

# 第5章

# 光纤通信系统

## 【要求】

①掌握光纤通信概念；②理解光纤通信系统组成；③了解光纤通信历史；④理解光纤通信特点；⑤理解光纤结构及其参数；⑥理解光纤的导光原理；⑦理解光纤衰减特性；⑧理解光纤色散特性；⑨理解半导体激光器及其特性；⑩了解光电探测技术；⑪理解掺铒光纤放大器原理；⑫了解波分复用技术；⑬了解光纤相干技术。

## 5.1 光纤通信概述

## 5.1.1 光纤通信的概念

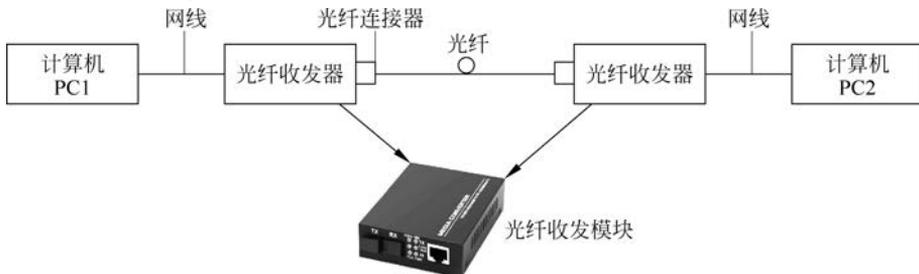
光纤通信是以光波为载频、以光纤为传输媒介的通信方式。没有光通信,就没有今天的信息时代。我们每天使用的智能手机,就高度依赖光传输,正是它为大量 4G/5G 基站接收的海量流量提供传输管道。

如图 4-41 所示,不同通信系统,其载波的频谱范围不同。光纤通信系统处在较高的频谱区域,它的波长处于  $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$  近红外,频率为  $167 \sim 365 \text{THz}$ ,而微波频率为  $0.3 \sim 3 \text{THz}$ ,这决定了光纤通信是一个比微波通信、卫星通信的带宽更宽的通信系统。

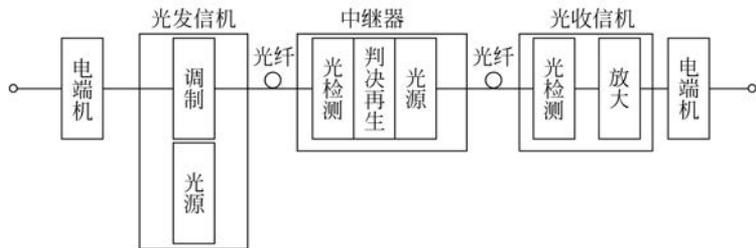
目前,研究人员在 80km 的标准单模光纤上实现了高达  $1.52 \text{Tb/s}$  的单载波速率。在工业界,最新的 10G PON 已可提供高达  $10 \text{Gb/s}$  的上、下行对称速率,时延降至  $100 \mu\text{s}$  以下,连接数提升 100 倍以上,可将“光纤到户”的模式转变为“光联万物”。

## 5.1.2 光纤通信系统组成

如图 5-1(a)所示,利用光纤收发模块把两台计算机连在一起,就实现了光纤通信。光纤收发模块中有光发信机和光收信机。典型的光纤通信系统由电端机、光发信机、光纤(有中继器)和光收信机等组成,如图 5-1(b)所示。



(a) 利用光纤收发器和光纤连接两台计算机



(b) 长距离光纤通信系统

图 5-1 光纤通信系统组成



视频



视频

### 1. 电端机

输入模拟信号经发端电端机的 PCM 进行抽样、量化和编码产生二进制电信号,即基带信号。

### 2. 光发信机

光发信机也称为光发射机,它实现电/光转换。它由光源、驱动器和调制器组成。其功能是首先将来自电端机产生的基带信号对光源发出的光进行通断调制,变成已调光波;然后将已调的光信号耦合到光纤去传输。其核心是光源,这个光源一般是激光器。

### 3. 光收信机

光收信机也称为光接收机,它实现光/电转换。它由光检测器和放大器组成。其功能是将光纤传输来的光信号,经光检测器转变为电信号;然后将这微弱的电信号经放大电路放大到足够的电平,送到收端的电端机。其核心是光检测器。

### 4. 光纤

光纤构成光的传输通路,其功能是将光发射机发出的已调光信号,经过光纤的远距离传输后,耦合到光接收机的光检测器,完成信息的远距离传送任务。

### 5. 中继器

中继器由光检测器、光源和判决再生电路组成,它的作用补偿光信号在光纤中传输时受到的衰减,对波形失真的脉冲进行整形。

大容量长距离的光纤通信系统大多采用数字传输方式,光纤传输系统是数字通信的理想通道。

## 5.1.3 光纤通信历史

### 1. 现代光通信的开端

贝尔在发明了电话 4 年后,发明了光电话,如图 5-2 所示,左边是发射端,右边是接收端,中间虚线是信道——大气信道。发射机采用弧光灯作为光源,首先通过透镜聚焦,将光能聚焦到话筒的振动膜;然后通过振动膜的反射和透镜聚焦向外发送光信号,光信号在大气中传输;接收端有一个抛物面镜,它会聚光的能量到硅电池,硅电池把光能转换为电能,从而在受话器这个电路中有电流产生,从受话器中恢复出声音消息。

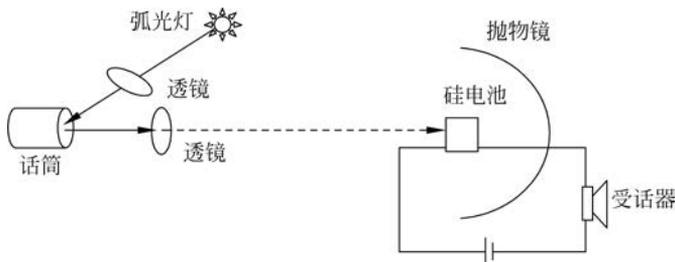


图 5-2 光电话

当不说话时,话筒不震动,硅电池的接收到光信号不变,电路中的电流强度也不变;



视频

当对话筒说话时,振动膜震动,反射光的强度会发生变化,硅电池转化成的光电流也会发生变化,于是就可以听到声音。

在光电话中,光是传输声音消息的载波,振动膜反射光的方式实现了语音消息对光的调制,硅电池实现了解调。

贝尔的光电话是现代光通信的真正开端。但是贝尔的光电话只能传输 213m。因为弧光灯是包含所有波长的白光,发散角比较大,在大气中传输损耗较大,而且非常容易受到天气因素的影响。因此,提高光通信的质量,首先要解决光通信的传输通道和光源两个问题,尤其传输通道的问题。



图 5-3 光在水流中传播

1870 年,亨廷尔发现光可在水流中传播(图 5-3),并采用全光反射的原理对这种现象进行合理解释。

1953 年,英国科学家卡帕尼发明了纤芯折射率大于包层折射率的玻璃纤维,但是损耗达 1000dB/km,仅能在内窥镜中使用。

所以,在十几年时间光通信处于停滞阶段。

## 2. 里程碑

1966 年,英国华裔科学家高锟指出,如果将光纤中过渡金属离子减少到最低限度并改进制造工艺,有可能使光纤损耗降到 20dB/km 以下;采用光纤可以实现高速通信,并给出了光纤的原始结构(图 5-4)。他的研究为现代光纤通信奠定了理论基础。为此,他获得了 2009 年的诺贝尔物理学奖。

## 3. 导火索

1970 年,美国康宁玻璃公司根据高锟的理论指导,制造出世界上第一根超低耗光纤,损耗因子达 20dB/km。

## 4. 爆炸性发展

从此以后,光纤技术迎来了爆发式的发展:

1972 年损耗降低到 4dB/km; 1974 年损耗降低到 1.1dB/km; 1976 年损耗降低到 0.5dB/km; 1979 年损耗降低到 0.2dB/km; 1990 年损耗降低到 0.14dB/km。

这期间,美国成功进行了容量约为 45Mb/s、传输距离为 10km 的光纤通信现场试验,是第一代光纤通信系统。

20 世纪 80 年代初,随着单模光纤(1.31 $\mu$ m)和量子阱激光器(1.31 $\mu$ m)的研发,开发出来了第二代光纤通信系统,数据传输速率达 1Gb/s,传输距离达 50km。

1990 年,随着单模长波长光纤(1.55 $\mu$ m)和单模激光器(1.55 $\mu$ m)的研发,开发出来了第三代光纤通信系统,数据传输速率达 2.4Gb/s,传输距离达 100km。

1996 年,波分复用技术取得突破,贝尔实验室开发出来了第四代光纤通信系统,数据传输速率从单波长的 10Gb/s 增加到多波长的 1Tb/s,传输距离达 1500km。

进入 21 世纪,随着密集度波分复用和分布负反馈半导体激光器的研发,开发出来了

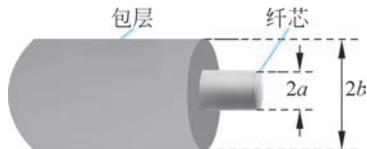


图 5-4 光纤原始结构

注:纤芯的折射率大于包层,光在其中全反射



视频

第五代光纤通信系统,传输距离达 6380km。

### 5.1.4 光纤通信特点

#### 1. 优点

(1) **传输频带宽,通信容量大。**载波频率越高,通信容量越大。目前使用的光波频率比微波频率高  $10^4 \sim 10^5$  倍,所以通信容量可增加  $10^4 \sim 10^5$  倍。目前,实验室里实现的最大容量为 100Tb/s,商用系统容量为 10Tb/s。

(2) **损耗低,中继距离远。**铜缆的损耗特性与缆的结构尺寸及所传输信号的频率有关,光缆的损耗特性仅与玻璃的纯度有关,目前通信用光纤的最低损耗达 0.2dB/km。采用析氢技术进一步减小光纤中的  $\text{OH}^-$  离子含量后,光纤损耗系数可以在相当宽的频带内几乎保持一致。例如:对于 400Mb/s 传输速率的信号,光纤通信系统无中继传输距离达到 50~70km;而同样速率的同轴电缆通信系统,无中继距离仅为几千米。

(3) **抗干扰能力强,无串话。**光纤主要是由  $\text{SiO}_2$  材料制成,是绝缘体,它不易受外界电磁场的干扰。强电、雷击等也不会显著影响光纤的传输性能;在核辐射等极端环境中,光纤通信仍能正常进行。

(4) **保密性强。**由于光纤传输的特殊机理,在光纤中传输的光向外泄漏的能量很微弱,难以被截取或窃听,也不会造成同一光缆中各光纤之间的串扰。

(5) **光纤直径和质量小。**光纤直径很小,制成光缆比电缆细而轻,这样在长途干线或市内干线上空间利用率高,而且便于制造多芯光缆与敷设。

(6) **资源丰富。**由于光纤的原材料是石英,地球上取之不尽、用之不竭的,而且很少的原材料就可以拉制很长的光纤。

#### 2. 缺点

(1) **质地脆,机械强度低。**光纤的理论抗拉强度比钢大,但光纤表面有微小裂痕,会使得光纤的实际抗拉强度非常低,因此裸光纤很容易折断。

(2) **光纤切断和接续需要特殊工具。**要使光纤的连接损耗小,两根光纤的纤芯必须严格对准。由于纤芯很细,而且石英的熔点很高,因此连接很困难,需要昂贵的专门工具。

(3) **分路、耦合不灵活。**光纤不如电缆易于分路和耦合,难于接入,需要专门的模块来实现低损耗的分路和高效率的耦合。

(4) **光纤弯曲半径不能过小。**光纤的弯曲半径小于 20cm 时,会有较大的损耗。

## 5.2 光纤及其导光



在光纤通信技术的发展历史中,光纤技术最为关键。那么光纤具有什么样的结构?是怎么导光的?

### 5.2.1 光纤结构

光纤的结构如图 5-5 所示,包括纤芯、包层和保护套。

纤芯的折射率较高,它的作用是传导光波。包层折射率较低,与纤芯一起形成全反射条件,它的作用是将光波封闭在光纤中传播。为了达到这一目的,需保证纤芯材料的折射率  $n_1$  大于包层材料的折射率  $n_2$ 。

目前,通信应用的光纤主要是石英玻璃光纤(图 5-6),其纤芯由掺有折射率较大的杂质的石英材料做成,而包层则往往在石英中掺入折射率较小的杂质。保护套的强度大,能承受较大冲击,用于保护光纤。刚拉制出来的光纤就像普通玻璃丝一样脆弱。为了保护光纤,作为产品提供的光纤都在刚拉制后经过一个套塑的工序,在其外表涂覆上一层甚至几层塑料层。涂覆可以提高光纤的抗拉强度,同时改善其抗水性能。

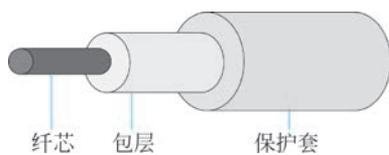


图 5-5 光纤的结构

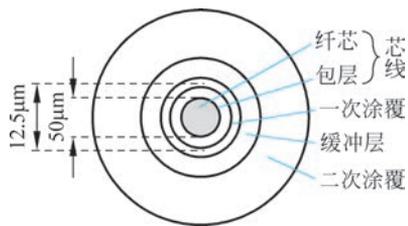


图 5-6 光纤各层结构

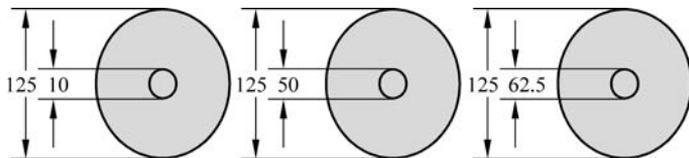


视频

## 5.2.2 光纤结构参数

### 1. 光纤尺寸

图 5-7 为光纤的典型尺寸。单模光纤的纤芯直径为  $10\mu\text{m}$ 。多模光纤的纤芯直径有的为  $50\mu\text{m}$ ,有的为  $62.5\mu\text{m}$ 。一般光纤的包层直径为  $125\mu\text{m}$ ,而一根头发丝的直径约为  $70\mu\text{m}$ 。

图 5-7 光纤的典型尺寸(单位:  $\mu\text{m}$ )

### 2. 相对折射率差

相对折射率差是表征纤芯和包层之间折射率差值的一个参数,其大小直接影响光纤的性能。其表达式为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (5-1)$$

通常情况下,纤芯和包层相对折射率差很小, $\Delta$  取值为  $0.001 \sim 0.01$ ,  $\Delta \ll 1$  的情况称为弱波导。

对于弱波导光纤,  $n_1 \approx n_2$ , 则有

$$\Delta = \frac{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)}{2n_1^2} \approx \frac{2n_1(n_1 - n_2)}{2n_1^2} \quad (5-2)$$

### 3. 折射率分布

阶跃光纤纤芯折射率为常数,折射率分布如图 5-8(a)、(b)所示。对于渐变光纤,纤芯、径向折射率呈渐变型分布,如图 5-8(c)所示。

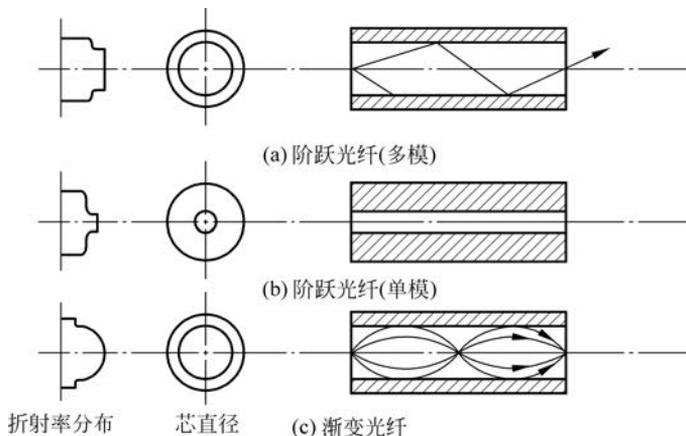


图 5-8 光纤折射率分布

渐变型光纤折射率分布可表示为

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a_0} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad (5-3)$$

式中:  $r$  为纤芯内任意一点到芯轴的距离;  $n_1$  为纤芯轴线处( $r=0$ )折射率;  $a_0$  为纤芯半径;  $\alpha$  为折射率分布指数,通常分布曲线为抛物线,此时  $\alpha=2$ 。

### 5.2.3 光纤的导光原理

#### 1. 光波在两介质交界面的反射和折射

如图 5-9 所示,有两个半无限大的均匀介质,其折射率分别为  $n_1$ 、 $n_2$ ,  $x=0$  的平面为两介质的界面,  $x$  轴为界面的法线。

光射线  $k_1$  方向由介质 I 投射到界面上,这时将发生反射和折射,一部分光波沿方向  $k_1'$  返回介质 I,称为反射波;另一部分光波沿方向  $k_2$  进入到介质 II,称为折射波。

图 5-9 中  $k_1$ 、 $k_1'$ 、 $k_2$  分别表示入射线、反射线和折射线的传输方向,它们和法线之间的夹角分别为入射角、反射角和折射角,用  $\theta_1$ 、 $\theta_1'$  和  $\theta_2$  表示。

由斯涅尔定律可知

$$\theta_1 = \theta_1', \quad n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

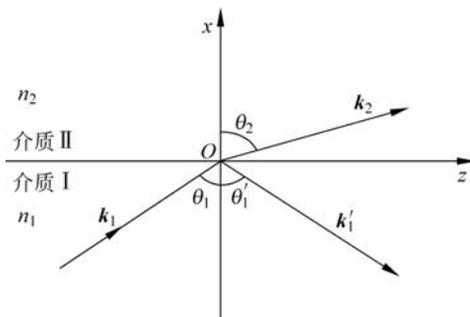


图 5-9 光波在两介质交界面的反射和折射

## 2. 光波的全反射

由图 5-9 可以看出,当光射线由介质 I 射向介质 II 时,若  $n_1 > n_2$ ,则介质 II 中的折射线将离开法线而折射,此时的  $\theta_2 > \theta_1$ 。如果入射角增加到某一值而正好使得  $\theta_2 = 90^\circ$  时,折射线将沿界面传输,此时的入射角称为临界角,用  $\theta_c$  表示。根据折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5-4)$$

将  $\theta_2 = 90^\circ, \theta_1 = \theta_c$ , 代入式(5-4), 可得

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (5-5)$$

这时若继续增大入射角,即  $\theta_1 > \theta_c$ , 则折射角  $\theta_2 > 90^\circ$ , 此时光射线不再进入介质 II, 而由界面全部反射回介质 I, 这种现象称为全反射。

由此可见,产生全反射的条件如下:

- (1) 光纤纤芯的折射率  $n_1$  一定要大于光纤包层的折射率  $n_2$ , 即  $n_1 > n_2$ 。
- (2) 进入光纤的光线向纤芯-包层界面射入时,入射角应大于临界角,即  $90^\circ > \theta_1 > \theta_c$ 。

## 3. 光纤的导光原理

这里以阶跃型光纤为例来介绍光纤的导光情况。当光波射入光纤的纤芯时,一般会出现两种情况:一种是光线在通过轴心的平面内传播,这种光线称为子午线;另一种是光线在光纤中传播时不通过轴心。为了简化分析,下面仅对子午线光线传播过程进行讨论。

由前面分析可知,要使光信号能够在光纤中长距离传输,必须使光线在纤芯和包层交界面上形成全反射,即入射角必须大于临界角。

图 5-10 表示出光线从空气中以入射角射入光纤端面的情况(空气折射率  $n_0 = 1$ , 而纤芯石英折射率  $n_1 = 1.5$ )。此时,光从低折射率介质向高折射率介质传播,根据折射定律,入射角大于折射角。

图 5-10(a)是一种特殊的情况,即进入光纤纤芯中的光射入纤芯与包层界面的入射角等于临界角。由图可知,折射角可以表示为

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_c$$

根据折射定律可得

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_c \right) \quad (5-6)$$

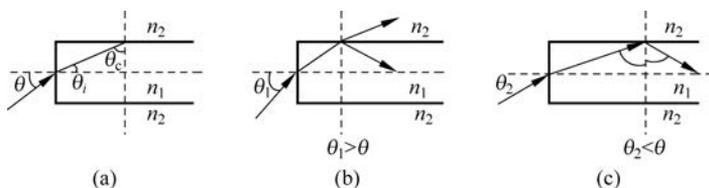


图 5-10 光纤的最大入射角

因为  $n_0 = 1$ , 对式(5-6)进行简单的代数变换, 可得

$$\sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (5-7)$$

当光从空气中射入光纤端面的入射角大于  $\theta$  时, 折射光线射向纤芯与包层界面的入射角应小于临界角, 不能满足全反射条件, 这种光将很快在光纤中衰减, 不能远距离传输, 如图 5-10(b) 所示。

当光从空气中射入光纤端面的入射角小于  $\theta$  时, 折射光线射向纤芯与包层界面的入射角应大于临界角, 满足全反射条件, 这种光就能以全反射的形式在光纤中进行远距离传输, 如图 5-10(c) 所示。

由此可见, 只有端面入射角小于  $\theta$  的光线才在光纤中以全反射的形式向前传播。 $\theta$  称为光纤波导的孔径角。

孔径角通常用  $\theta_{\max}$  表示, 如图 5-11 所示, 将其正弦函数定义为光纤的数值孔径, 用 NA 表示, 即

$$NA = \sin\theta_{\max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (5-8)$$

光纤的数值孔径表示光纤接收入射光的能力。NA 越大, 光纤接收光的能力也越强。NA 越大, 纤芯对光能量的束缚越强, 光纤抗弯曲性能越好。但 NA 越大, 经光纤传输后产生的信号畸变越大, 因而限制信息传输容量。所以要根据实际使用场合选择适当的 NA。作为通信使用的多模光纤波导的  $\Delta$  通常约为 1%, 若  $n_1 = 1.5$ , 则  $NA = 0.2$ 。

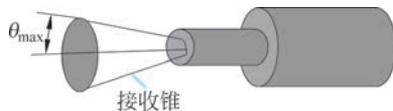


图 5-11 光纤接收锥

以上分析的是光波在阶跃型光纤中的传播情况。对于渐变型光纤, 可以将纤芯分割成无数个同心圆, 每两个圆之间的折射率可以看成是均匀的, 那么光在这种介质中传播时将会不断发生折射, 形成弧线波形的轨迹。

#### 4. 光纤的模式

电磁波在介质中传输满足麦克斯韦方程组, 通过数学推导, 麦克斯韦方程组转换为正弦交变电磁场的亥姆霍兹方程:

$$\Delta^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (5-9)$$

$$\Delta^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (5-10)$$

$$k = \omega \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{\omega}{v} = \frac{n\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5-11)$$

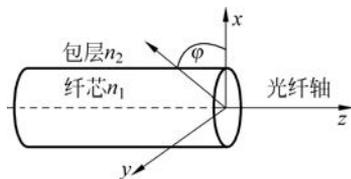


图 5-12 圆柱坐标系

在圆柱坐标系(图 5-12)下分析光纤电磁场传播, 光纤波导中的能量沿着  $z$  方向传播, 其中场随时间的变化为  $\exp(j\omega t)$ , 则电磁场表示为

$$\mathbf{E} = E_0(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (5-12)$$

式中:  $\beta$  为传播常数。

$$\mathbf{H} = H_0(r, \varphi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (5-13)$$

于是,得到电磁场的  $z$  分量的亥姆霍兹方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2 E_z) = 0 \quad (5-14)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2 H_z) = 0 \quad (5-15)$$

这是阶跃光纤中的波动方程。假设光纤中位置  $z$  的电场有如下形式的解:

$$E_z(r, \varphi) = A_0 E(r) E(\varphi) \quad (5-16)$$

$$E(\varphi) = e^{jm\varphi} \quad (5-17)$$

$$E_z(r, \varphi) = A_0 E(r) e^{jm\varphi} \quad (5-18)$$

$E_z$  满足的波动方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) E_z = 0 \quad (5-19)$$

引入无量纲参数  $u$ 、 $w$  和  $\nu_a$ 。 $u$  为横向传输常数:

$$u^2 = a_0^2 (n_1^2 k_0^2 - \beta^2) \quad (5-20)$$

$w$  为横向衰减常数:

$$w^2 = a_0^2 (\beta^2 - n_2^2 k_0^2) \quad (5-21)$$

$\nu_a$  为光纤归一化频率,是光纤的重要参数:

$$\nu_a^2 = u^2 + w^2 = a_0^2 k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (5-22)$$

$u$  和  $w$  决定纤芯和包层横向、 $r$  方向电磁场的分布; $\beta$  决定  $z$  方向电磁场分布和传输性质,是纵向传输常数。利用这三个无量纲参数,可得到两个贝塞尔方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( \frac{u^2}{a_0^2} - \frac{m^2}{r^2} \right) E_z = 0, \quad 0 \leq r \leq a_0 \quad (5-23)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \left( \frac{w^2}{a_0^2} + \frac{m^2}{r^2} \right) E_z = 0, \quad r > a_0 \quad (5-24)$$

纤芯中的场强分布为贝塞尔函数,包层中的场强分布为修正贝塞尔函数。纤芯的电场和磁场分别为

$$E_{z1} = A \frac{J_m(ur/a_0)}{J_m(u)} \quad (5-25)$$

$$H_{z1} = B \frac{J_m(ur/a_0)}{J_m(u)} \quad (5-26)$$

光能量主要在纤芯中传输,在  $r=0$  时,电磁场为有限实数,在包层中,光能量沿径向  $r$  迅速衰减,当  $r$  趋于无穷时,电磁场消失为零。 $m$  为 0、1、2 阶贝塞尔函数如图 5-13 所示。

电磁场强度的切向分量在纤芯包层交界面连续,利用此边界条件,导出  $\beta$  满足的特征方程如下:

$$\left[ \frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{K'_m(\omega)}{\omega K_m(\omega)} \right] \left[ \frac{n_1^2 J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{n_2^2 K'_m(\omega)}{\omega K_m(\omega)} \right] = \frac{\beta^2 m^2}{k_0^2} \left( \frac{1}{u^2} + \frac{1}{\omega^2} \right) \quad (5-27)$$

仔细观察特征方程,发现其中  $u$  与  $\omega$  通过其定义式与  $\beta$  相联系; $m$  是确定贝塞尔函数的参变量, $m$  取不同的值,表示光纤不同的模式。

对于确定的光源和光纤, $n_1$ 、 $n_2$ 、 $a$  和  $\lambda$  给定时,该方程是关于  $\beta$  的一个超越方程。对于确定的参数,可求出  $u$ 、 $\omega$  和  $\nu_a$  的值,进一步可求出  $\beta$  的值。光纤结构参数给定的情况下,光纤中电磁场模式的分布是固定的。

如图 5-14 所示,每一条曲线都相应于一个导模。每一条曲线表示一个传输模式的  $\beta$  随  $\nu_a$  的变化,平行于纵轴的竖线与色散曲线的交点数就是光纤中允许存在的导模数,由交点纵坐标可求出相应导模的传播常数  $\beta$ 。

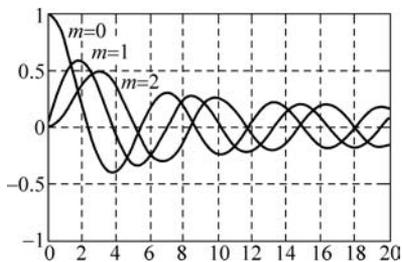


图 5-13  $m$  为 0、1、2 阶的贝塞尔函数

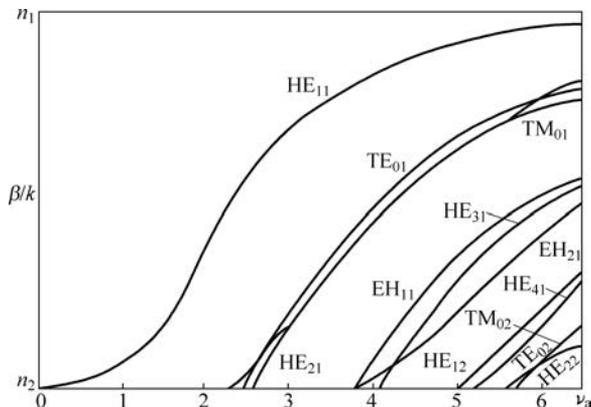


图 5-14 光纤的导模

横坐标  $\nu_a$  称为归一化频率:

$$\nu_a = \frac{2\pi a_0}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5-28)$$

式中:  $\lambda$  为光波波长。

归一化频率  $\nu_a$ , 表征光纤中所能传输的模式数目多少的一个特征参数。波动方程具有许多特征解, 这些特征解可进行排序, 每个特征解称为一个模式, 即一种电磁场的分布形式。

## 5.3 光纤的衰减特性

### 5.3.1 损耗的定义

如图 5-15 所示, 光信号在光纤中传输时, 信号功率会衰减, 传输距离越远, 衰减越严重, 这就是光纤的损耗。



视频

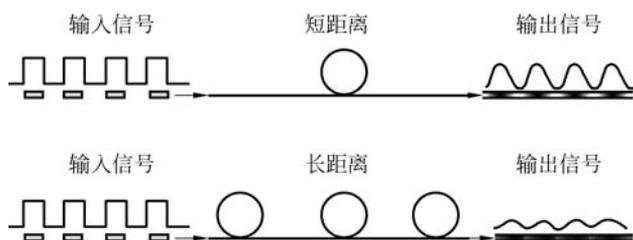


图 5-15 光信号的衰减

### 5.3.2 损耗系数

光纤内传输的光信号功率  $P$  随传输距离  $z$  的变化可表示为

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \quad (5-29)$$

式中:  $\alpha$  为损耗系数。

如图 5-16 所示,已知光纤长度  $L(\text{km})$ ,输入光功率  $P_i$ ,输出光功率  $P_o$ ,那么由式(5-29)可得以下解:

$$P_o = P_i \exp(-\alpha L) \quad (5-30)$$

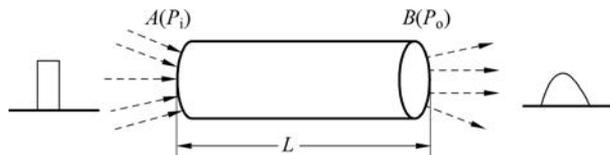


图 5-16 损耗系数的计算

式(5-30)两边同时取对数,可得

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{dB/km}) \quad (5-31)$$

这就是以前采用该方法来定义的微波信号的损耗系数的原因。

### 5.3.3 损耗机理

即使是理想的光纤也存在损耗,这种损耗称为本征损耗。产生光纤损耗的原因主要有光纤材料的吸收、散射性能以及光纤结构不完善(如弯曲、微弯等),如图 5-17 所示。下面主要分析吸收损耗和散射损耗。

#### 5.3.4 吸收损耗

吸收损耗是光波通过光纤材料时有一部分光能变成热能,造成光功率的损失。引起吸收损耗的主要原因有两个:一是材料固有因素引起的本征吸收;二是因材料不纯引起的杂质吸收。

##### 1. 本征吸收

本征吸收由制造光纤材料本身(如  $\text{SiO}_2$ )的特性所决定,即便波导结构非常完美而且



图 5-17 光纤损耗分类

材料不含任何杂质,也存在本征吸收。对于石英系光纤,本征吸收有两个吸收带,分别为紫外吸收带和红外吸收带,如图 5-18 所示。

紫外吸收是光纤材料电子吸收入射光能量跃迁到高能级,同时引起入射光的能量损耗。石英玻璃中电子跃迁产生的吸收峰在紫外区的  $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$  波长附近,它影响的区域很宽,其吸收带的尾部可拖到  $1\ \mu\text{m}$  以上的波长。

红外吸收是光波与光纤晶格相互作用,一部分光波能量传给晶格,使其振动加剧从而引起的损耗,在  $2\ \mu\text{m}$  以上波长段有几个振动吸收峰。

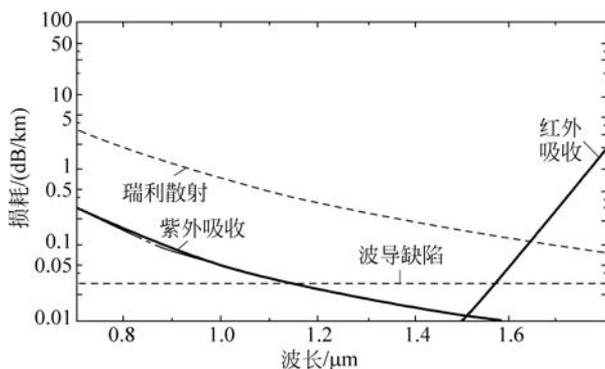


图 5-18 红外吸收和紫外吸收

## 2. 杂质吸收

杂质吸收是由于光纤制造过程引入的有害杂质带来的较强的非本征吸收。光纤内的金属杂质(如 Fe、Cu、V、Mn 等)、 $\text{OH}^-$  离子是造成杂质吸收的主要原因。随着技术水平的提高,已使这些金属杂质的含量低于  $1\ \mu\text{g}/\text{kg}$  以下,基本解决了金属离子的吸收问题。 $\text{OH}^-$  离子的吸收峰在  $0.95\ \mu\text{m}$ 、 $1.24\ \mu\text{m}$  和  $1.38\ \mu\text{m}$  附近,如图 5-19 所示,对长波长光纤的能量损耗最大。当  $\text{OH}^-$  离子的含量降到  $1\ \mu\text{g}/\text{L}$  时,则在  $1.38\ \mu\text{m}$  处的吸收峰为

0.04 dB/km,其尾部影响就更小了。

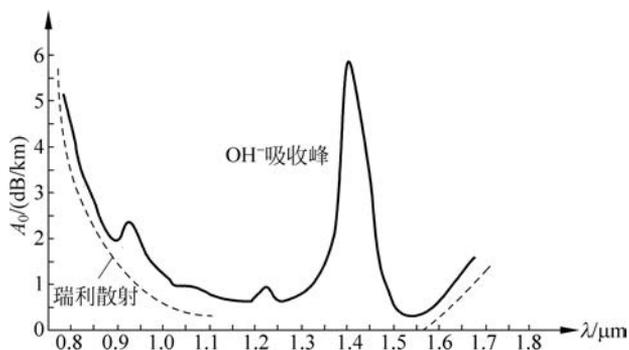


图 5-19  $\text{OH}^-$  的吸收

### 5.3.5 散射损耗

散射是指光通过密度或折射率等不均匀的物质时,除了在光的传播方向以外,在其他方向也可以看到光。一玻璃杯清水,在侧面用手电筒照射,光会透过水杯。一杯有掺杂的浊水情况就不同了,在用手电筒照射时,浊水中将出现亮点,光也不能透射到水杯的另一侧,原因是光受到浊水中悬浮粒子的散射,光将发生严重衰减。

光纤的密度和折射率等不均匀,结构上的不完善,使光纤中传播的光发生散射,由此产生的损耗称为散射损耗,如图 5-20 所示。



图 5-20 光纤中的散射示意图

波导在小于光波长尺度上的不均匀,比如分子密度分布的不均匀,掺杂分子导致的折射率不均匀,导致波导对入射光产生本征散射,称为瑞利散射。瑞利散射的大小与波长的四次方成反比,光波长越短,瑞利散射损耗就越严重,如图 5-21 所示。在短波长 0.85 $\mu\text{m}$  处,瑞利散射损耗的影响最大。

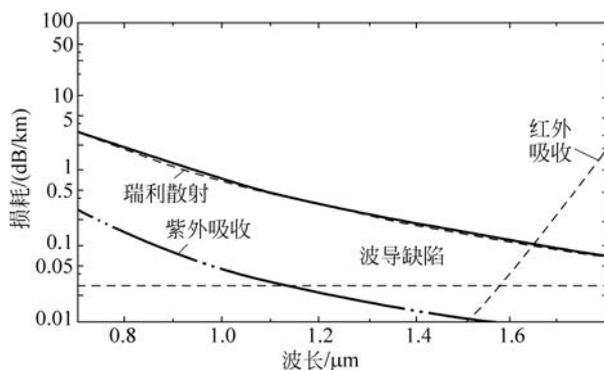


图 5-21 瑞利散射

本征散射和本征吸收一起构成损耗的理论最小值。

### 5.3.6 光纤的损耗谱

不同损耗之和称为光纤的总损耗。光纤总损耗  $\alpha$  与波长  $\lambda$  的关系可以表示为

$$\alpha = A/\lambda^4 + B + CW(\lambda) + IR(\lambda) + UV(\lambda) \quad (5-32)$$

式中： $A$  为瑞利散射系数； $B$  为结构缺陷散射产生的损耗； $CW(\lambda)$ 、 $IR(\lambda)$  和  $UV(\lambda)$  分别为杂质吸收、红外吸收和紫外吸收产生的损耗。总损耗随波长的变化而变化称为光纤的损耗谱。

图 5-22(a) 为多模阶跃型光纤(SIF)、渐变型光纤(GIF)到单模光纤(SMF)的损耗谱，它们的损耗依次减小；图 5-22(b) 为优质单模光纤的损耗谱，在通信波长范围内，它具有更小的损耗系数。

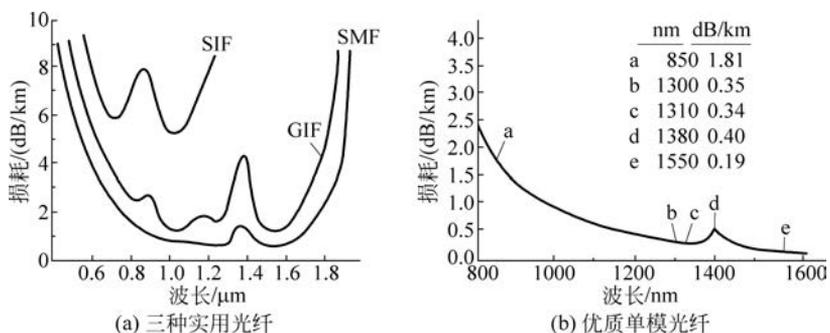


图 5-22 光纤损耗谱

由此可见，损耗特性与光的工作波长有关，存在三个相对较小的损耗区间称为光纤的工作窗口：第一传输窗口在  $0.85\mu\text{m}$  附近，损耗稍大；第二传输窗口在  $1.31\mu\text{m}$  附近，损耗中等；第三传输窗口在  $1.55\mu\text{m}$  附近，损耗最小，如图 5-23 所示。

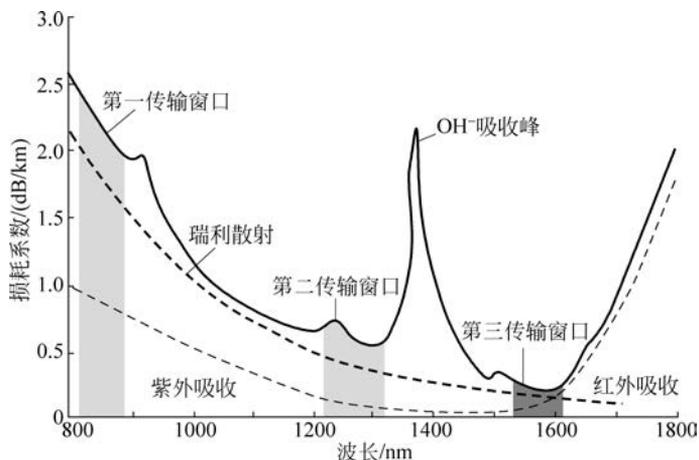


图 5-23 光纤的传输窗口

因此，光子技术使光纤通信从 SIF、GIF 发展到 SMF，从短波长“窗口”发展到长波长

“窗口”,使通信系统性能不断提高。



视频

## 5.4 光纤色散特性

### 5.4.1 色散的定义

光纤的色散是导致传输信号的波形畸变的一种物理现象。光脉冲在光纤中传播时,由于光脉冲信号存在不同频率成分或不同模式,在光纤中传播的途径不同,达到终点的时间也就不同,产生了时延差,互相叠加起来,使信号波形畸变,表现为脉冲展宽。

光纤色散限制了带宽,而带宽又直接影响通信容量和传输速率,因此光纤色散特性也是光纤的另一个重要性能指标。

光纤色散主要有模间色散、材料色散和波导色散。

### 5.4.2 模间色散

不同入射角的光线具有不同的模式,阶跃型光纤中不同光线的传播速度相同,这将使不同路程的光线达到输出端的时间不同,产生脉冲展宽,形成模间色散。

有一条沿纤芯轴线的最短路径,对应于基模;其他路径是折线传播,对应于高阶模。模间色散是指在同一波长的光信号,其不同模式的传播路径长度不同,传播时间不同,因而产生色散。模间色散决定于最大时间差  $\tau_M$ 。

在纤芯与包层界面上,当入射角大于全反射临界角  $\theta_c$  时,才发生全反射。光纤中只有大于光纤的全反射临界角范围内的模式光线,才能在光纤内传播。如图 5-24 所示,光线 1 是平行光纤轴直线传播的基模;光线 2 对应全反射截止角,是折线传播的最长路径,对应于最高阶模。

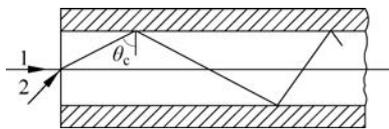


图 5-24 模间色散解释原理图

光在光纤中的传播速度  $v=c/n_1$ ,其中  $n_1$  为纤芯折射率, $c$  为真空中的光速。光线 1 经过长度为  $L$  的光纤到达终端的时间为

$$t_1 = \frac{L}{c/n_1} \quad (5-33)$$

光线 2 是折线,处于一个直角三角形的斜边,长度为  $L/\sin\theta_c$ ,那么经过长度为  $L$  的光纤到达终端的时间为

$$t_2 = \frac{L/\sin\theta_c}{c/n_1} \quad (5-34)$$

故可求得光线 2 和光线 1 通过长度为  $L$  的光纤后的最大时间差为

$$\tau_M = t_2 - t_1 = \frac{L/\sin\theta_c}{c/n_1} - \frac{L}{c/n_1} = \frac{n_1 \Delta}{c} L \quad (5-35)$$

对于  $\Delta=1\%$ ,  $n_1=1.5$ ,  $L=1\text{km}$  的石英光纤,光纤的模间色散  $\tau_M=50\text{ns}$ 。可见,阶跃型光纤的模间色散是很严重的。

### 5.4.3 材料色散

频谱宽度用于表示光源的单色性。图 5-25 是三种光源的光谱图,典型发光管(LED)的谱线宽度  $\Delta\lambda \approx 50\text{nm}$ ,多模激光器(LD)的谱线宽度  $\Delta\lambda \approx 5\text{nm}$ ,单模激光器的谱线宽度  $\Delta\lambda < 0.02\text{nm}$ 。

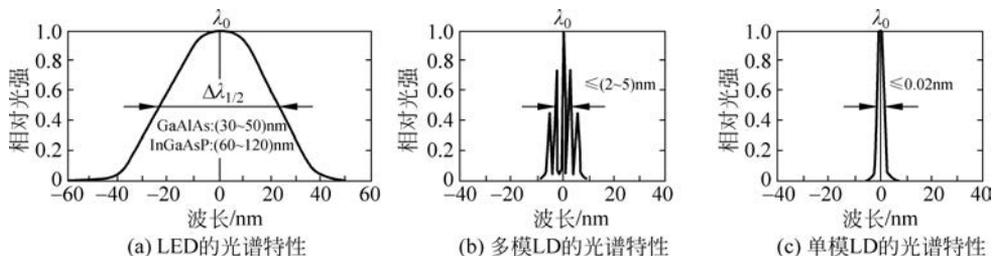


图 5-25 典型的光源光谱图

由此可见,单色性最好的激光都不是单一波长,总是占据一定的频谱宽度。光纤材料的折射率随波长而非线性变化。图 5-26 为掺  $\text{GeO}_2$  的光纤折射率与波长关系。由图可见,波长增加,折射率减少,而  $n=c/v$ ,因此光的传输速度  $v$  随波长的增加而变大。即使是同一模式,如果波长不同,光波传播速度不同,产生脉冲展宽,引起材料色散。

材料色散引起的脉冲展宽可用表示为

$$\tau_M = D_m L (\Delta\lambda) \quad (5-36)$$

式中:  $L$  为光纤长度;  $\Delta\lambda$  为光源半幅值谱线宽度;  $D_m$  为光纤材料色散系数。

### 5.4.4 波导色散

光纤的纤芯与包层的折射率差很小,在界面产生反射时,可能有一部分光进入包层之内。进入包层内的这部分的光强大小与光波长有关,入射光的波长越长,进入包层中的光强比例就越大,如图 5-27 所示。



图 5-27 波导色散

因此称为波导色散。

波导色散引起的脉冲展宽可表示为

$$\tau_w = D_w L (\Delta\lambda) \quad (5-37)$$

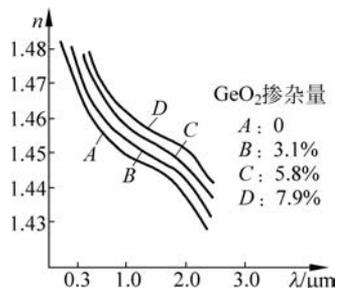


图 5-26 掺  $\text{GeO}_2$  的光纤折射率与波长关系

这部分光在包层内传输一定距离后,又可能回到纤芯中继续传输。由于纤芯的折射率大于包层的折射率,光在纤芯中传播的速度小,更慢到达接收端,在包层中传播光的速度快,更快到达接收端,由此引起色散现象。这种色散是光纤特有的波导结构引起的,

式中： $D_w$  为光纤波导色散系数。

### 5.4.5 三种色散的比较

一般来说,光纤三种色散的大小顺序是模间色散>材料色散>波导色散。

上述三种色散的总色散可表示为

$$\tau = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_m^2 + \tau_w^2} \quad (5-38)$$

对于多模光纤,模间色散和材料色散是主要的,其总色散为

$$\tau = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_m^2} \quad (5-39)$$

对于单模光纤,只传单一基模,只有材料色散和波导色散,总色散为

$$\tau = \sqrt{\tau_w^2 + \tau_m^2} \quad (5-40)$$

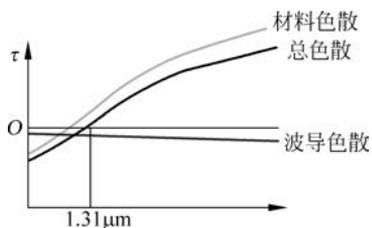


图 5-28 单模光纤色散随波长的变化

材料色散和波导色散都因光源不是单一频率引起的,所以光源的谱线宽度对单模光纤的影响很大。

单模光纤色散随波长的变化如图 5-28 所示。对于  $\text{SiO}_2$  单模光纤,在  $1.31\mu\text{m}$  波长附近,材料色散和波导色散的大小相等、符号相反,两者正好抵消,使单模光纤的总的色散为零,该波长就成为普通单模光纤的零色散波长。

### 5.4.6 光纤的带宽

通常把调制信号经过光纤传输后,光功率下降一半时的频率  $f_c$  定义为光纤的带宽  $B$ 。

如图 5-29 所示,假定输入光脉冲为高斯型,那么输出光脉冲因色散而展宽后仍为高斯型,图中  $\tau$  为高斯型脉冲波的半高全宽,即  $g(t)/g(0) = 1/2$  时的全宽,即光功率降低一半时的色散。

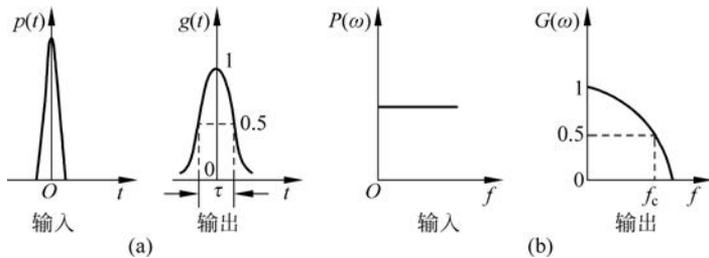


图 5-29 光纤带宽频域响应( $f$  为信号的频率)

经过高斯型函数傅里叶变换,可得光纤带宽为

$$B = f_c = \frac{0.44}{\tau} \quad (5-41)$$

采用式(5-41)可估计光纤的带宽。

**【例 5-1】** 设已知单模光纤色散系数为  $6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,而光源谱线宽为  $3\text{nm}$ ,求光

纤带宽。

$$\text{解: } \tau = 6 \times 3 \times 10^{-12} = 18 \times 10^{-12} \text{ (s/km)}$$

$$B = f_c = \frac{0.44}{18 \times 10^{-12}} \text{ (Hz} \cdot \text{km)} = 24.44 \text{ (GHz} \cdot \text{km)}$$

### 5.4.7 光纤的非线性特性

光纤的非线性可以分为受激散射效应和折射率扰动。受激散射效应是光通过光纤介质时,有一部分能量偏离预定的传播方向,且光波的频率发生改变。受激散射效应有受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)两种形式。它们都可以理解为一个高能量的光子被散射成一个低能量的光子,同时产生一个能量为两个光子能量差的另一个量子。SBS和SRS都使得入射光能量降低,在光纤中形成一种损耗机制。在较低光功率下,这些散射可以忽略;当入射光功率超过一定阈值后,受激散射效应随入射光功率呈指数增加。

在入射光功率较低情况下,认为石英光纤的折射率和光功率无关;但是,在较高光功率下应考虑光强度引起的光纤折射率的变化,它们的关系为

$$n = n_0 + n_2 P / A_{\text{eff}} \quad (5-42)$$

式中:  $n_0$  为线性折射率;  $n_2$  为非线性折射率;  $P$  为入射光功率;  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效面积。

折射率扰动主要引起自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)和光孤子形成四种非线性效应。

SPM是指光在光纤中传输时光信号强度随时间的变化对自身相位的作用,它导致光脉冲频谱展宽,引起光脉冲的频率啁啾。由SPM引起的啁啾通过群速度色散来影响脉冲形状并常常导致脉冲展宽。

XPM是任一波长信号的相位受其他波长信号强度起伏的调制,会使信号脉冲谱展宽。在采用波分复用(WDM)技术的系统中,光纤同时传输多个信道时会产生XPM现象。

FWM是源于折射率的光致调制的参量过程。一个或几个光波的光子被湮灭,同时产生几个不同频率的新光子。FWM大致分为两种情况:一种情况是三个光子合成一个光子,新光子的频率为  $W_4 = W_1 + W_2 + W_3$ ; 另一种情况为  $W_1 + W_2 = W_3 + W_4$ 。如果FWM产生的新的频率成分落到WDM信道,则会引起复用信道间的串扰。

光孤子形成来源于非线性折射率和色散间的相互作用,当光纤中的非线性效应和色散相互平衡时,可以形成光孤子。光孤子脉冲可以在长距离传输过程中保持形状和脉宽不变。

## 5.5 半导体激光器和光发射机



视频

### 5.5.1 半导体激光原理

#### 1. 光的自发发射和受激吸收

电子从高能态自发地跃迁到低能态,同时发射出光的现象,称为自发发射(图5-30)。

光的自发发射完全由原子系统决定。

处于低能级  $E_1$  的原子受到外来光子的激励下,在满足能量恰好等于低、高两能级之差  $\Delta E$  时,该原子就吸收这部分能量,跃迁到高能级  $E_2$  (图 5-31),称为受激吸收。

### 2. 光的受激发射

电子从高能态受到光的激发而跃迁到低能态,同时发射与激发光的传播方向、相位和偏振方向相同的光,称为受激吸收,如图 5-32 所示。其条件是入射光子的能量等于高低能态之差。光的受激发射由原子系统与入射光信号决定,与入射光同态,属于相干光,它可以实现光放大。

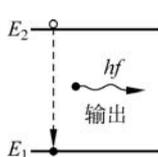


图 5-30 光的自发发射

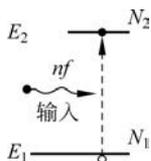


图 5-31 受激吸收

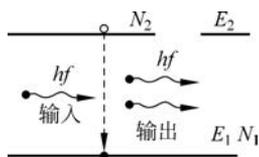


图 5-32 光的受激吸收

### 3. 半导体激光器

激光产生需要工作物质、泵浦源和谐振腔,那么怎么满足半导体激光器这三个条件?

#### 1) 工作物质

工作物质就是 PN 结。当 P 型半导体和 N 型半导体有机地结合在一起时,由于扩散和漂移,会产生空间电荷区,就称为 PN 结。它是半导体激光器的工作物质,如图 5-33 所示,在空间电荷区形成扭折能级图,热平衡时 PN 结形成统一的费米能级  $E_f$ ,势垒  $eV_0$  阻止载流子进一步扩散,此时可以认为载流子处于基态。

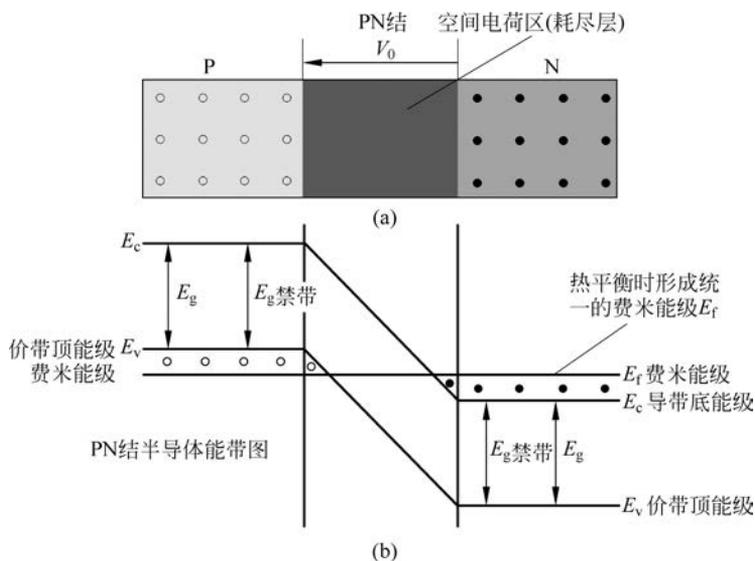


图 5-33 PN 结和扭折能级图

#### 2) 泵浦源

对比图 5-34(a)和(b),可以观察到,在 PN 结上加上正向电压后,形成两个不同的费

米能级  $E_f$ , 势垒  $eV_0$  降低。N 型区的电子及 P 型区的空穴流向 PN 结区, 这两个费米能级处于相对稳定的状态, 载流子处于激光态, 就是亚稳态。

当注入的电流增加到一定值后, 导带的电子数目大于价带的空穴数目, 这时有自发辐射, 也有受激辐射, 而受激发射占主导地位, 此时的 PN 结区成为对光场有放大作用的区域, 也称为有源区。

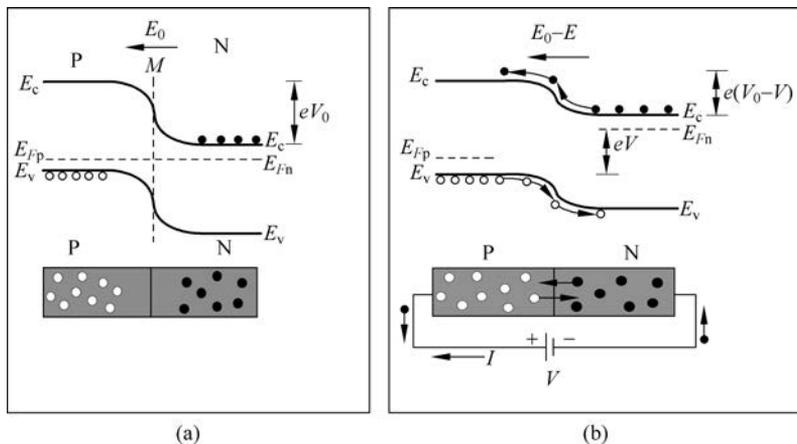


图 5-34 工作物质和泵浦源

半导体材料在通常状态下总是导带的电子数小于价带的空穴数, 因此称导带的电子数大于价带的空穴数的状态为粒子数反转。在 PN 结持续加上的正向电压就是泵浦源, 它使有源区持续产生足够多的粒子数反转, 这就满足了产生激光的两个条件。

### 3) 谐振腔

有源区里实现了粒子数反转, 并保持相对稳定后, 受激发射占据了主导地位; 但是, 激光器初始的光场来源于导带和价带的自发辐射, 频谱较宽, 方向也杂乱无章。为了产生单色性和方向性好的激光, 必须使用谐振腔。如图 5-35 所示, 基本的光学谐振腔由置于自由空间的两块平行的镜面  $M_1$  和  $M_2$  组成。光波在  $M_1$  和  $M_2$  间反射, 导致这些波在空腔内相长和相消。类似于绳子产生驻波, 如图 5-36 所示。

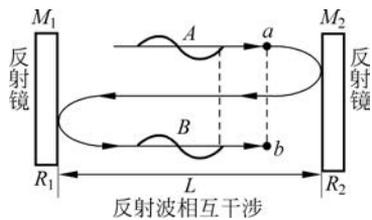


图 5-35 谐振腔

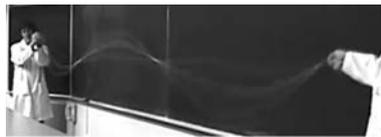


图 5-36 绳子产生驻波

从  $M_2$  反射的光向左传输时和从  $M_1$  反射的光向右传输的光干涉, 在空腔内产生了一系列稳定不变的电磁波, 这也是驻波。

按照驻波条件, 镜面上的电场必为零, 所以谐振腔的长度是半波长的整数倍, 表示为

$$m \left( \frac{\lambda}{2} \right) = L \quad (5-43)$$

式中： $m=1,2,3,\dots$ ，此处的  $m$  的某个取值对应一个纵模。

由此可见，半导体激光器满足产生激光的三个条件，因此就产生了激光，如图 5-37 所示。

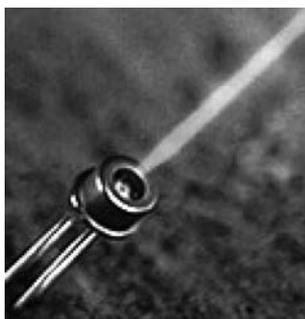


图 5-37 LD 产生激光

### 5.5.2 LD 的特性

#### 1. $P-I$ 特性

对 GaAs 激光器的测试表明，当驱动电流低于 10mA 时输出的激光光谱较宽，而驱动电流高于 10mA 时输出的激光光谱较窄。因此，LD 激光器具有明显的阈值特性。

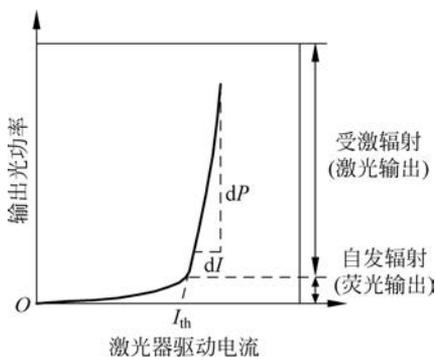


图 5-38 LD 激光器  $P-I$  特性

$P-I$  特性揭示了 LD 输出光功率与注入电流之间变化规律。如图 5-38 所示，从  $P-I$  特性曲线中明显看到，当注入电流超过阈值后，随着注入电流强度增加，输出光功率线性增加。这是 LD 非常重要的特性，是调制技术的理论基础。

#### 2. 输出的光谱特性

短波长 GaAlAs 激光器的光谱特性如图 5-39 所示，它只有一根谱线，称为单纵模；而有些激光器的谱线如图 5-40 所示，它具有几根谱线，称为多纵模。以前分析过光纤色散问题，为了减少材料色散和波导色散，最好选择谱宽较小的单纵模激光器。

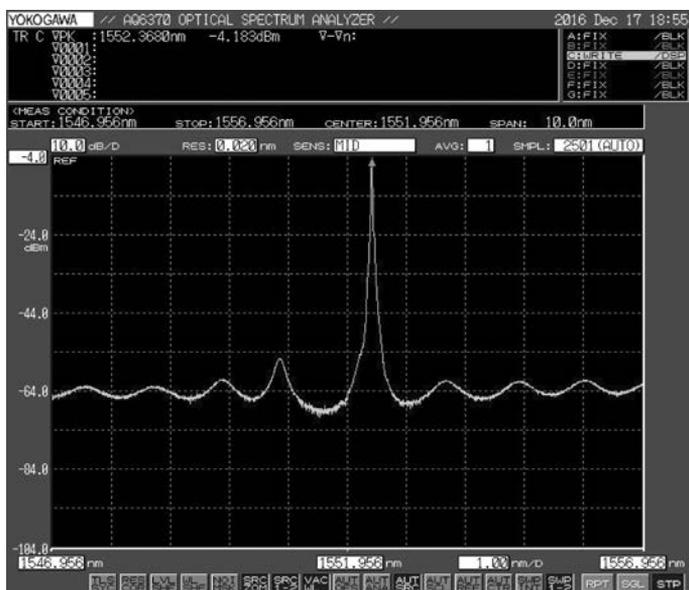


图 5-39 短波长 GaAlAs LD 的光谱特性

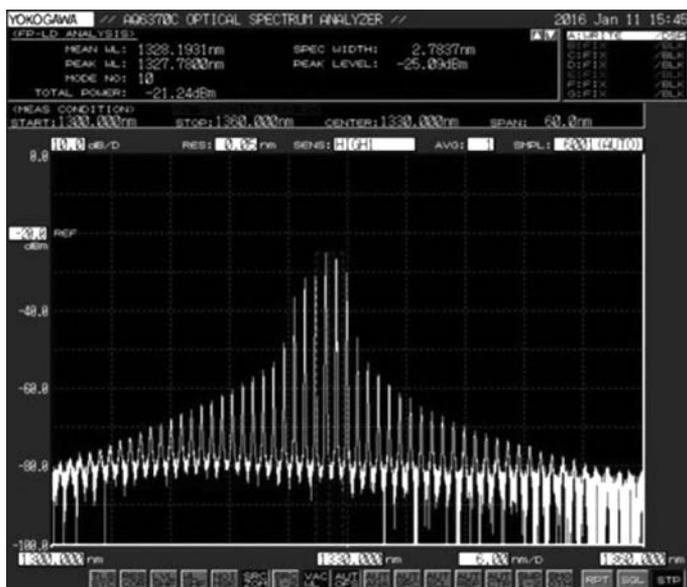


图 5-40 GsAs 激光器的发射光谱

### 3. LD 的温度特性

LD 温度特性如图 5-41 所示。半导体激光器阈值电流随温度增加而加大,尤其是长波长波段的 InGaAsP 激光器。因此,半导体激光器工作时需要进行温度控制。

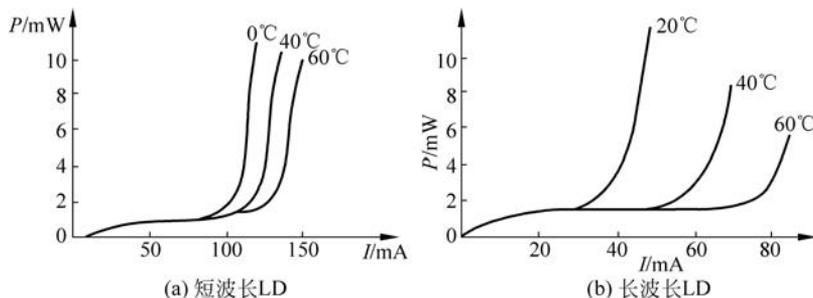


图 5-41 LD 温度特性

### 5.5.3 光调制技术

在光纤通信系统中,把随消息变化的电信号加到光载波上,使光载波按消息的变化而变化,这就是光波的调制。光调制技术包括:直接调制技术,调制信号调制激光器驱动电源,控制光信号输出;外调制技术,作用于激光器输出的光信号,利用晶体的电光、磁光、声光效应对光信号进行调制。

在阈值以上,LD 的输出光功率基本上与注入电流强度成正比,电流的变化转换为光频的变化呈线性,因此可以采用直接调制方法,如图 5-42 所示。

以前 LD 光源的频谱不纯,频率也不稳定,使调频或调相方式难以实现,实用系统采取直接强度调制(IM)的方法。

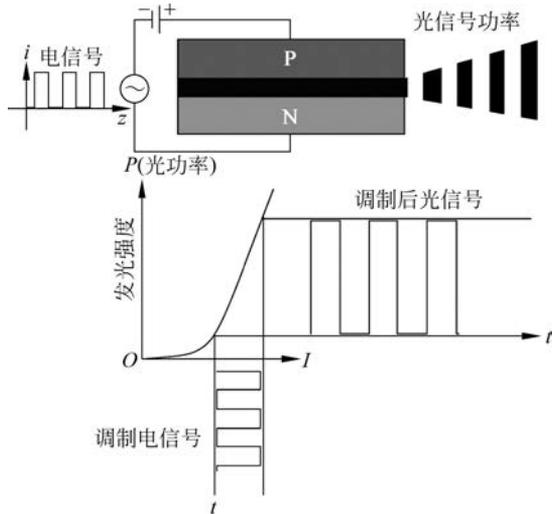


图 5-42 LD 数字直接调制

经调制后的光功率信号耦合入光纤,经光纤传输后,光接收机的光电检测器采用直接检测(DD)方式将光信号变换成电信号,再经放大、解调(或解码)后还原为原信号输出。这种光纤通信系统称为强度调制(ID)/直接检测光纤通信系统。

光源采用直接调制方式时,由于带宽受半导体光源的振荡频率限制和存在光源啁啾效应,使得在 2.5Gb/s 以上的高速率光纤通信系统中,必须使用外调制。马赫-曾德尔调制器(MZM)是一种较常用的外调制器。采用 MZM 可实现相位调制,强度调制和 IQ 调制。

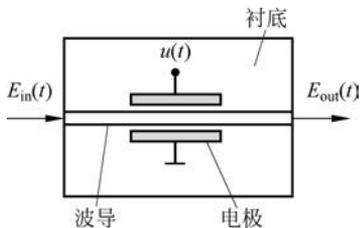


图 5-43 采用 MZM 的相位调制器的基本结构

采用 MZM 的相位调制器的基本结构如图 5-43 所示,其相位变化为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}}(t) l_{\text{el}} \quad (5-44)$$

式中:  $\Delta n_{\text{eff}}$  为折射率变化;  $l_{\text{el}}$  为波导长度;  $\varphi$  与  $u(t)$  成正比。

相位调制器的传递函数为

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}}(t) e^{j\varphi(t)} = E_{\text{in}}(t) e^{j \frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi} \quad (5-45)$$

衡量相位调制的一个关键指标半波电压  $V_{\pi}$  (相位改变  $\pi$  需要的电压值),半波电压越低,表明效率越高。

基于 MZM 的强度调制器基本结构如图 5-44 所示。

其相位变化为

$$\varphi_1 = \frac{u_1(t)}{V_{\pi 1}} \pi, \quad \varphi_2 = \frac{u_2(t)}{V_{\pi 2}} \pi \quad (5-46)$$

传递函数为

$$\frac{E_{\text{out}}(t)}{E_{\text{in}}(t)} = \frac{1}{2} (e^{j\varphi_1(t)} + e^{j\varphi_2(t)}) \quad (5-47)$$

IQ 调制器可以看作相位调制器和强度调制器的结合,在 QAM 等高阶调制格式中运用广泛,其基本结构如图 5-45 所示。

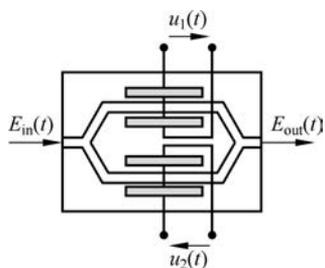


图 5-44 基于 MZM 的强度调制器基本结构

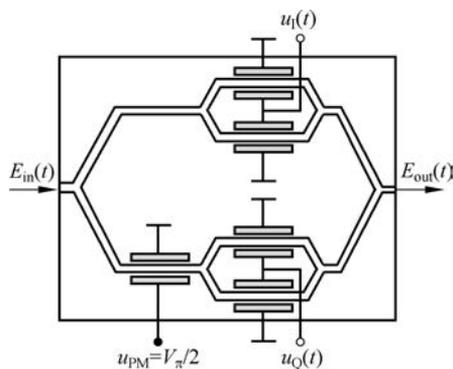


图 5-45 基于 MZM 的 IQ 调制器基本结构

其相位变化为

$$\varphi_I = \frac{u_I(t)}{V_\pi} \pi, \quad \varphi_Q = \frac{u_Q(t)}{V_\pi} \pi \quad (5-48)$$

传递函数为

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\varphi_I(t)}{2}\right) + j \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\varphi_Q(t)}{2}\right) \quad (5-49)$$

外调制技术一般用在光的相干通信系统。

#### 5.5.4 光发射机

光发射机由信道编码电路、光源及光源驱动与调制电路三部分组成。其实物与原理框图如图 5-46 所示。

##### 1. 信道编码电路

信道编码电路的功能是对基带信号的波形和码型进行转换,使其适于光纤信道传输。

(1) **均衡器**: 由 PCM 端机送来的 HDB3(三阶高密度双极性码)或 CMI(传号反转码)码流,首先需要经过均衡,用于补偿由电缆传输产生的衰减和畸变,以便正确译码。

(2) **码型变换**: 由均衡器输出的是 HDB3 或 CMI 码, HDB3 码是三值双极性码(即 +1、0、-1), CMI 码是归零码。由于光源不能发射负脉冲,因此要通过码型变换电路,将其变换成适合于光纤传输的单极性的非归零的 0、1 码(NRZ 码)。

(3) **扰码**: 若信息码流中出现长连 0 和长连 1 的情况,将会给时钟信号的提取带来困难。为了避免出现这种情况,需要附加一个扰码器,将原始的二进制码序列加以变换,使之达到 0、1 等概率出现。相应地,在光接收机的判决器后加一个解扰器,以恢复原始序列。

扰码改变了 1 码与 0 码的分布,从而改善了码流的一些特性。

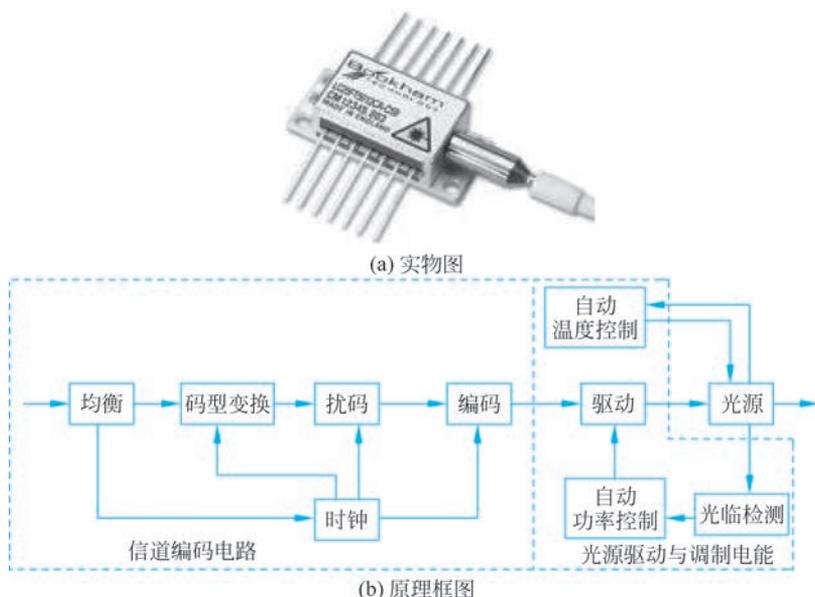


图 5-46 光发射机实物与原理框图

比如,扰码前: 1100000001000...

扰码后: 1101110110011...

(4) **编码**: 经过扰码后的码流,尽量使 1、0 的个数均等,便于接收机提取时钟信号,但扰码后的码流仍具有一些缺点,如没有引入冗余,不能进行在线误码检测,信号频谱中接近直流的分量较大,不能解决直流分量的波动等问题。因此,在实际的光纤通信系统中,对扰码后的码流再进行信道编码,以便满足光纤通信对线路码型的要求。

(5) **时钟提取**: 由于码型变换、扰码和编码的过程都需要以时钟信号为依据,因此在均衡电路之后,由时钟提取电路提取时钟信号,供码型变换、扰码和解码电路使用。

## 2. 光源及光源驱动与调制电路

光源驱动电路功能是将电信号转换成光信号,并将光信号送入光纤。

(1) **光源驱动电路**: 经过编码以后的数字信号控制光源发光的驱动电流。若驱动电流为 0(信码为 0)则不发光,若驱动电流为预先规定的值(信码为 1)则发光,从而完成了电/光转换任务。

(2) **自动光输出功率控制电路**: 由于光源经过一段时间使用将出现老化,使输出光功率降低,另外,激光器的光输出功率随温度的变化而变化,因此为了使光源的输出功率稳定,在实际使用的光发射机中常使用自动功率控制(APC)电路。它一方面使光输出功率保持稳定,另一方面防止光源因电流过大而损坏。

(3) **自动温度控制电路**: 对激光二极管而言,结温升高时光输出功率会明显下降,在 APC 电路的作用下控制发光的驱动电流就会自动增加,使得结温进一步升高,这样就造成恶性循环,从而导致激光二极管损坏,所以在光发射电路中使用自动温度控制(ATC)电路来控制光源的温度。

## 5.6 光电探测技术

## 5.6.1 光接收机

光接收机由光电检测器、光信号接收电路及信道解码电路三部分组成。其实物与原理框图如图 5-47 所示。它的作用就是检测经过远距离传输后到达的微弱光信号,并进行放大、整形、再生,还原成原来的输入信号。它的主要器件是把光信号转变为电信号的光电检测器,也就是光电二极管。



视频

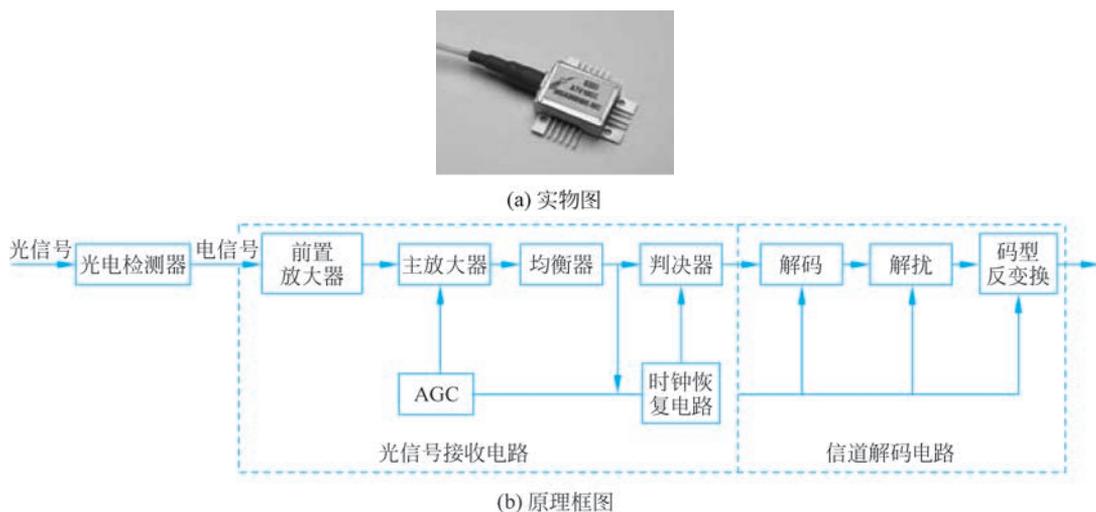


图 5-47 光接收机实物与原理框图

## 1. 光信号接收电路

(1) **前置放大器**: 由于从光电检测器出来的电信号非常微弱,在对其进行放大时要经过多级放大器进行放大。第一级放大必须考虑抑制放大器的内部噪声,因此它必须是低噪声、高增益的低噪声放大器,一般输出为毫伏数量级。

(2) **主放大器**: 将低噪声放大器输出的信号电平放大到判决电路所需要的信号电平。另外,它还必须具有增益可调的功能。当光电检测器输出的信号出现起伏时,通过光接收机的自动增益控制电路对主放大器的增益进行调整,使主放大器的输出信号幅度在一定范围内不受输入信号的影响。一般输出电平的峰-峰值是几伏的数量级。

(3) **均衡器**: 经过均衡器,补偿由光缆传输光电转换与放大后产生的衰减和畸变,使输出信号的波形适合于判决,以消除码间干扰,减少误码率。

(4) **判决器和时钟恢复电路**: 判决器由判决电路和码形成电路构成。判决器和时钟恢复电路合起来构成脉冲再生电路,其作用是将均衡器输出的信号恢复为 0 或 1 的数字信号。

(5) **自动增益控制电路**: 光接收机的自动增益控制(AGC)电路是主放大器的反馈环路,当信号强时,通过反馈环路使主放大器的增益降低;当信号弱时,通过反馈环路使主

放大器的增益提高,从而使送到判决器的信号稳定,有利于判决。显然,自动增益控制电路的作用是增加了光接收机的动态范围。

## 2. 信道解码电路

信道解码电路是与发送端的信道编码电路相对应的,由解码、解扰和码型反变换电路组成。

因为光发射机输出的信号是经过码型变换、扰码和编码处理的,这种信号经过光纤传输到接收机后,必须由信道解码电路对信号进行一系列的“复原”处理,将它恢复成原始信号才能送入 PCM 系统。

## 5.6.2 光电二极管

光电二极管的工作原理如图 5-48 所示,通过外电路对 PN 结施加反向偏压。

当 PN 结加反向偏压时,外加电场方向与 PN 结的内建电场方向一致,势垒加强,在 PN 结界面附近载流子基本上耗尽,形成耗尽区(图 5-49)。当光束入射到 PN 结上,且光子能量  $hf$  大于半导体材料的带隙  $E_g$  时,价带上的电子吸收光子能量跃迁到导带上,发生受激吸收,形成一个电子-空穴对。在耗尽区,在较高的电场作用下电子向 N 区漂移,空穴向 P 区漂移。如果 PN 结外电路构成回路,就会形成光电流。当入射光功率变化时,光电流强度也随之线性变化,从而把光信号转换成电信号,实现光到电的转化。

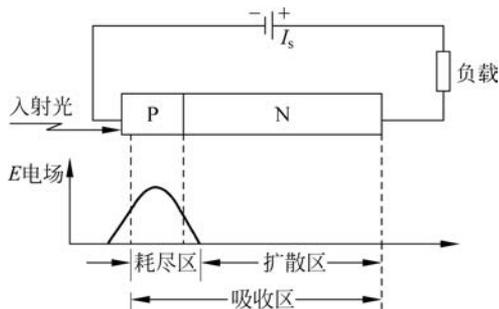


图 5-48 光电二极管的工作原理

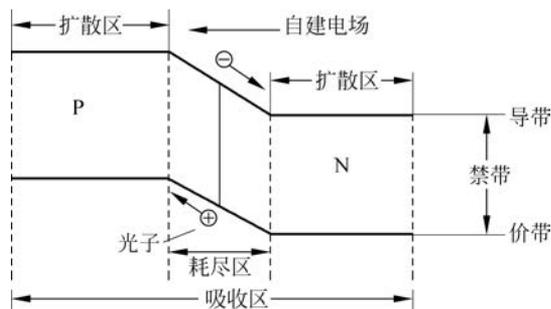


图 5-49 加反向电压后的 PN 结

## 5.6.3 PIN 光电二极管

如果在光电二极管的 PN 结中间掺入一层浓度很低的 N 型半导体,就可以增大耗尽区的宽度。由于这一掺入层的掺杂浓度低,近乎本征半导体,故称 I 层,因此这种结构称为 PIN 光电二极管,如图 5-50 所示。

PIN 管的 I 层较厚,几乎占据了整个耗尽区。绝大部分的入射光在 I 层内被吸收并产生大量的电子-空穴对;在 I 层两侧是掺杂浓度很高的 P 型和 N 型半导体,P 层和 N 层很薄,吸收入射光的比例很小。因而,光生电流中漂移分量占了主导地位,扩散的影响大大降低,这就加快了响应速度。

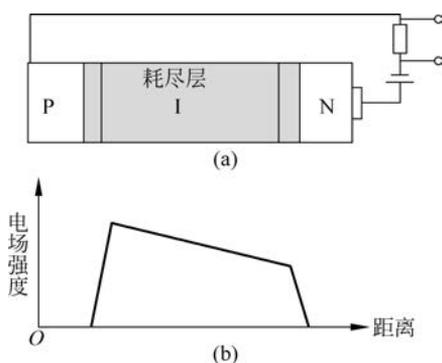


图 5-50 PIN 二极管的工作原理

### 5.6.4 雪崩光电二极管

如果在 PN 结施加更高反向偏压,使耗尽层中光生载流子受到更强电场的加速作用,载流子获得足够高的动能,它们与晶格碰撞电离产生新的电子-空穴对,这些载流子又不断引起新的碰撞电离,造成载流子的雪崩倍增,得到电流增益,这就是雪崩光电二极管 (APD),如图 5-51 所示。

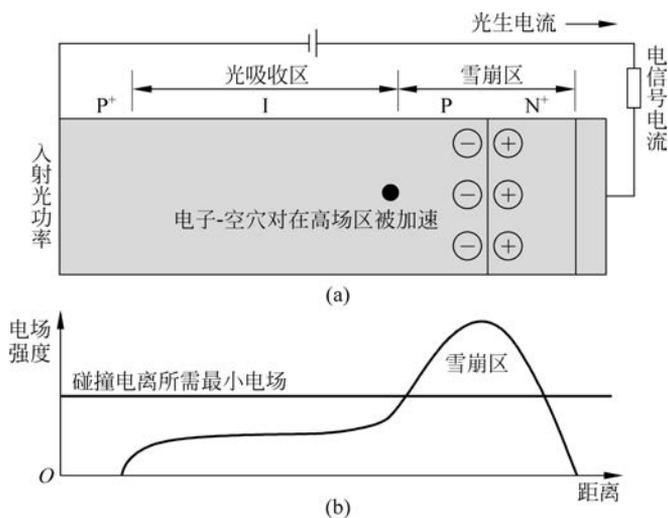


图 5-51 APD 工作原理示意图

### 5.6.5 光电检测器的特性

衡量光电检测器 PIN 和 APD 性能的主要有以下四个技术指标。

#### 1. 响应度

响应度是描述器件光电转换能力的一种物理量,定义为

$$R_0 = \frac{I_p}{P_o} \quad (\text{A/W}) \quad (5-50)$$

式中： $I_p$  为光电检测器的平均输出电流； $P_o$  为光电检测器的平均输出光功率。

### 2. 响应特性

响应特性是指光电二极管产生的光电流跟随入射光信号变化的能力，一般用脉冲响应时间来表示。脉冲响应时间可以是脉冲上升时间或脉冲下降时间。把光生电流脉冲前沿由最大幅度的 10% 上升到 90% 的时间定义为脉冲上升时间；而把光生电流脉冲后沿由最大幅度的 90% 下降到 10% 的时间定义为脉冲下降时间。

响应时间主要取决于半导体光电二极管的结电容、光生载流子在耗尽区内的渡越时间和耗尽层外载流子扩散引起的延迟。显然，一个快速响应的光电检测器，它的响应时间一定是短的。

### 3. 暗电流

暗电流是指没有光入射时的反向电流。暗电流主要包括反向饱和电流、在耗尽层内产生的复合电流以及表面漏电流等。

由于暗电流直接引起光接收机噪声增大，因此器件的暗电流越小越好。

### 4. 雪崩倍增因子

雪崩倍增因子是描述 APD 发光二极管的倍增程度，定义为

$$G = \frac{I}{I_p} \quad (5-51)$$

式中： $I$  为雪崩时的光电流； $I_p$  为无雪崩倍增的光电流。

APD 的雪崩倍增因子已达到几十甚至上百，它随反向偏压、光波长和温度而变化。



视频

## 5.7 掺铒光纤放大器

在光纤通信中，采用中继器来补偿光能的衰减，恢复信号脉冲的形状。在光中继器中最重要的是放大器。光放大器出现前，中继器采用光—电—光变换方式，装置复杂、耗能多，而且不能同时放大多个波长信道。

1987 年，英国和美国同时报道了将稀土元素铒掺入光纤中可实现  $1.55\mu\text{m}$  波段的光增益，掺铒光纤放大器(EDFA, 图 5-52)取得突破性进展。



图 5-52 EDFA 实物图

EDFA 的典型结构如图 5-53 所示，EDFA 工作波长为  $1.55\mu\text{m}$ ，它包括光路结构和辅助电路部分。光路部分由掺铒光纤、泵浦光源(其目的是输入能量给工作物质，使低能级粒子跃迁到高能级，可运用 980 或 1480nm 的半导体激光源)、光耦合器、光隔离器等组成，辅助电路主要有电源、自动控制部分和保护电路。

掺铒光纤是 EDFA 的核心元件，它以单模石英光纤作为基质材料，在其纤芯中掺入一定比例的稀土元素铒离子。

EDFA 放大激光的过程与激光产生的过程有些类似。图 5-54 是铒离子的能级图，可简化为基态、亚稳态和泵浦态三能级结构。基态为  $^4I_{15/2}$ ，亚稳态为  $^4I_{13/2}$ ，在亚稳态上粒

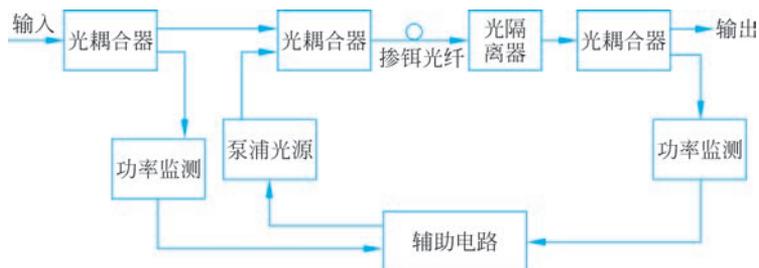


图 5-53 EDFA 的典型结构

子的平均寿命时间达到  $10\text{ms}$ ，泵浦态为  ${}^4\text{I}_{11/2}$ ，粒子在泵浦态上的寿命为  $1\mu\text{s}$ 。由于铒离子在亚稳态上的寿命很短，很快以无辐射的形式跃迁到亚稳态，从而在亚稳态和基态之间形成粒子数反转分布，如图 5-55 所示。可见，铒离子是工作物质。

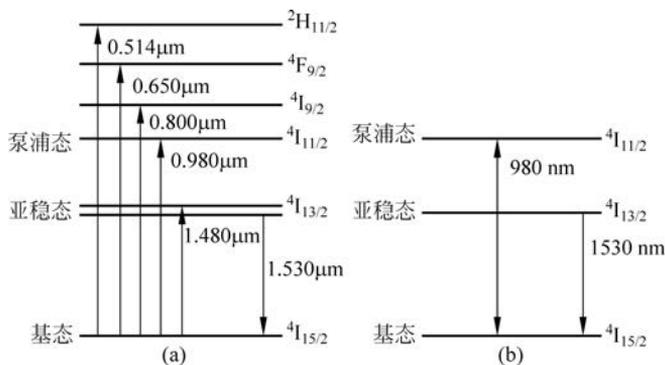
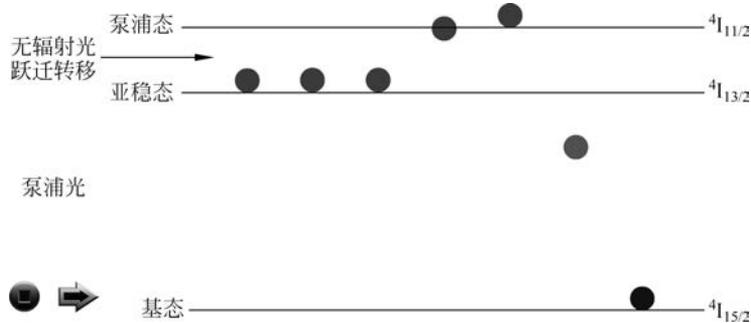


图 5-54 铒离子的能级图

EDFA 中的泵浦源一般采用  $980\text{nm}$  的 LED 光源，它把处于低能级的铒离子被提升到高能级上。可见，泵浦源也有了。

图 5-55  $\text{Er}^{3+}$  在泵浦光作用下的反转分布

当  $1.55\mu\text{m}$  波段的光信号通过这段掺铒光纤时，亚稳态的铒离子以受激辐射的形式跃迁到基态，并产生出和入射光信号中一样的光子。可见，EDFA 没有谐振器，因为它只是起放大激光的作用，如图 5-56 所示。

光放大器的出现是光纤通信发展史上里程碑，光放大器技术促进波分复用技术快速走向实用化。

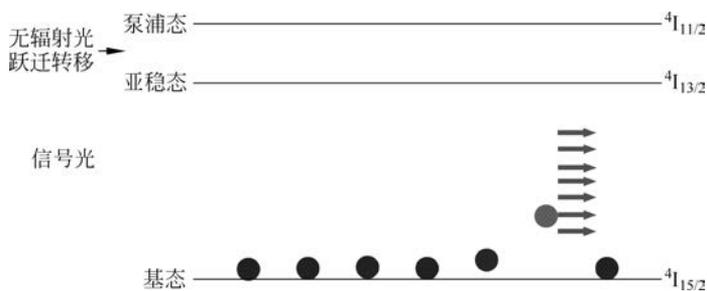


图 5-56 掺铒光纤放大器光放大原理



视频

## 5.8 光波分复用技术

波分复用是在一根光纤中同时传输多波长光信号的一种技术,采用这种技术可以实现如图 5-57 所示的双纤单向传输系统。各个用户的消息信号分别被调制不同波长的光载波上,不同波长的光信号作为合信号在一条光纤上传输,收端把不同波长的合信号分离出来,通过解调取出用户的信号。

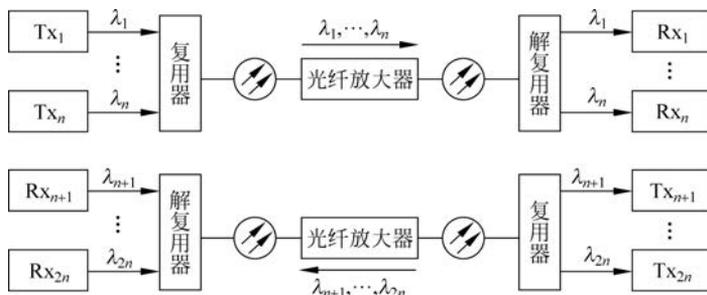


图 5-57 双纤单向传输示意图

可见,波分复用是利用波长的不同来区分不同的用户。那么波分复用究竟是怎么实现的?白光由不同波长成分组成,白光通过三棱镜折射能够把不同波长成分分开,如图 5-58 所示。

正是采用这种原理实现了波分复用。如图 5-59 所示,多个波长的混合光通过三棱镜后,其折射角不同,最终分别耦合到对应的光纤中,实现不同波长的分离,即解波分复用。对于波分复用,它是以上解波分复用器反过来使用。

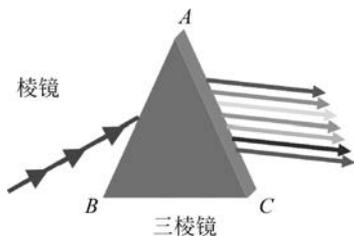


图 5-58 三棱镜的色散

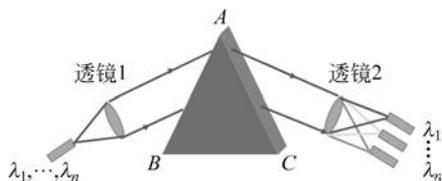


图 5-59 棱镜色散型光波分复用器结构示意图

WDM 技术具有以下优点:

(1) **充分利用光纤的巨大带宽。** 光纤具有巨大的带宽, WDM 技术使一根光纤的传输容量比单波长传输增加几倍至几十倍甚至几百倍, 从而增加光纤的传输容量, 降低成本, 具有很大的应用价值和经济价值。

(2) **同时传输多种不同类型的信号。** 由于 WDM 技术使用的各波长的信道相互独立, 因而可以传输特性和速率完全不同的信号, 完成各种电信业务信号的综合传输。

(3) **节省线路投资。** 采用 WDM 技术可使  $N$  个波长复用起来在单根光纤中传输, 也可实现单根光纤双向传输, 在长途大容量传输时可以节约大量光纤。另外, 对已建成的光纤通信系统扩容方便, 只要原系统的功率余量较大, 就可进一步增容而不必对原系统做大的改动。

(4) **降低器件的超高速要求。** 随着传输速率的不断提高, 许多光电器件的响应速度已明显不足, 使用 WDM 技术可降低对一些器件在性能上的极高要求, 同时又可实现大容量传输。

## 5.9 光纤相干通信技术

在如图 5-60 所示的相干光通信的发送机, 采用外调制的方式将信号调制到光载波上, 到达接收端以后, 首先经过前端处理如均衡等, 然后进入光混频器与本地光振荡器产生的光信号进行相干混合, 最后由探测器进行探测。

在光混合器, 信号光和本振光的偏振态一般要求始终保持一致。



图 5-60 相干光通信结构

相干光通信可以降低长距离传输的光纤架设成本, 简化光路放大和补偿设计, 因此在长距离传输网上成为主要的应用技术。

## 5.10 仿真实验

### 5.10.1 光纤内脉冲信号传输仿真

光纤对通信系统的影响在信号的衰减、色散和非线性效应三方面。衰减可用 EDFA 解决; 在长途干线上使用单模光纤, 起主要作用的是群速度色散(GVD); 而非线性效应包括 SRS、SBS、FWM、SPM 和 XPM。

光纤内脉冲随传播距离的变化由非线性薛定谔方程来描述, 采用分步傅里叶算法求解这个方程, 用 MATLAB 实现这个算法。

运行程序文件 test\_5\_9\_1, 可看到如图 5-61 所示的周期高斯脉冲波形, 在 50km 的光纤上传输各脉冲波形的变化如图 5-62 所示。

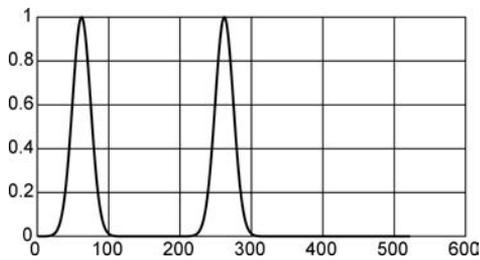


图 5-61 周期高斯脉冲

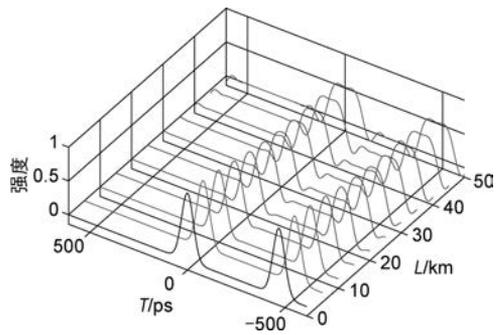


图 5-62 光纤内脉冲信号传输

由此可见,由于GVD和PWD的作用,通信信号在光纤中传输信号会变宽,从而引起码间干扰。

### 5.10.2 光纤通信系统仿真

光纤通信系统模型如图 5-63 所示,包括脉冲成形、电光调制、光纤信道、光电解调、低通滤波和抽样判决。

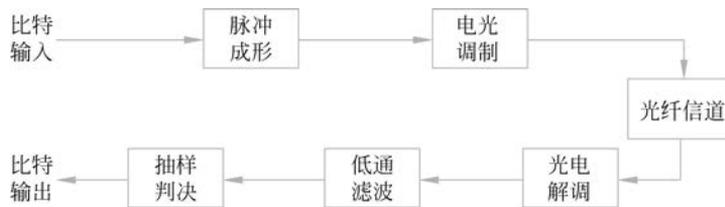


图 5-63 光纤通信系统模型

将文件 PRseries、PCMcode、photo\_detect 和 test\_5\_9\_2 放在工作目录,运行主程序 test\_5\_9\_2,可以看到对于如图 5-64 所示的消息序列,经过脉冲成形、电光调制、光纤信道和光电解调后的波形为如图 5-65 所示的噪声信号。可见,光电解调这个环节会引入噪声。

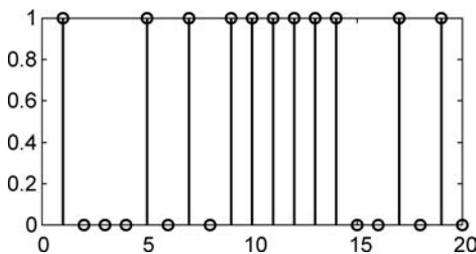


图 5-64 发送的消息序列(局部)

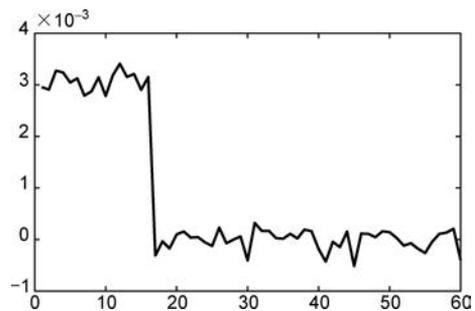


图 5-65 带噪声的光电信号(局部)

这种带噪声的光电信号经过低通滤波,得到如图 5-66 所示的信号,滤波后的光电信号的眼图如图 5-67 所示。

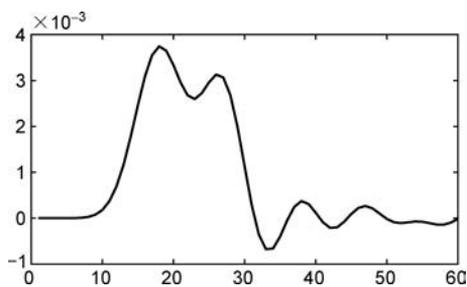


图 5-66 滤波后的光电信号

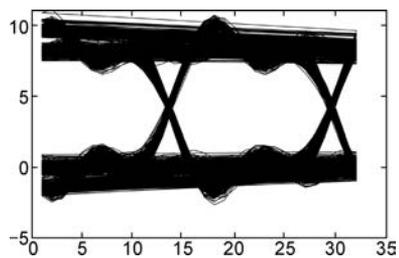


图 5-67 滤波后的光电信号的眼图

经过抽样判决后得到接收的消息序列如图 5-68 所示。由图可见,得到的消息序列与发送的数据符合得很好。

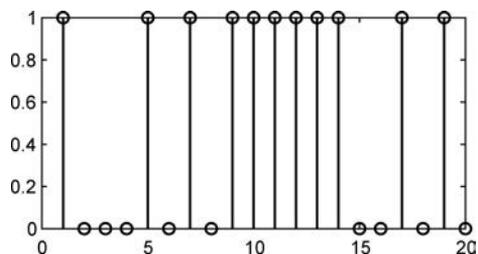


图 5-68 接收的消息序列(局部)

## 习题

1. 简述光纤通信系统的基本组成,各部分作用是什么。
2. 某阶跃光纤纤芯和包层的折射率分别为  $n_1=1.5$ ,  $n_2=1.45$ , 试计算:
  - (1) 纤芯和包层的相对折射率差  $\Delta$ ;
  - (2) 光纤的数值孔径。
3. EDFA 能放大哪个波段的光信号? 简述 EDFA 的结构和工作原理。