度。
- 能够直接调制光输出功率。
- 在周围环境变化时(如温度)具有稳定的工作性能。
- 成本低,比相应的电设备更可靠。

光纤通信系统中常用的光源主要有两种:半导体发光二极管(LED)和半导体激光器(LD)。

### 1.1.2 工作波长

光纤通信系统工作波长为 850nm、1300nm、和 1550nm。设计的半导体光源应该能够工作在这样的波长上,同时要使光纤吸收最小,系统带宽最大。通过设计工作在特殊波长上的光源,可以使光纤传输时吸收的杂质(例如  $\text{OH}^-$ )最少。同样

可从工作波长上设计使光纤和光源的色度色散和模内色散最小,获得最大系统带宽。

半导体光源材料的性质决定了发射光的波长范围是在 850nm,这一工作波长避免了在 900nm 附近  $\text{OH}^-$  杂质的吸收损耗。在短距离低带宽系统中,工作在 850nm 波长的 LED 可以提供足够的光功率。然而,由于多模光纤色散,以及较高的光纤衰减和 LED 较低的输出功率,限制了 LED 在长距离高带宽系统中的应用。

多模渐变光纤的出现使得半导体光源的工作波长范围扩展到 850~1300nm。相比于多模阶跃光纤,多模渐变光纤的模内色散更低。由于在 850nm 有很高的色度色散,工作在 850nm 波长的系统不能充分利用光纤的低模内色散特性。随着多模光纤设计能力的提高,设计的下一代 LED 能够工作在 1300nm 波长区域,采用这种 LED 的多模渐变光纤系统比 850nm 系统具有更长的距离和更高的带宽。由于工作在 1300nm 区域的光纤材料损耗和色散大大减小,长距离和高带宽的系统完全可以实现。

单模光纤设计和生产技术的进步加快了适应单模光纤的半导体 LED 和 LD 的发展。单模光纤具有很低的色散值,然而对于长距离高带宽的通信系统,现在的 LED 不能辐射足够的光功率到单模光纤中。新的半导体 LEDs 和 LDs 能够辐射工作在 1300nm 波长的光到单模光纤,使之充分利用单模光纤的低色散值优点。另外,工作在 1500nm 波长的 LED 和 LD 也被开发出来,具有最低的光纤损耗。

### 1.1.3 器件工作原理

半导体光源具有二极管的所有特性。但它有一个特别的有源层,当电流流过这个层时辐射光子。半导体的性质主要由组成这个层材料性质决定。Silicon (Si) 和 gallium arsenide (GaAs) 是使用在电和光电设备中最普通的两种材料。在一些情况下,其他物质如 aluminum (Al), indium (In) 和 phosphorus (P) 也被加入用来改变半导体的性质,这些元素叫做掺杂物。

当电流流过半导体光源时,LED 通过自激辐射产生光子。在 LED 的有源层,自激辐射时随机产生的光只有一部分存在于半导体中,能够被耦合到光纤。大部分光被 LED 的材料吸收并以热能的形式散发出去。这种从 LED 辐射光子的过程是不连续的,它有一个很宽的频谱和输出方式。

由于辐射的是未聚焦的不相干光,LED 在单模光纤中的应用被大大限制。虽然单模光纤的研究取得了很大的进展,但在很多应用中仍然不能辐射足够的光功率。LED 最合适多模系统,因为相比较 LD,它能以低成本辐射足够的光功率。

LD 比 LED 更加复杂。当电流通过 LD 时,它通过自激辐射产生光。最初自激辐射产生的光和激光材料相互作用产生新的光子,这个过程发生在称为激光空

穴的有源层中。受激光子和原始光子具有同样的性质(如波长、方向、相位)。产生光输出的辐射过程 and 二极管的物理特性是相关的,有一个很窄的频谱宽度和输出方式。和 LED 一样,并不是所有的光子能被耦合进光纤,一些光子被吸收,以热量的形式散发出去。不同的 LED 和 LD 将不同数量的电能转化成光能。

因为 LD 能够比 LED 辐射更多的聚焦光,所以它能注射光功率给单模和多模光纤。但是,由于 LD 的驱动电路复杂,而且成本高,所以一般只用在单模光纤系统中。

光源产生的光功率的范围从 LED 的  $\mu\text{W}$  级到 LD 的数十  $\text{mW}$  级。不过,在传输中不可能同时辐射所有需要的光功率。耦合进光纤中的光功率数量叫做相对光功率,它由下面的因素决定:

- 光的入射角度。
- 相对于光芯尺寸大小的入射光辐射区域的大小。
- 光源和光纤的角度调节。
- 光纤的耦合特征(例如数孔直径和折射率)。

一般说来,LD 发出的光会扩展到  $10\sim 15^\circ$  的角,LED 扩展的角度更大。当光从一个光源耦合到光纤中时,很容易产生几个 dB 的耦合损耗,特别是 LED。光纤的耦合效率是相对光功率的测量尺度。和光源相连接的光纤类型决定耦合效率,当然耦合技术也有很大的影响。

### 1.1.4 发光二极管

发光二极管(LED)是一种发射非相干光的半导体器件,当电流通过它时会发生自激辐射。最典型的  $850\text{nm}$  波长范围的 LEDs 用 GaAs 和 AlGaAs 材料制成的, $1300\text{nm}$  波长范围的 LED 用的材料是 InGaAsP 和 InP。

光纤通信系统中基本 LED 有面辐射光二极管(SLED)、边辐射二极管(ELED)和超辐射发光二极管(SLD)三种。通常,LED 被用于短距离、低速率光纤系统中。最典型的 SLED 的有效传输速率是  $250\text{Mbps}$ ,传输距离是  $3\text{km}$ 。由于 SLED 在较宽的范围辐射光,只适合于多模系统。ELED 可以被调制到  $400\text{Mbps}$ ,应用于长距离,适合单模和多模光纤系统。SLD 是基于 ELED 设计的,应用在超辐射发光二极管组件中,调制速率可以超过  $400\text{Mbps}$ 。LED 的这些性能差别使得设计人员在应用中有了更多的选择。

典型的 ELED 结构原理如图 1.1 所示。它给出了应用在 ELED 中不同层的半导体材料。有源区主要是一条窄条纹,位于半导体感光层表面的下方。分割或者打磨半导体的感光层,使窄条纹出现在器件的前后端。这种切割或者打磨的前后端条纹称为解理面。

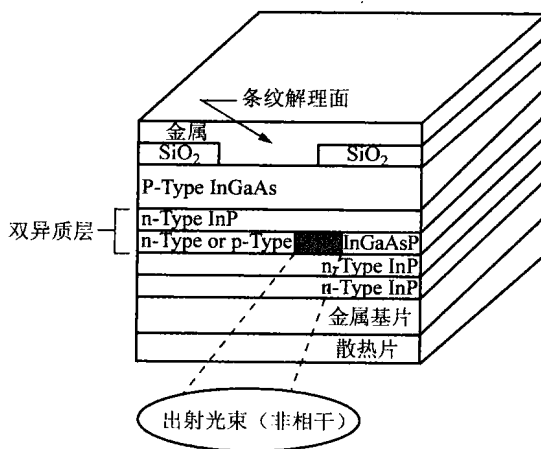


图 1.1 ELED 结构图

在 ELED 中,后解理面具有高反射率,在后部反射发射光。前解理面被涂上抗反射的涂覆层,可减少前解理面对光的反馈,允许光的发射。ELED 的发射光只能通过前解理面,它的发射角很窄,因此具有很好的光源-光纤耦合效果。

### 1.1.5 激光二极管

LD 是一种通过受激辐射产生光的器件。在激光有源区域通过受激辐射产生光子,图 1.2 显示了产生光的光谐振腔示意图。通过放置一个反射镜,放大介质中每一端包含辐射光子的光谐振腔。反射镜必须是部分反射,使得在耦合一根光纤时一些辐射能够逃离光谐振腔。

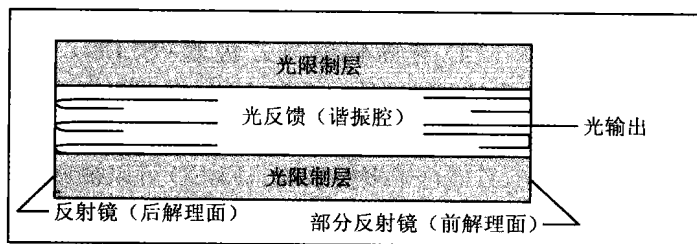


图 1.2 产生光的光腔示意图

对一个特定的 LD,只有特定波长的光能够被激光器放大。当选择合适的波长(也称为激光模式)通过光谐振腔来回反射,就会发生放大。在光谐振腔的一个来回过程中,所选激光模式的光增益必须超过光损失,这个过程称为光反馈。

激光阈值指激光输出主要是受激辐射而不是自发辐射时所产生的最小驱动

电流。通过测量相对光输出功率和半导体激光二极管的输入驱动电流,图 1.3 给出了自发辐射变化到受激辐射的示意图,受激辐射超过自发辐射的最低电流就是阈值电流。

在达到阈值电流之前,随着驱动电流的微小增加,光输出功率也只发生微小增加。但是,一旦达到阈值电流,驱动电流的微小变化将导致光输出功率的大幅度增加。

包括气体、液体和半导体的许多材料可以制成激光的传输介质。LD 发射的光具有很高的单色性和方向性,这使得它的输出具有很窄的频谱宽度和很小的输出波束宽度。因此半导体激光二极管是光纤中的主要光源。

在光波导区域,LD 和 ELED 具有相似的几何学性质。通过形成部分反射的前解理面,产生光反馈。后解理面通常覆盖一反射层以便射入这个面的光能够被反射到有源区。前解理面一般没有覆盖反射层,以便大多数光能被辐射。当增加驱动电流时,二极管变成了激光器。

为了最优化频率响应,LD 经常要偏置到超过阈值。因此在一个 LD 光纤系统,光在一个高功率和一个低功率层之间被调制,而且从不中止。通常 LD 的频率能被调制到超过 2GHz,一些 LD 甚至能被调制到超过 20GHz。

LD 和 LED 有几个重要的差别。一个是 LED 常常缺少反射解理面,在一些情况下被设计成抑制光反射回到有源区域。另一个区别是 LD 需要有更高的驱动电流才能发出光,但在器件中,高驱动电流将导致更复杂的驱动电路和高热量损耗。LD 比 SLED 或者 ELED 有更高的温度敏感性,增加 LD 的温度将大大减小它的光辐射功率,如果增加光的温度超过某一门限值还会导致激光损耗。在许多应用中,LD 的温度必须被严格地控制,一般要用电冷却器来降低温度。

### 1.1.6 光发射机

正如前面所说的,光发射机是一个电光混合设备,它把电信号转换成光信号,光信号通过发射机的输出接口耦合到光纤中。

尽管半导体 LD 和 LED 有许多相似的地方,但是它们之间的差别使得各自的发射机设计大大不同。LD 光源的发射机比 LED 光源的发射机电路复杂得多,价格也更加昂贵。发射机的设计必须能够补偿光输出功率、响应时间、线性化和温度效应的差异,以确保有合适的执行系统。LED 中节点加热和 LD 中模式不稳定引

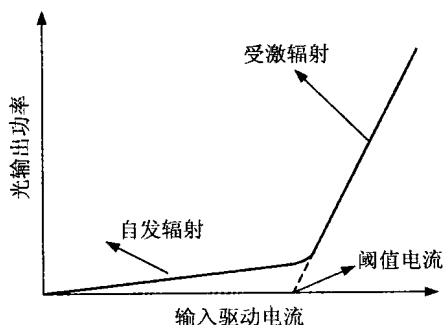


图 1.3 光输出功率与输入驱动电流的关系

起的非线性,使得发射机必须要有线性化电路。

LD是有阈值限制的器件,在断开状态下,LD有低于阈值的偏置,这种偏置叫做预偏置,采用预偏置是为了减小数字系统的启动延迟。大多数LD发射机用功率输出控制电路用来补偿温度敏感性。这种电路通过调节激光的偏置电流,可以维持LD的输出在一个恒定的均值范围内。而LED发射机一般没有这种输出功率控制电路。LD和LED发射机都包含冷却设备,以维持光源在一个相对恒定的温度。很多LD发射机还有一个内部热电冷却器或者相关的外部温度控制器件。

发射机的输出接口通常分成两大类:光连接器和尾纤。尾纤依附于发射机的光源上,在单个光缆或者松套缓冲管中一般作为覆膜光纤从发射机封装端引出。尾纤也可被焊接到发射机封装端以消除光纤应变。连接在发射机封装端的缓冲管和单个光缆也提供附加的应变消除。发射机输出接口也可以是一个光纤连接器。光源通过中间介质光纤耦合进输出光连接器,光纤的一端和光源连接,另一端连接到光输出连接器。光源也可以不通过中间介质光纤,直接耦合到输出光连接器。此时光源位于发射机的内部,以便直接把光功率耦合到匹配光连接器的光纤中。

### 1.1.7 光纤发射机的应用

光纤发射机可以分成数字光发射机和模拟光发射机两类。数字光发射机产生两个离散的光功率层,除了一些光在发射机断开状态下发射外,这些层本质上是一种开关状态。模拟光发射机不断改变光输出功率层作为输入电信号的函数。

#### (1) 数字光发射机

在数字光发射机的应用中,要考虑其链路数据率、传输长度、影响光源选择的工作环境、中心波长、频谱宽度和包类型等因素。

对于低数据速率的应用,光纤发射机通常采用850nm和1300nm窗口的LED光源。对于最低的数据速率(0到20Mbps)采用850nm波长的窗口,对于中间数据速率(50到200Mbps);采用1300nm波长窗口。光源几乎从来不用于低数据率的传输,因为在这种情况下一般要求极高的发射机输出功率。

对高数据速率的应用,大多数光发射机采用LD作为光源,典型的工作在1300nm和1500nm窗口。几乎所有的1500nm系统使用LD作为光源。1500nm的发射机只应用在极长距离和高速率的系统中。高速率发射机是一种混合微电路模块,几乎所有的高数据速率发射机都包含功率控制电路。根据具体应用,高数据速率发射机可能包含热电冷却器。

#### (2) 模拟光发射机

光发射机也可用于不同的模拟应用中,其时要考虑模拟的信号类型、传输长度、影响光源选择的工作环境、中心波长、频谱宽度和包类型等因素。

对于低频应用,模拟光纤发射机通常使用 850nm 和 1300nm 窗口的 LED 光源。低频应用主要适用于模拟音频和单信道视频系统,对这些系统,一般采用 850nm 窗口。对于中频应用,一般采用 1300nm 窗口,包括多信道模拟音视频系统和调频系统。激光光源几乎从不用于低频或者中频模拟应用系统中,主要原因是这种系统电路复杂,只有在要求极高的发射机功率输出时才采用这种系统。大多数模拟发射机是混合微电路模块和智能卡。

对高频应用,模拟光发射机使用 LD 光源。典型的高频应用是有线电视干线和远程雷达。LD 的模拟光发射机采用 1300nm 和 1500nm 窗口,其中 1500nm 窗口多被应用于有线电视干线。其他的应用既可以采用 1300nm 窗口也可以采用 1500nm 窗口。高频模拟发射机主要是智能卡,也有的是混合微电路模块。几乎所有的高频模拟发射机都包含热电冷却器和线性化电路、功率控制电路。

### 1.1.8 外部调制

直接调制是将调制信号直接作用在光源上,是最简单的调制方法。然而当激光器被偏置在接近阈值电流值,并且用激光输出的开关状态表示数字信号 1 和 0 时,高比特率的信号直接调制在激光器上会引入三个独立的限制条件:光载波的频率啁啾、激光输出功率的振荡以及寄生电容和电感引起的带宽限制。激光振荡和包寄生电容电感决定了最大调制频率只能达到 10GHz,尽管特别的设计可以使调制频率达到 25GHz。由于光纤有效带宽减小,特别是 1.55 $\mu\text{m}$  激光光源与标准单模光纤一起使用,频率啁啾限制了光通信系统的性能。在这样的系统中,比特率距离值大约只有 200Gbit $\times$ km/s。

远距离高速率光信号的传输主要是基于外调制技术。外调制是指光从光源发射后,在传输通道上被调制,也即这种调制是在光载波之外进行的。DFB 激光器能够被偏置在一个很好控制的偏置电流和温度处,在幅度和波长上产生稳定的光功率输出。外调制器可以克服直接调制中的许多缺点,可被用于标准单模光纤中远距离传输高质量的光信号。

有多种外调制器:吸收调制器、定向耦合调制器、全内反射调制器和 Mach-Zehnder 调制器等,最后一种是使用最为广泛的调制器。自从 1980 年以来,作为一种应用于高数据率和射频传输光通信系统中潜在的电-光调制器,Mach-Zehnder 干涉调制器得到广泛的研究。基于线性电光效应的多种不同类型的强度调制器被相关文献报道,这种调制器在光波导折射率正比例于叠加电场时发生变化,使得叠加电场的方向上有光偏振场的相位变化。

电-光调制器的主要材料之一是 LiNbO<sub>3</sub> 晶体,它含有 Ti 扩散波导。在 Mach-Zehnder 调制器中,通过电光感应效应引起两个通路信号之间的相位差(在行波波

导电极配置中,相位偏移只被一个通路的电光感应影响),再经过波导干涉仪来调制输出光的强度。如果两个通路信号是同相波导模式,它们将干涉和激发输出波导最低级的模式。如果两个通路信号偏离  $180^\circ$  的相位,它们将重新结合以便激发第一个反对称模式,而这个模式被截止因而迅速地衰减。因为调制器两臂的相位偏移只受到方向和激发电场一样的光场偏振的影响,M-Z 调制器对输入光场的偏振非常敏感。通常一个非常稳定的偏振光源是必须的,保偏光纤应该被用于光源和调制器输入端口之间。

## 1.2 光电检测器与接收机

### 1.2.1 光电检测器

光纤通信系统中,接收机一般由光电检测器和相关电路组成。就像发光二极管(LED)或激光器(LD)是发射机的核心部分一样,光电检测器是接收机的核心部分,只是 LED 和 LD 是将电信号转化成光信号,而光电检测器是其逆过程:将光信号转化成电信号。

一个良好的光纤通信系统,需要一个有效快速的光电检测器,要求有较高的灵敏度、足够宽的带宽、较小的附加噪声。

光电检测器的种类很多,常用的有四种:光电倍增管、光电导探测器、PIN 光电二极管和雪崩光电二极管。下面主要介绍其中两种:PIN 光电二极管和雪崩光电二极管。

#### 1. PIN 光电二极管

PIN 光电二极管的基本结构如图 1.4 所示。这种光电二极管最主要的特点在于,在 P 型和 N 型区之间有一层厚的轻掺杂的本征层。本征在半导体领域的解释就是“自然的”、“不掺杂的”。

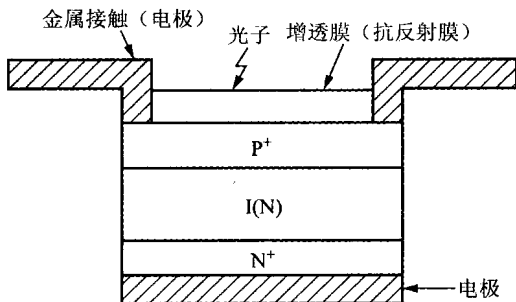


图 1.4 PIN 光电二极管的结构

PIN 光电二极管分为两大类:前向照射型(front-illuminate)和后向照射型(rear-illuminated)。在前向照射光电二极管中,光经过顶层进入空穴,为了减小光的反射,活动区表面覆盖一层抗反射材料(增透膜。光穿过薄的 P 层,在厚的本征层产生电子-空穴对。在后向照射光电二极管中,光经过重掺杂  $N^+$  层,进入活动

区,  $N^+$  层对入射光来说是完全透明的, 因为它的能带隙比入射光子的能带隙大。其他过程与前向照射光电二极管类似。

PIN 光电二极管有很多优点。最主要的特点是它的本征层是耗尽层, 能吸收光子。由于本征层通常很厚, 大部分的人射光子经过这一层都会产生电子-空穴对, 就会产生比较高的量子频率。此外, 不需要补偿反向电压以加宽吸收层带宽。所以说, PIN 光电二极管的主要优点在于功率足够高、带宽足够宽。PIN 的其他优点也是由其结构决定的。比如, 由于本征层几乎没有自由载流子, 这一层的电场很大, 所以电子-空穴的距离比较大。而且, 通过扫除载荷子, 可以减小暗电流。再者, 由于 P 层和 N 层与本征层相比非常薄, 所以 PIN 的扩散电流很小。与 P 层和 N 层相比, 入射光子更容易进入本征层, 使光电二极管的有效带宽增加。最后, 由于耗尽层的厚度是由本征层而不是反向电压决定的, 所以反向电压一般比较小(一般为 5V)。

但是存在一个 PIN 结构无法解决的问题: 本征层厚度。加宽本征层, 功效会提高, 但渡越时间见式(1.1)会增加, 降低了响应速度, 带宽效率也会降低, 所以设计时应兼顾功率效率和响应速度。

$$\text{渡越时间} \quad \tau_{tr} = w/v_{sat} \quad (1.1)$$

式中,  $w$  为耗尽层厚度;  $v_{sat}$  为渗透速度。

## 2. 雪崩光电二极管(APD)

光电二极管的一个主要参数是灵敏度——可以检测的最小光功率。由于功率的限制, 灵敏度成为光纤系统传输距离的主要决定因素。光电二极管越灵敏, 在一定的损耗下, 系统传输距离越长。要提高灵敏度就要放大光电流, 但外部放大器会引入本身的噪声, 又降低了灵敏度, 所以更好的办法是使电信号进入放大器之前, 先在光电二极管内部进行放大, 这就引出了另外一种光电二极管, 即雪崩光电二极管(APD)。

### (1) 功率考虑

雪崩光电二极管的基本结构实际上是一种特殊的 PIN 结构。与 PIN 光电二极管相同, 入射光子激发产生最初的电子和空穴, 不同的是 APD 需要加较高的反向电压(大约 20V), 这个电压加速了电子和空穴的产生, 这需要较高的能量。其中电子载流子在高反向偏压作用下, 以极快的漂移速度通过 PN 结, 并与耗尽区的晶格高速相撞, 产生新的电子-空穴对, 新产生的载流子积累足够的能量又电离出其他载流子, 这个过程不断重复, 就形成了所谓的雪崩倍增效应。这样, 一个光子最终产生很多载流子, 也就意味着在光电二极管内部放大了光电流。通常可以认为 APD 的量子效率远大于 1(一般为 10~100)。

根据能带图, 最初的光生电子撞击价带电子, 使其进入导带, 价带留下的空穴