

光源可实现从电信号到光信号的转换,是光发射机以及光纤通信系统的核心器件,它的性能直接关系到光纤通信系统的性能和质量指标。本章首先介绍半导体激光二极管(LD)和半导体发光二极管(LED)两种光源的工作原理和应用,然后介绍光发射机的组成和参数,最后讨论外调制器的功能。

3.1 激光二极管

光源是光发射机和光纤通信系统的核心器件,其功能是把电信号转换为光信号。目前光纤通信广泛使用的光源主要有半导体激光二极管(或称激光器)和发光二极管(或称发光管),有些场合也使用固体激光器,例如,掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器。

本节将介绍激光二极管的工作原理、基本结构和主要特性。半导体激光器是向半导体PN结注入电流,实现粒子数反转分布,产生受激辐射,再利用谐振腔的正反馈,实现光放大而产生激光振荡的激光器,其英文LASER就是Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation的缩写。所以讨论激光器工作原理要从受激辐射开始。

3.1.1 工作原理

1. 受激辐射和粒子数反转分布

有源器件的物理基础是光和物质相互作用的效应。在物质的原子中,存在许多能级,最低能级 E_1 称为基态,能量比基态大的能级 E_i ($i=2,3,4,\dots$)称为激发态。电子在低能级 E_1 的基态和高能级 E_2 的激发态之间的跃迁有3种基本方式,如图3.1所示。

(1) 在正常状态下,电子处于低能级 E_1 ,在入射光作用下,它会吸收光子的能量跃迁到高能级 E_2 上,这种跃迁称为受激吸收。电子跃迁后,在低能级留下相同数目的空穴,如图3.1(a)所示。

(2) 在高能级 E_2 的电子是不稳定的,即使没有外界的作用,也会自动地跃迁到低能级 E_1 上与空穴复合,释放的能量转换为光子辐射出去,这种跃迁称为自发辐射,如图3.1(b)所示。

(3) 在高能级 E_2 的电子,受到入射光的作用,被迫跃迁到低能级 E_1 上与空穴复合,释放的能量产生光辐射,这种跃迁称为受激辐射,如图3.1(c)所示。

受激辐射是受激吸收的逆过程。电子在 E_1 和 E_2 两个能级之间跃迁,吸收的光子能量或辐射的光子能量都要满足玻尔条件,即

$$E_2 - E_1 = hf_{12} \quad (3.1)$$

其中, $h=6.628 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, f_{12} 为吸收或辐射的光子频率。

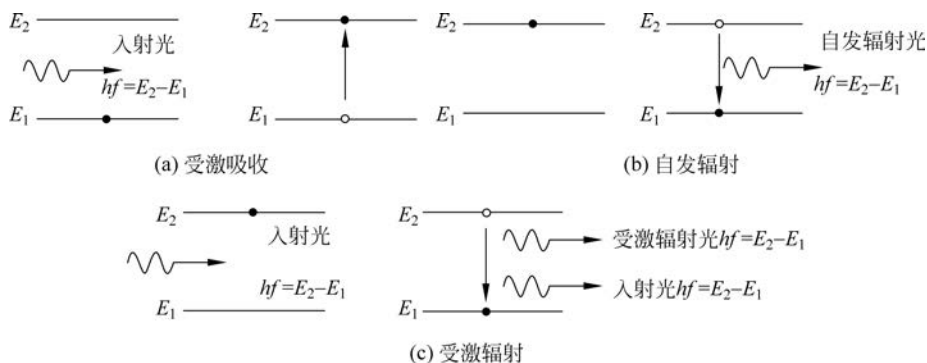


图 3.1 电子跃迁

受激辐射和自发辐射产生的光特点不同。受激辐射光的频率、相位、偏振态和传播方向与入射光相同,这种光称为相干光。自发辐射光是由大量不同激发态的电子自发跃迁产生的,其频率和方向分布在一定范围内,相位和偏振态是混乱的,这种光称为非相干光。

产生受激辐射和产生受激吸收的物质是不同的。设在单位物质中,处于低能级 E_1 和处于高能级 E_2 ($E_2 > E_1$) 的原子数分别为 N_1 和 N_2 。当系统处于热平衡状态时,存在下面的分布

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (3.2)$$

其中, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度。由于 $E_2 - E_1 > 0$, $T > 0$, 所以在这种状态下, 总是 $N_1 > N_2$ 。这是因为电子总是首先占据低能量的轨道。受激吸收和受激辐射的速率分别为 N_1 和 N_2 , 且比例系数(吸收和辐射的概率)相等。如果 $N_1 > N_2$, 即受激吸收大于受激辐射, 当光通过这种物质时, 光强按指数衰减, 这种物质称为吸收物质。

如果 $N_2 > N_1$, 即受激辐射大于受激吸收, 那么当光通过这种物质时, 会产生放大作用, 这种物质称为激活物质。 $N_2 > N_1$ 的分布和正常状态 ($N_1 > N_2$) 的分布相反, 所以称为粒子(电子)数反转分布。

以氢原子为例, 它的第一激发态能量为 $E_2 = -3.40 \text{ eV}$, 基态能量为 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$, 则 $E_2 - E_1 = 10.20 \text{ eV}$ 。

令 $g_2 = g_1 = 1$, 在室温 $T = 300 \text{ K}$ 时 (kT 近似为 0.026 eV), 可以计算出

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{10.20}{0.026}} \approx e^{-392} \approx 10^{-170}$$

【例 3-1】 已知激光二极管发射红光, 波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$, 单个光子的能量 E 等于多少? 假设光源的功率为 1 mW , 光源每秒发射的光子数是多少?

解: 根据式(3.1)可知

$$E_p = hf = hc/\lambda = 3.04 \times 10^{-19} \text{ J}$$

光源的功率为 $P = 1 \text{ mW}$, 则 1 s 内光子的总能量为 $E = P \times 1$ 。而 $E = E_p \times N$, 由此, 可计算得光源每秒发射的光子数目 $N = E/E_p = 3.3 \times 10^{15}$ 。

从例 3-1 可以看到, 尽管单个光子的能量很小, 但功率 1 mW 的光源, 每秒发射的光子仍然大得惊人。试想一下, 我们能否准确地测量到底有多少个光子呢?

2. 发光机理

制作 LD 的材料是半导体晶体。晶体中, 原子核外的电子运动轨道因相邻原子的共有化运动要发生不同程度的重叠, 如图 3.2 所示, 电子已经不属于某个原子所有, 它可以在更大范

围内甚至在整个晶体中运动,也就是说,原来的能级已经转变成能带。对应于最外层能级所组成的能带称为导带,次外层的能带称为价带,它们之间的间隔内没有电子存在,这个区间称为禁带。

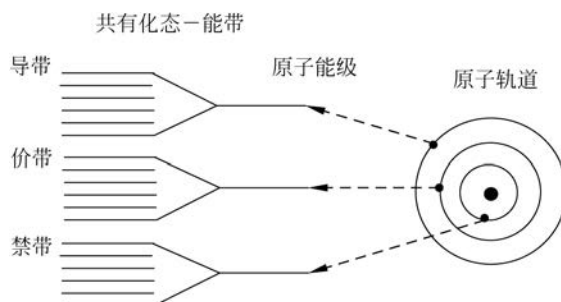


图 3.2 晶体中的能级

实际上,半导体激光器所发射出的光波长不是单一值。造成这种现象的原因有两个:一是半导体导带和价带都是由许多能级组成的,它们所具备的能量有微小差别;二是半导体的能带结构受掺杂和晶体缺陷影响较大,使得禁带宽度有微小的变化,所以用 $E_g = h\nu$ 计算出的波长是有一定的范围的量。

在光的受激辐射过程中必须保持能量和动量的守恒。禁带形状是与动量有关的,依照禁带的形状,可将半导体分成直接带隙和间接带隙两种,如图 3.3 所示。在直接带隙材料中,导带最小能级和价带最大能级有相同的动量,电子是垂直跃迁的,发光效率高,见图 3.3(a);在间接带隙材料中,要完成电子的跃迁,必须有其他粒子的参与以保持动量守恒,在图 3.3(b)中,说明了能量为 E_p 、动量为 k_p 粒子的参与过程。只有直接带隙半导体材料才能制作发光器件,这类材料有 GaAs、AlGaAs、InP 和 InGaAsP 等。

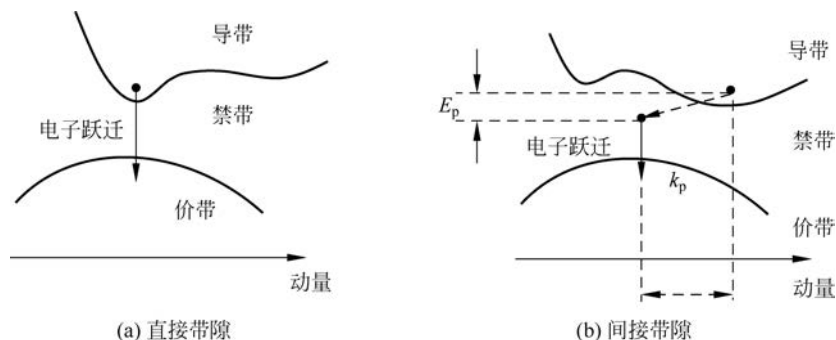


图 3.3 直接带隙和间接带隙

3. 激光振荡和光学谐振腔

粒子数反转分布是产生受激辐射的必要条件,但还不能产生激光。只有把激活物质置于光学谐振腔中,对光的频率和方向进行选择,才能获得连续的光放大和激光振荡输出。

基本的光学谐振腔由两个反射率分别为 R_1 和 R_2 的平行反射镜构成,并被称为法布里-珀罗 (Fabry Perot, F-P) 谐振腔。由于谐振腔内的激活物质具有粒子数反转分布,可以用它产生的自发辐射光作为入射光。入射光经反射镜反射,沿轴线方向传播的光被放大,沿非轴线方向的光被减弱。反射光经多次反馈,不断得到放大,方向性得到不断改善,结果增益得到大幅度提高。

4. 半导体激光器基本结构

半导体激光器的结构多种多样,基本结构为双异质结 (Double Heterostructure, DH) 平面

条形结构。这种结构由 3 层不同类型的半导体材料构成,不同材料发射不同波长的光。结构中间有一层厚 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 的窄禁带 P 型半导体,称为有源层;两侧分别为宽禁带的 P 型和 N 型半导体,称为限制层。三层半导体置于基片(衬底)上,前后两个晶体介质里面作为反射镜构成 F-P 谐振腔。

(1) 在 PN 结两边使用相同的半导体材料,称为同质结。

(2) 这种结没有带隙差,因而折射率差很小,一般为 $0.1\%\sim 1\%$,有源区对载流子和光子的限制作用很弱,做成的激光器阈值电流很大,工作时发热严重,不能在室温情况下连续工作,只能在低温环境、脉冲状态下工作。

(3) 所谓异质结,就是两种不同材料构成的 PN 结。若在宽带隙的 P 型和 N 型(如 GaAlAs)半导体材料间插进一薄层窄带材料的有源区材料(如 GaAs),则带隙差形成的势垒将电子和空穴限制在有源区。载流子和光场的限制使激光器的阈值电流密度大大下降,可实现室温连续工作。

不同的半导体材料有着不同的禁带宽度,发射光的波长不同。表 3.1 为常用半导体材料的禁带宽度(带隙)及发光波长。

表 3.1 常用半导体材料的禁带宽度(带隙)及发光波长

材料名称	分子式	发光波长 $\lambda/\mu\text{m}$	带隙能量 E_g/eV
磷化铟	InP	0.92	1.35
砷化铟	InAs	3.6	0.34
磷化镓	GaP	0.55	2.44
砷化镓	GaAs	0.87	1.424
砷化铝	AlAs	0.59	2.09
磷化铟镓	GaInP	$0.64\sim 0.68$	$1.82\sim 1.94$
砷化镓铝	AlGaAs	$0.8\sim 0.9$	$1.4\sim 1.55$
砷化镓铟	InGaAs	$1.0\sim 1.3$	$0.95\sim 1.24$
砷磷化铟镓	InGaAsP	$0.9\sim 1.7$	$0.73\sim 1.35$

5. LD 结构

如图 3.4 所示,激光二极管通常是一个多层条形的结构,其中有源层、限制层和端镜面构成了其结构的基本部分。

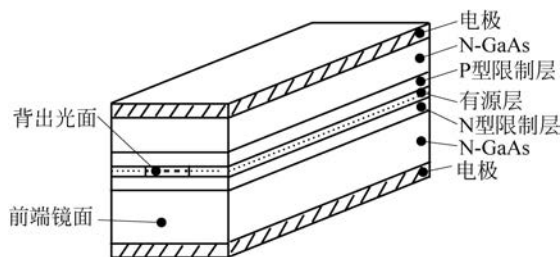


图 3.4 激光二极管结构

1) 有源层和限制层

在图 3.4 中,有源层的材料是 P 型砷化镓 GaAs 材料,限制层分别是 P 型和 N 型砷化镓铝 AlGaAs 材料,在它们的界面上分别形成两个 PN 结,把这类由异种半导体相接的结构称为双异质结。图 3.5(a)画出了双异质结的结构示意图,图 3.5(b)是它的能带。

2) 端镜面

激光器两端是端镜面,两者是平行的,同时又是非常平坦光亮的,它可以使有源层产生的

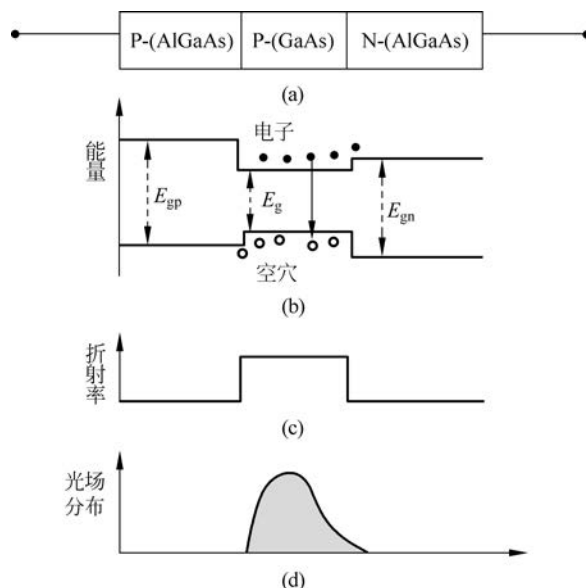


图 3.5 双异质结的结构示意图

光部分溢出,因此端镜面和有源层构成了光的容器。另外,有源层里产生的光不断从两端反射,形成光的振荡。随着电流不断注入,光逐渐被放大并趋于稳定的输出状态。综上所述,有源层实质上是一个矩形有源光波导,它与端镜面共同构成了具有频率选择的光波振荡器、放大器和光的储存器。

6. LD 阈值条件

粒子数反转、光学谐振腔是激光器获得激光的条件。除此之外,产生激光还必须满足阈值条件。只有光波在谐振腔内往复一次的放大增益大于各种损耗引起的衰减,激光器才能建立起稳定的激光输出。

设增益介质的增益系数和损耗系数分别为 G 和 α ,谐振腔内光功率随距离 z 的变化可表示为

$$P(z) = P(0) \exp[(G - \alpha)z] \quad (3.3)$$

其中, $P(0)$ 为 $z=0$ 处的光功率。光束在腔内一个来回时,两次通过增益介质,这时的光增益为

$$\frac{P(2L)}{P(0)} = \exp[2(G - \alpha)L] \quad (3.4)$$

其中, L 为谐振腔的腔长。设两个镜面的反射系数为 r_1 和 r_2 ,建立光振荡的条件为

$$r_1 r_2 P(2L) \geq P(0) \quad (3.5)$$

将式(3.4)代入式(3.5),得 $r_1 r_2 \exp[2(G - \alpha)L] \geq 1$,即

$$G \geq \alpha + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right) \quad (3.6)$$

这就是产生激光的阈值条件。式(3.6)中 G 为阈值增益系数,第一项 α 是谐振腔内增益介质的损耗系数,第二项表示通过反射镜的损耗。在半导体激光器中,只有当注入电流满足阈值条件时,才迅速出现激光输出。

光与半导体物质的相互作用可用速率方程来描述,速率方程反映了有源层内光子与电子的相互作用。速率方程为

$$\frac{ds}{dt} = Dns + R_{sp} - \frac{s}{\tau_{ph}} \quad (3.7)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau_{sp}} - Dns \quad (3.8)$$

其中, s 和 n 分别为光子数目和电子数目, D 是描述光吸收与辐射相互作用强度的系数, R_{sp} 是自发辐射成为激光模式的载流子速率, τ_{ph} 是光子寿命, τ_{sp} 是电子寿命, d 是限制层厚度, J 是注入电流密度, q 是电子电荷。

式(3.7)的物理意义是在单位时间内, 总光子数目取决于受激辐射产生光子数目、自发辐射产生光子数目、激光腔损耗造成的光子损失数目; 式(3.8)的物理意义是在单位时间内, 总电子数目取决于注入载流子数目、自发复合导致导带的电子损失数目、受激辐射导致导带的电子损失数目。

7. LD 模式

由上面的分析可知, 在两平面反射镜之间形成了稳定的振荡, 振荡频率可由谐振条件或称驻波条件得到。

在谐振腔中, 光波是在两平面反射镜之间往复传输的, 只有平面镜间距是半波长的整数倍时, 光波才能得到彼此加强, 这就是激光振荡的相位条件, 即

$$L = m \frac{\lambda}{2n}, \quad \lambda = \frac{2nL}{m} \quad (3.9)$$

其中, λ 为激光在真空中传播的光波波长, n 为增益介质的折射率, $m=1, 2, \dots$ 。利用 $\lambda=c/f$, 可将式(3.9)重写成

$$f = m \frac{c}{2nL} \quad (3.10)$$

其中, f 为光波的频率, c 为光速。显然, 激光器中振荡的光频率只能取某些分立值, m 的一系列取值对应于沿谐振腔轴向一系列不同的电磁场分布状态, 一种分布就是一个激光器的纵模。谐振腔内的纵模很多, 例如, 某半导体激光器腔长 $L=300\mu\text{m}$, $n=3.5$, $\lambda=1.31\mu\text{m}$, 则由式(3.10)可求出 $m=1603$ 。只有那些有增益且增益大于损耗的模式才能在激光的输出光谱中存在。若只剩下一个模称为单纵模激光器, 否则称为多纵模激光器。相邻两纵模之间的频率之差

$$\Delta f = \frac{c}{2nL} \quad (3.11)$$

激光振荡也可以出现在垂直于腔轴线的方向上, 这时在激光器出光的端面上出现稳定的光斑, 将这种横向的光场分布称为横模。激光器的横模决定了激光光束的空间分布, 它直接影响到器件和光纤的耦合效率。

【例 3-2】 已知 GaAs 激光二极管的中心波长为 0.85nm , 谐振腔长为 0.4mm , 材料折射率为 3.7 。若在 $0.80\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.90\mu\text{m}$ 范围内, 该激光器的光增益始终大于谐振腔的总衰减, 试求该激光器中可以激发的纵模数量。

解: 由式(3.9)和式(3.11)可以得出

纵模波长间隔:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f = \frac{\lambda^2}{2nL} = \frac{0.85^2}{2 \times 3.7 \times 400} = 0.244 \times 10^{-3} \mu\text{m} = 0.244\text{nm}$$

因此可以激发的纵模数量:

$$\frac{900\text{nm} - 800\text{nm}}{\Delta\lambda} = \frac{100}{0.244} \approx 410$$

3.1.2 半导体激光器的主要特性

1. 发射波长和光谱特性

半导体激光器的发射波长取决于导带的电子跃迁到价带时所释放的能量, 这个能量近似

等于禁带宽度 E_g , 由式(3.1)得到

$$hf = E_g \quad (3.12)$$

其中, $f = c/\lambda$, f 和 λ 分别为发射光的频率和波长, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, 代入式(3.12)得

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (3.13)$$

2. 激光束的空间分布

激光束的空间分布用近场和远场来描述。近场是指激光器输出反射镜面上的光强分布; 远场是指离反射镜面一定距离处的光强分布。近场和远场是由谐振腔(有源区)的横向尺寸, 即平行于 PN 结平面的宽度 w 和垂直于结平面的厚度 t 所决定, 并称为激光器的横模。

平行于结平面的谐振腔宽度 w 由宽变窄, 场图呈现出由多横模变为单横模; 垂直于结平面的谐振腔厚度 t 很薄, 这个方向的场图总是单横模。

3. $P-I$ 特性

典型的半导体激光器 $P-I$ 特性如图 3.6 所示。当注入电流小于阈值电流 I_{th} 时, 器件发出微弱的自发辐射光, 是非相干的荧光; 当注入电流超过阈值时, 器件进入受激发射状态, 发出的光是相干激光, 光功率输出迅速增加, 输出功率与注入电流基本保持线性关系。

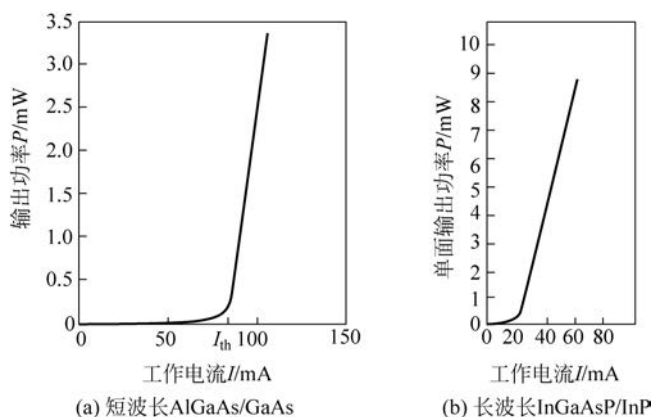


图 3.6 激光器 $P-I$ 特性

短波长激光器的 I_{th} 一般为 $50 \sim 100 \text{ mA}$; 长波长激光器的 I_{th} 一般为 $20 \sim 50 \text{ mA}$, 目前较好的激光器阈值电流小于 10 mA 。

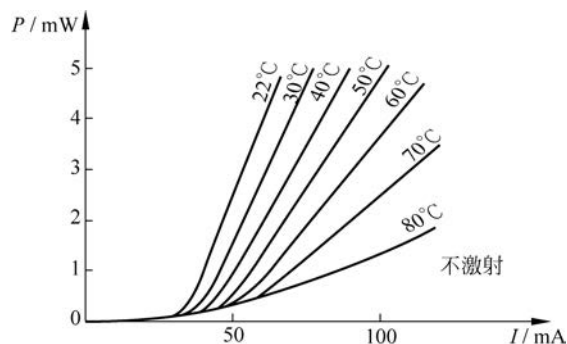


图 3.7 激光器 $P-I$ 曲线随温度的变化

激光器的 $P-I$ 特性对温度很敏感, 如图 3.7 所示, 随着温度的升高, 阈值电流增大, 发光功率降低。阈值电流与温度的关系可以表示为

$$I_{th}(T) = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (3.14)$$

其中, T 为器件的热力学温度, T_0 为激光器的特征温度, I_0 为激光器的特征常数。

为解决半导体激光器温度敏感的问题, 可以在驱动电路中进行温度补偿, 或是采用制冷器来保持器件的温度稳定, 通常将半导体激光器与热敏电阻、半导体制冷器等封装在一起, 构成组件。热敏电阻用来检测器件温度, 控制制冷器, 实现闭环负反馈自动恒温。

4. 光电效率

光电效率是表明电功率转换为光功率的比率。有以下几种表示方法：

(1) 内量子效率。激光器的发光是靠注入有源层的电子与空穴的复合辐射发光的,但是并非所有的注入电子与空穴都能够产生辐射复合。内量子效率代表有源层内产生光子数与注入的电子-空穴对数之比,即

$$\eta_i = \frac{\text{单位时间内产生的光子数}}{\text{单位时间内注入的电子-空穴对数}} \quad (3.15)$$

(2) 外量子效率。激光器的内量子效率可以做得很高,有的甚至可以接近 100%,但实际的激光器发射输出的光子数远低于有源层中产生的光子数,这一方面是由于发光区产生的光子被其他部分材料吸收,另一方面由于 PN 结的波导效应。光子能逸出界面的数目大大减少,所以定义外量子效率即总效率为

$$\eta_T = \frac{\text{发射的光子数}}{\text{单位时间内注入的电子-空穴对数}} \quad (3.16)$$

(3) 外微分量子效率。外微分量子效率 η_D 定义为 P - I 曲线线性范围内的斜率,所以又称为斜率效率。可用下面的关系式来进行计算:

$$\eta_D = \frac{q}{E_g} \frac{dP}{dI} = 0.8065\lambda \frac{dP}{dI} \quad (3.17)$$

其中, q 、 E_g 分别表示电子电量和禁带宽度。 λ 、 P 和 I 的单位分别为 μm 、 mW 和 mA 。 η_D 与激光器的结构参数、工艺水平以及温度有关,反映了激光器的电/光转换效率。实际工作中 η_D 使用较多,也最重要,该值为 15%~20%,对于高性能器件,则为 30%~40%。

5. 频率特性

在直接光强调制下,激光器输出光功率 P 和调制信号频率 f 的关系为

$$P(f) = \frac{P(0)}{\sqrt{[1 - (f/f_r)^2]^2 + 4\xi^2 (f/f_r)^2}} \quad (3.18a)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_{sp}\tau_{hp}} \left(\frac{I_0 - I'}{I_{th} - I'} \right) - 1} \quad (3.18b)$$

其中, f_r 和 ξ 分别称为弛张频率和阻尼因子, I_{th} 和 I_0 分别为阈值电流和偏置电流; I' 是零增益电流,高掺杂浓度的 LD, $I' = 0$,低掺杂浓度的 LD, $I' = (0.7 \sim 0.8)I_{th}$; τ_{sp} 为有源区内的电子寿命, τ_{ph} 为谐振腔内的光子寿命。

6. 光谱特性

激光器的光谱特性主要由其纵模决定。图 3.8(a)和图 3.8(b)分别为多纵模、单纵模激光器的典型光谱曲线。 λ_p 为具有最大辐射功率的纵模峰值所对应的波长,称为峰值波长,典型值是 850nm、1310nm 和 1550nm。 $\Delta\lambda$ 为 LD 的谱宽,其定义为纵模包络下降到最大值一半时对应的波长宽度,也称半高全宽光谱宽度。单纵模激光器的谱宽度又称为线宽。多纵模激光器光谱特性包络内一般含有 3~5 个纵模, $\Delta\lambda$ 值为 3~5nm,较好的单纵模激光器的 $\Delta\lambda$ 值约为 0.1nm,甚至更小。 $\Delta\lambda_L$ 是一个纵模中光谱辐射功率为其最大值一半的谱线两点间的波长间隔。

对于单纵模激光器,定义边模抑制比(MSR)为主模功率 $P_{\text{主}}$ 与次边模功率 $P_{\text{边}}$ 之比,它是半导体激光器频谱纯度的一种度量。

$$\text{MSR} = 10 \lg \frac{P_{\text{主}}}{P_{\text{边}}} \quad (3.19)$$

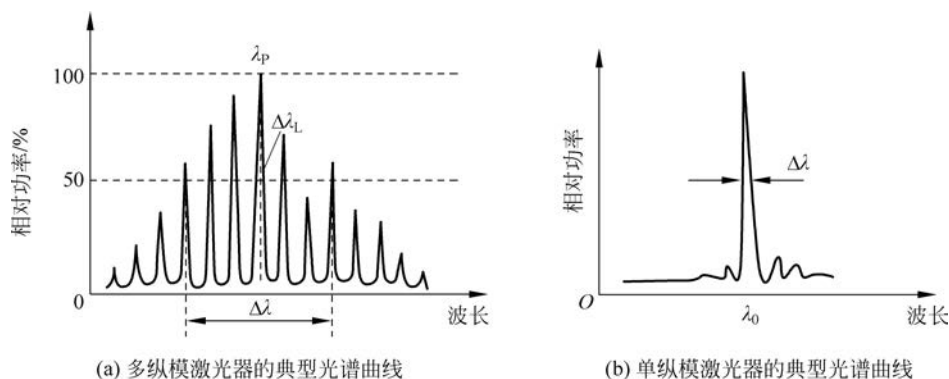


图 3.8 激光器的光谱特性

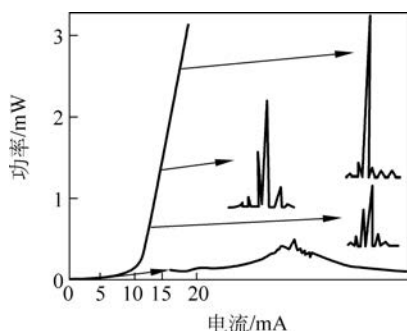


图 3.9 激光器输出谱线注入电流的变化

半导体激光器的发光谱线会随着工作条件的变化而发生变化,当注入电流低于阈值电流时,激光器发出的是荧光,光谱较宽;当电流增大到阈值电流时,光谱突然变窄,强度增强,出现激光;当注入电流进一步增大,主模的增益增加,而边模的增益减小,振荡模式减少,最后会出现单纵模,如图 3.9 所示。

谱宽也可以用频率为单位来表示,根据频率与波长的关系,可以得到

$$|\Delta f| = \frac{c}{\lambda^2} |\Delta \lambda| \quad (3.20)$$

7. 调制特性

将电信号加载到激光束上的过程称为调制。激光器输出是否能准确地重现输入信号取决于激光器的内部特性。在数字调制时,需要考虑激光器的瞬态特性。

1) 电光延迟

当激光器在进行脉冲调制时,输出光脉冲的起点与注入电脉冲的起点之间存在一定的电光延迟时间 t_d ,该值为纳秒的量级,如图 3.10 所示。存在延迟现象的原因是电子和光子密度达到平衡值时都需要一个时间过程。为了提高调制速率,就必须设法减小电光延迟时间 t_d 。理论研究结果表明, t_d 与注入电流密度 J 有如下关系:

$$t_d = \tau_e \ln \left(\frac{J}{J - J_{th}} \right) \quad (3.21)$$

其中, τ_e 为复合区载流子的寿命, J_{th} 是阈值电流密度。如果加直流预偏置电流 J_b ,式(3.21)则变为

$$t_d = \tau_e \ln \left(\frac{J}{J - J_{th} + J_b} \right) \quad (3.22)$$

显然,当 J_b 接近或等于 J_{th} 时,则 t_d 趋于零。所以半导体激光器在较高速率调制时都要加预偏置。

2) 张弛振荡

当电流脉冲注入激光器以后,输出光脉冲表现出衰减式的振荡,如图 3.10 所示。这种现象称为张弛振荡。张弛振荡的频率一般在几百兆赫兹至 2GHz 的量级。它

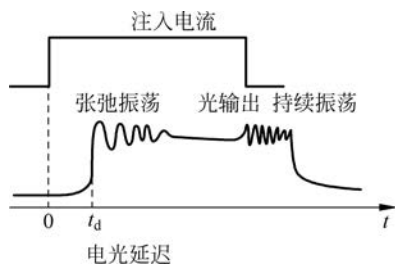


图 3.10 激光器的瞬态特性

是激光器内部光电相互作用所表现出来的固有特性,增加直流预偏置也可以抑制张弛振荡,而且预偏置越接近阈值,效果越显著。

3) 持续振荡

某些激光器在某些注入电流下发生的一种持续振荡,称为自脉动现象。不论是数字调制还是模拟调制,对于直接强度调制方式,其调制频率都受限于激光器的弛豫振荡频率,即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{(\tau_{sp}\tau_{ph})^{1/2}} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right)^{1/2} \quad (3.23)$$

腔长为 $300\mu\text{m}$ 的激光器, τ_{sp} 和 τ_{ph} 大约分别为 1ns 、 2ps ,当注入电流是阈值电流的两倍时,弛豫振荡频率为几吉赫兹。由式(3.23)可知,阈值较低的激光器,可以获得较大的带宽。当调制频率超过后,调制效率将大为降低。

8. 噪声

激光器输出光的强度总在随机变化,如果光纤链路上的连接器等器件产生的回射光进入激光器被激活放大,也会引起强度波动,这种波动引起激光器中的强度噪声,它用相对强度噪声来度量:

$$\text{RIN} = 10\lg \frac{\overline{P_N^2}}{P^2 B} \quad (3.24)$$

其中, $\overline{P_N}$ 是激光器产生的平均噪声功率, P 是它发出的平均功率,由于 RIN 的测量需要一个接收机和两者之间的链路, B 则是接收机和链路的带宽。式(3.24)中 RIN 的单位为 dB/Hz 。

9. 啁啾

单纵模激光器在高速强度调制时,注入有源层的电子密度不断变化,导致折射率的变化,使激光器的输出波长和强度都发生变化,在调制脉冲的上升沿向短波长漂移,在调制脉冲的下降沿向长波长漂移,从而使输出谱线加宽,这种动态谱线加宽现象叫作啁啾。

对单纵模激光器动态调制时,输出光功率 $P(t)$ 变化所引起的激光频率变化可以近似地表示为

$$\delta f = \frac{\alpha}{4\pi} \left[\frac{d}{dt} \ln \Delta P(t) + \chi \Delta P(t) \right] \quad (3.25)$$

其中, α 是线宽增强因子, χ 为与激光器结构有关的常数。式(3.25)显示,在光脉冲的前沿,因为 $\Delta P(t) > 0$, 频率升高,而在光脉冲的后沿,频率下降,光脉冲的频谱展宽了。

啁啾的存在使得光信号的频谱大大展宽,构成对光纤通信性能的一个限制因素,对 $1.55\mu\text{m}$ 的系统,如果传输距离为 $80 \sim 100\text{km}$,那么采用普通光纤时码率将被限制在 2Gb/s 以下;如果采用色散位移光纤,码率可得到一定的提高。其他解决频率啁啾问题的方法包括对注入电流脉冲形状的控制、注入锁定、采用耦合腔半导体激光器等,最直接的办法就是设计出具有较小线宽展宽因子的激光器,如采用量子阱结构设计。最根本的方法是采用外部调制器的外调制法,可以消除调制引起的频率啁啾。

3.1.3 LD 的类型

F-P 激光器是最常见的激光器类型,随着技术的进步,作为光纤通信系统的关键部件,激光器的制造工艺有了突飞猛进的提高,新的品种不断出现,使激光器的性能有了根本的改变,主要有以下几种类型。

1. 分布反馈激光器

利用分布反馈原理制成的激光器分成两类:一类是分布式布拉格反射(Distributed Bragg

Reflector, DBR) 激光器; 另一类是分布式反馈(Distributed FeedBack, DFB) 激光器。

1) DBR 激光器

图 3.11 所示为 DBR 激光器的结构。DBR 激光器在有源层的附近增加了一段分布式布拉格光栅, 它起着衍射光栅的作用。反射光经光栅相长干涉, 相长干涉的条件是反射光波长等于两倍光栅间距 Λ , 这种选择性称作布拉格条件, 即

$$m \cdot \frac{\lambda_B}{\bar{n}} = 2\Lambda \quad (3.26)$$

其中, $\bar{n}$ 是介质折射率, 整数 m 代表布拉格衍射阶数, $m=1$ 时相长干涉最强。



图 3.11 DBR 激光器的结构

2) 分布式反馈激光器

图 3.12 表示 DFB 激光器的结构。它没有集总反射的谐振腔反射镜, 而是靠有源层上的布拉格光栅使有源层的光波产生部分反射, 满足布拉格反射条件的特定波长的光会相长干涉, 激光器输出光波长为

$$\lambda_m = \lambda_B \pm \frac{\lambda_B^2}{2nL}(m+1) \quad (3.27)$$

其中, n 是有效折射率, L 是衍射光栅有效长度, m 是整数, λ_B 是布拉格波长。实际上, 由于制造过程或者有意使其不对称, 只能产生一个模式。分布式反馈激光器可以通过改变光栅的周期 Λ 来调整发射波长。

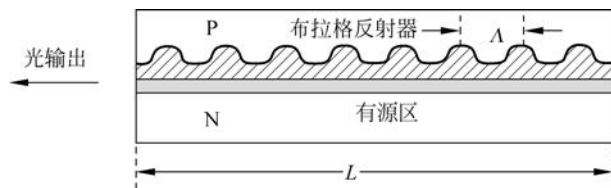


图 3.12 DFB 激光器的结构

2. 量子阱激光器

一般双异质结构激光器的有源层最佳厚度约为 $0.15\mu\text{m}$, 电子的辐射跃迁发生在两个能量之间, 但当其有源层厚度减至可以和玻尔半径 ($1\sim 50\text{nm}$) 相比拟时, 半导体的性质将发生根本变化, 此时, 半导体的能带结构、载流子有效质量、载流子运动性质会出现新的效应——量子效应, 相应的势阱称为量子阱, 这种结构的激光器称为量子阱激光器。

量子阱结构可以通过改变有源层的厚度来改变发射波长, 它大大地降低了阈值电流。采用厚度为 $5\sim 10\text{nm}$ 的多个薄层结构有源层可改进单量子阱器件性能。这种激光器称为多量子阱(MultiQuantum-Well, MQW) 激光器, 它具有调制性能更好、线宽更窄和效率更高的优点。

图 3.13 为 4 个量子阱半导体激光器的结构示意图和能级图, 量子阱之间是限制层。量子阱激光器具有低阈值电流、可高温工作、谱线宽度窄和调制速度高等优点。

当阱数为 4 时, 最高工作温度可达 105°C , 阱数达到 10 以后, 最高温度有趋于饱和的趋

势,当阱数为 15 时,最高工作温度接近 160°C ,这种 LD 不必使用帕尔贴(Peltier)电子制冷器,不需要补偿因温度引起性能变化的自动功率控制,可以延长使用寿命。

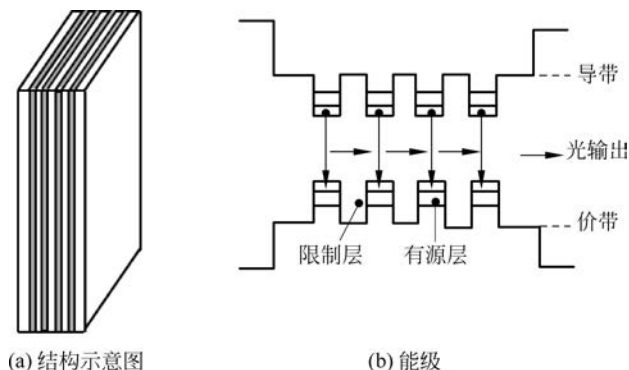


图 3.13 多量子阱 LD 的结构和能级

3. 垂直腔面发射激光器

垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)是一种电流和发射光束方向都与芯片表面垂直的激光器。垂直腔结构对于二维应用具有很好的灵活性,与光纤耦合时具有最高的耦合效率。

图 3.14 是 VCSEL 结构的原理图,其有源层位于两个限制层之间,并构成双异质结构。因为采用了隐埋制作技术,注入电流被完全限制在直径为 D 的圆形有源层。VCSEL 的腔长是隐埋双异质结构的纵向长度,一般为 $5\sim 10\mu\text{m}$,而它的谐振腔的两个反射面不再是晶体的解理面,它的一个反射镜设置在 P 区边,另一个反射镜设置在 N 区边。

垂直腔面发射激光器的主要优点如下。

- (1) 发光效率高。
- (2) 阈值电流低,为 $1\text{mA}\sim 1\mu\text{A}$,工作电流也仅为 $5\sim 15\text{mA}$ 。
- (3) 可以单纵模方式工作,也可以多纵模方式工作,从而减少了多模光纤应用时的相干和模式噪声。
- (4) 可任意配置高密度二维激光阵列。
- (5) 高的温度稳定性和工作速率。
- (6) 价格低、产量高等。

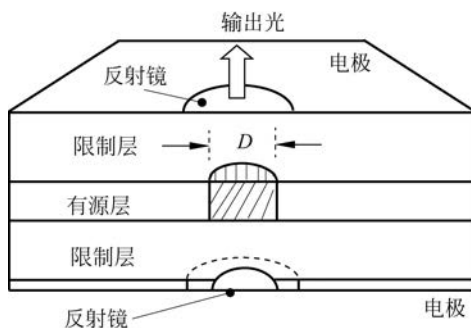


图 3.14 VCSEL 结构的原理图

3.1.4 LD 组件及其技术指标

激光器组件是除激光二极管(LD)芯片外,还配置其他元器件和实现 LD 工作必要的少量电路块的集成器件,包括光隔离器、监测光电二极管(PD)、尾纤和连接器、LD 的驱动电路、热敏电阻、热电制冷器、自动温控(ATC)电路、自动功率控制(APC)电路等。

跟踪误差的定义是

$$E_r = 10 \lg \left(\frac{P_f(T)}{P_f(25^{\circ}\text{C})} \right) \quad (3.28)$$

其中, $P_f(T)$ 表示温度为 0°C 或者 65°C 时激光器到光纤的耦合功率。其实, 跟踪误差是一种在工作温度范围内保证光从激光器模块耦合入光纤的稳定性的方法, 它是由监测光电二极管完成的, PD 通过检测从激光腔尾部刻面射出的光线来向反馈电路发出信号, 以决定是增加还是减少驱动电流以维持输出功率的稳定。

PD 暗电流是指没有光照射到 PD 上时, 流过它的电流。该指标反映了光电探测器的精确度。

3.2 发光二极管

光纤通信用的半导体 LED 发出的是不可见的红外光, 而显示所用 LED 发出的是可见光, 如红光、绿光等, 但是它们的发光机理基本相同。发光二极管的发射过程主要对应光的自发辐射过程, 当注入正向电流时, 注入的非平衡载流子在扩散过程中复合发光, 所以 LED 是非相干光源, 并且不是阈值器件, 它的输出功率基本上与注入电流成正比。

LED 的谱宽较宽 ($30\sim 60\text{nm}$), 辐射角也较大。在低速率的数字通信和较窄带宽的模拟通信系统中, LED 是可以选用的最佳光源, 与半导体激光器相比, LED 的驱动电路较为简单, 并且产量高, 成本低。

3.2.1 LED 结构

发光二极管常分为 3 种类型, 即面发光二极管、边发光二极管、超辐射发光二极管。

1. 面发光二极管

图 3.15 示出了面发光 (Surface Emitting) 二极管的典型结构。它由 N-P-P 双异质结构成。这种 LED 发射面积限定在一个小区域内, 该区域的横向尺寸与光纤尺寸相近。利用腐蚀的方法在衬底材料正对有源层的地方腐蚀出一个凹陷的区域, 使光纤与光发射面靠近, 同时, 在凹陷的区域注入环氧树脂, 并在光纤末端放置透镜或形成球透镜, 以提高光纤的接收效率。面发光二极管输出的功率较大, 一般注入 100mA 电流时, 就可达几毫瓦, 但光发散角大, 水平和垂直发散角都可达到 120° , 与光纤的耦合效率低。

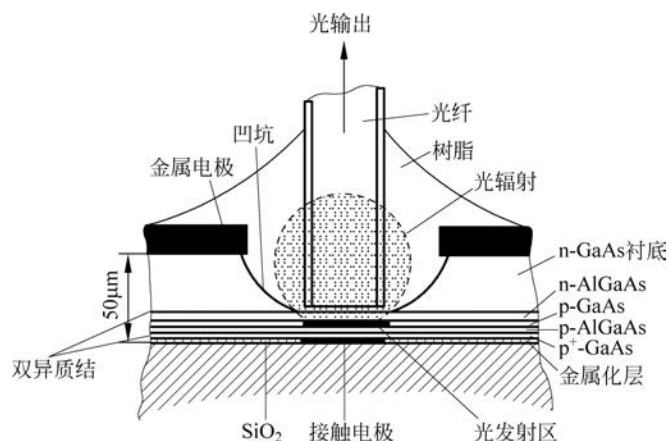


图 3.15 面发光二极管的结构

2. 边发光二极管

图 3.16 示出了边发光 (Edge-Emitting) 二极管的典型结构。条形接触电极 ($40\sim 50\mu\text{m}$) 可限定有源层的宽度, 便于与纤芯匹配; 同时导光层进一步提高了光的限定能力, 把有源层产

生的光辐射导向发光面,以提高与光纤的耦合效率。有源层一端镀高反射膜,另一端镀增透膜,以实现单向出光。边发光二极管的垂直发散角 $\theta_{\perp}$ 约为 30° ,水平发散角 $\theta_{\parallel}$ 为 120° ,具有比面发光二极管高的输出耦合效率。

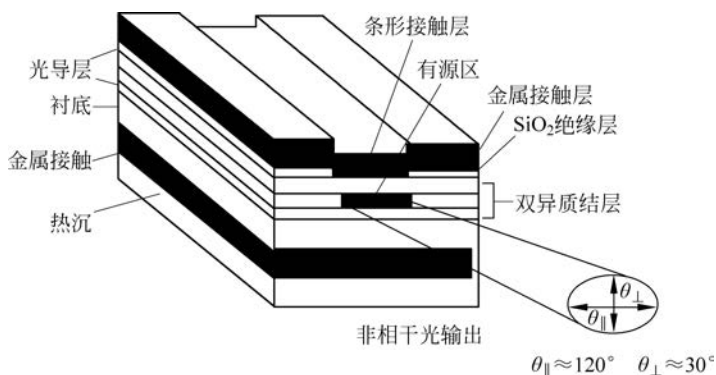


图 3.16 边发光二极管的典型结构

3. 超辐射发光二极管

超辐射发光二极管(superluminescent diode)的出现和发展是受到光纤陀螺的驱动,对它的要求是有高的功率输出并有宽的光谱宽度。图 3.17 是超辐射发光二极管的结构示意图。这种结构的目的是使得 SLD 既有很高的输出功率而又不产生激射振荡,因为要使输出功率增加,最简单的办法是增大注入电流,但过高的注入电流可能会导致激射振荡。

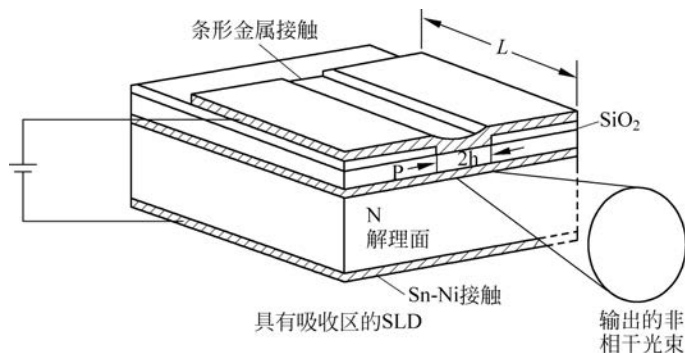


图 3.17 超辐射发光二极管的结构

3.2.2 LED 特性

作为光通信系统中所用的光源,我们所关注的发光二极管的技术指标包括发光效率、光谱特性、 $P-I$ 特性、调制特性、频率特性等。

1. 光谱特性

由于 LED 没有光学谐振腔以选择波长,所以它的光谱是以自发发射为主的光谱,发光谱线较宽。图 3.18 为典型 $1.3\mu\text{m}$ LED 的光谱曲线。光谱曲线上发光强度最大时所对应的波长称为发光峰值波长 λ_p ,光谱曲线上两个半光强点对应的波长差 $\Delta\lambda$ 称之为 LED 谱线宽度(简称谱宽),它是一个与温度 T 和波长 λ 有关的量。

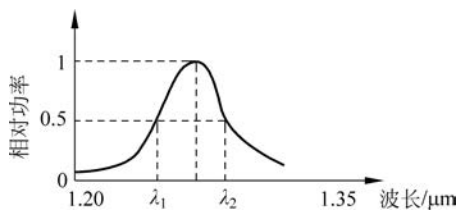


图 3.18 发光二极管的光谱曲线

$$\Delta\lambda = 1.8kT \left(\frac{\lambda^2}{hc} \right) \quad (3.29)$$

其中, c 为光速, h 为普朗克常数 ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。由式(3.29)可见, 谱宽随辐射波长 λ 的增加按 λ^2 增加。

一般短波长 GaAlAs/GaAs 发光二极管的谱线宽度为 $10 \sim 50 \text{ nm}$, 长波长 InGaAsP/InP 发光二极管的谱线宽度为 $50 \sim 120 \text{ nm}$ 。

发光二极管的谱线宽度反映了有源层材料的导带与价带内的载流子分布。线宽随有源层掺杂浓度的增加而增加。面发光二极管一般是重掺杂, 而边发光二极管为轻掺杂, 因此面发光二极管的线宽就较宽。而且, 重掺杂时, 发射波长还向长波长方向移动。另外, 温度的变化会使线宽加宽, 载流子的能量分布变化也会引起线宽的变化。

【例 3-3】 已知材料 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 中, 带隙能量 $E_g = 1.424 + 1.266x + 0.266x^2$, x 满足 $0 \leq x \leq 0.37$, 求这样的 LED 能覆盖的波长范围。

解: 根据 $E_g = 1.424 + 1.266x + 0.266x^2$ 计算得 $1.424 \leq E_g \leq 1.93$, 由 $\lambda = 1240/E_g$, 可得波长范围为 $642 \text{ nm} \leq \lambda \leq 871 \text{ nm}$ 。

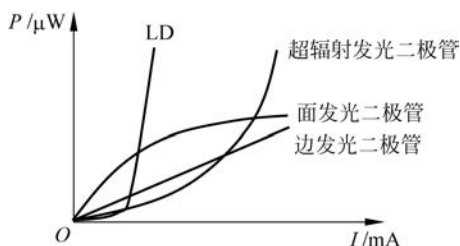


图 3.19 发光二极管的 P - I 特性

2. P - I 特性

发光二极管的 P - I 特性是指输出的光功率随注入电流的变化关系。为了便于比较, 图 3.19 将各种发光管的注入电流与输出光功率的关系曲线都表示在一幅图中。由图 3.19 可见, 面发光器件的功率较大, 但在高注入电流时易出现饱和; 而边发光器件的功率相对较低, 但线性度较好; 超辐射发光器件的 P - I 特性类似于激光器的曲线, 但是没有明显的拐点, 即没有阈值电流。一般而言, 在同样的注入电流下, 面发光二极管的输出光功率要比边发光二极管大 $2.5 \sim 3$ 倍, 这是由于边发光二极管受到更多的吸收和界面复合的影响。

温度对发光二极管的 P - I 特性也有影响, 对于面发光二极管, 有

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right) \quad (3.30)$$

其中, T_0 是器件的特征温度。当温度升高时, 同一电流下的发射功率要降低, 但与 LD 比较起来, 发光二极管的温度特性相对较好, 在实际应用中, 一般可以不加温度控制。

3. 调制特性

在规定的正向偏置工作电流下, 对 LED 进行数字脉冲或模拟信号电流调制, 便可实现对输出光功率的调制。LED 有两种调制方式, 即数字调制和模拟调制, 具体见图 3.20。

调制频率或带宽是衡量发光二极管的调制能力, 其定义是在保证调制度不变的情况下, 当 LED 输出的交流光功率下降到某一低频参考频率值的一半时 (如 -3 dB) 的频率就是 LED 的调制带宽, 它可以表示为

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (3.31)$$

其中, τ 为载流子的寿命。为了提高带宽, 希望缩短载流子的寿命, 可以通过增大有源层的掺杂浓度和提高注入少数子浓度改善带宽性能, 但是带宽的增加却会使得 LED 输出光功率下降。例如, 面发射 GaAlAs 发光管最高功率可达 15 mW , 而 3 dB 带宽为 17 MHz ; 当最大调制带宽为 1.1 GHz 时, 功率降低至 0.2 mW 。LED 的输出功率与调制带宽的乘积是一个常数, 即

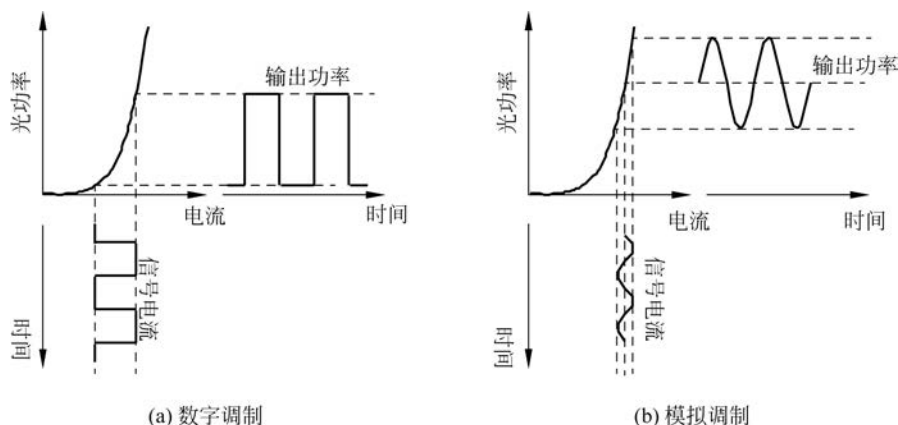


图 3.20 发光二极管的调制原理图

$$\Delta f \cdot P = \text{常数} \quad (3.32)$$

4. 频率特性

发光二极管的频率响应可以表示为

$$|H(f)| = \frac{P(f)}{P(0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau_c)^2}} \quad (3.33)$$

其中, f 为调制频率, $P(f)$ 为对应于调制频率 f 的输出光功率, τ_c 为少数载流子(电子)的寿命。定义 f_c 为发光二极管的截止频率, 当 $f = f_c = 1/(2\pi\tau_c)$ 时, $|H(f_c)| = 1/\sqrt{2}$, 最高调制频率应低于截止频率。

3.2.3 光源 LD、LED 与光纤的耦合

LED 与光纤的耦合是发光二极管应用中一个重要的实际问题。因为发光二极管的输出光束发散性较大, 可利用的光功率很小, 这会直接影响光纤通信的中继距离。与 LD 比较起来, LED 与光纤的耦合效率要低得多。一般来说, LD 与单模光纤的耦合效率为 30%~50%, 多模光纤为 70%~90%; LED 与单模光纤的耦合效率非常低, 只有百分之几甚至更小, 提高 LED 与光纤的耦合效率是一个很重要的现实问题。

耦合效率定义为入纤的光功率与发光管发出的功率之比, 影响耦合效率的主要因素是光源的发散角和光纤的数值孔径。发散角大, 耦合效率低; 数值孔径大, 耦合效率高。此外, 光源发光面和光纤端面的尺寸、形状及两者之间的距离都会影响耦合效率。设光源的半径为 r_s , 光纤的纤芯半径为 a , 则入纤光功率计算公式为

$$P = P_s (\text{NA})^2, \quad r_s \leq a \quad (3.34a)$$

$$P = P_s \left(\frac{a}{r_s}\right)^2 (\text{NA})^2, \quad r_s > a \quad (3.34b)$$

$$P = 2P_s n_1^2 \Delta \left[1 - \frac{2}{\gamma + 2} \left(\frac{r_s}{a}\right)^\gamma\right] \quad (3.34c)$$

其中, NA 为光纤的数值孔径, P_s 为 LED 发出的光功率, 其中式(3.34a)和式(3.34b)两式适用于阶跃光纤, 式(3.34c)式适用于渐变光纤。式(3.34)应用的前提条件是 LED 与光纤之间介质的折射率 n 与光纤折射率 n_1 完全匹配, 否则入纤功率将减少, 减少系数为

$$R = \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n}\right)^2 \quad (3.35)$$

LED 与光纤的耦合一般采用两种方法,即直接耦合与透镜耦合。直接耦合是将光纤端面直接对准光源发光面进行耦合的方法。当光源发光面积大于纤芯面积时,这是唯一有效的方法。这种直接耦合的方法结构简单,但耦合效率低。

当光源发光面积小于纤芯面积时,可在光源与光纤之间放置透镜,使更多的发散光线会聚进入光纤来提高耦合效率。如图 3.21 所示为面发光二极管与光纤的透镜耦合,其中图 3.21(a)中光纤端部做成球透镜,图 3.21(b)中采用截头透镜,图 3.21(c)中采用集成微透镜。采用这种透镜耦合后,其耦合效率在 10%左右。

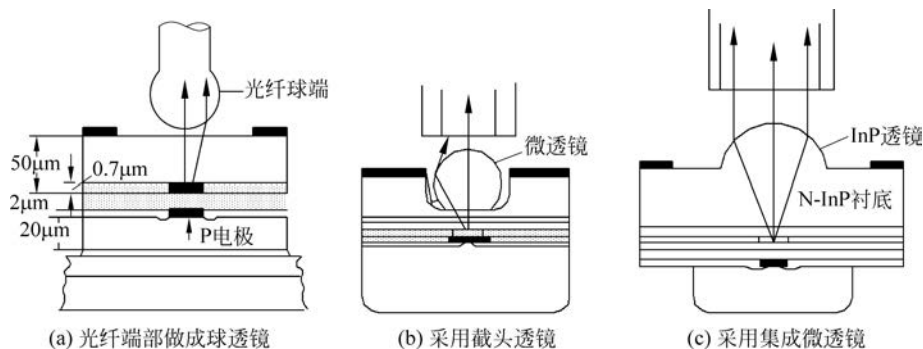


图 3.21 面发光二极管与光纤的透镜耦合

对于发散光束非对称的边发光二极管和半导体激光器可以利用圆柱透镜的方法,如图 3.22(a)和图 3.22(b)所示。或者利用大数值孔径的自聚焦透镜,其耦合效率可以提高到 60%,甚至更高。单模光纤和半导体激光器的耦合可以采用如图 3.22(c)所示自聚焦透镜或者在光纤端面用电弧放电形成半球透镜的方法。

实际上,许多光源供应商提供的光源都附有一小段光纤,即尾纤,以保证连接总是处于最佳功率耦合状态。

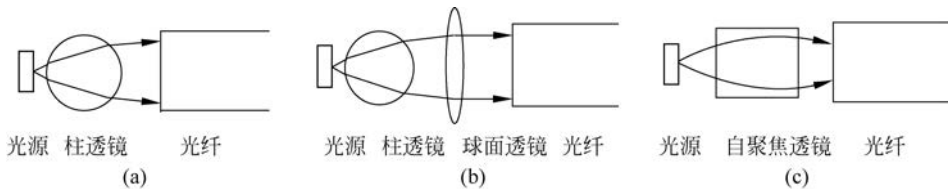


图 3.22 光源与光纤的透镜耦合

3.2.4 LED 技术参数

LED 的典型技术参数如表 3.2 所示。

表 3.2 LED 的典型技术参数

有源层材料	类 型	辐射波长/nm	谱宽/nm	耦合功率/ μ W	正向电流/mA	上升/下降时间/ns
AlGaAs	ELED	850	35~65	10~80	60~100	2/2~6.5/6.5
GaAs	SLED	850	40	80~140	100	—
GaAs	ELED	850	35	10~32	100	6.5/6.5
InGaAsP	SLED	1300	110	10~50	100	3/3
InGaAsP	ELED	1300	25	10~150	30~100	1.5/2.5
InGaAsP	ELED	1550	40~70	10~150	200~500	1.5/2.5

3.3 光发射机

3.3.1 模拟光发射机

按照光纤通信系统传输的是模拟信号还是数字信号,可以分为模拟传输系统和数字传输系统,采用的光发射机分别称为模拟光发射机和数字光发射机。从对激光器的调制来看,两者采取的调制方式分别是模拟调制和数字调制。

输入到光发射机的电信号要转换成适合驱动光源的电流信号后,才能加到光源上。电流信号可以是模拟信号(如有线电视系统中使用的视频信号),也可以是数字信号(如计算机数据),由光源输出的光功率与驱动电流的关系可知,当输入信号是模拟信号时,选择合适的工作点,可以得到变化规律相同的光功率信号。显然,输出特性的线性度越高,电光转换时的失真就越小。图 3.23(a)为模拟信号对光源调制的工作过程,图 3.23(b)为数字信号对光源调制过程。

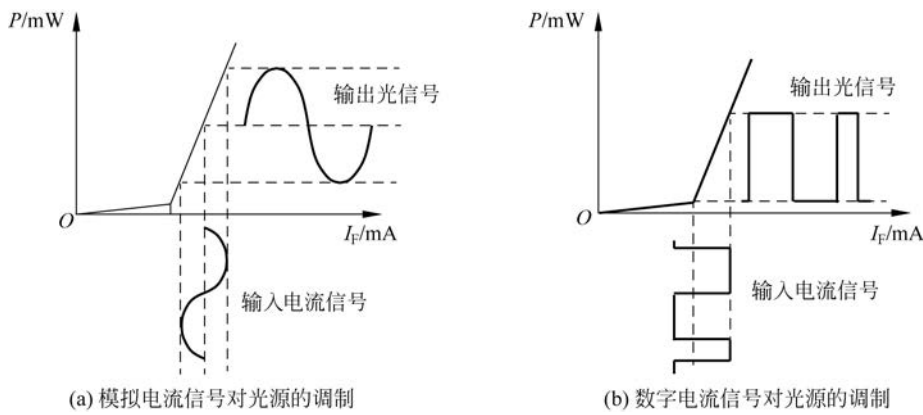


图 3.23 电信号对光源的调制过程

数字光发射机的功能是把电端机输出的数字基带电信号转换为光信号,并用耦合技术有效注入光纤线路,电光转换是用承载信息的数字电信号对光源进行调制来实现的。调制分为直接调制和外调制两种方式。受调制的光源特性参数有功率、幅度、频率和相位。这里着重介绍在实际光纤通信系统得到广泛应用的直接光强(功率)调制。

模拟光发射系统对其中光源的线性度要求较高,所以非线性补偿电路是模拟光发射机中的重要功能部件。图 3.24 为用于有线电视传输系统中的光发射机外形,表 3.3 是其主要技术指标。



图 3.24 模拟光发射机外形(宇成鹏展科技有限公司提供)

表 3.3 模拟光发射机主要技术指标

类 别	测 试 项 目	测 试 数 据
光特性	光波长/nm	1310±20
	光功率/mW	2、4、6、8、10、12、14、16、18、20
	CNR/dB	51
	CNR/dB	—65
	CSO/dBc	—60
	连接器	FC/APC

续表

类 别	测 试 项 目	测 试 数 据
射频特性	频率范围/MHz	47~750、47~860
	输入阻抗/ Ω	75
	控制范围/dB	$\pm 3/\pm 0.3$
	输入反射损耗/dB	$\geq 14、\geq 12$
	输入电平/ $\text{dB}\mu\text{V}$	80 ± 5
	带内平坦度/dB	$\pm 0.75、\pm 1$

模拟光发射机的指标主要有载噪比(CNR)、复合二阶失真(CSO)和复合三阶差拍(CTB),它们反映了光发射机的非线性失真特性。

光发射机一般通过微处理系统提供自动调整光功率输出(APC)、自动调整制冷电流(ATC)及自动调制度调整(AMC)等功能,以保证激光器的最佳工作环境。

3.3.2 数字光发射机

光发射机的主要功能部件有驱动电路、自动功率控制电路、温度控制电路等,对于数字光发射机,电形式的数字信号通过输入接口后,必须经过码型变换,将普通的二进制双极性信号转换成适合在光纤中传输的码型信号,然后送至驱动电路,完成这一功能的部件称为线路编码单元,如图 3.25 所示。

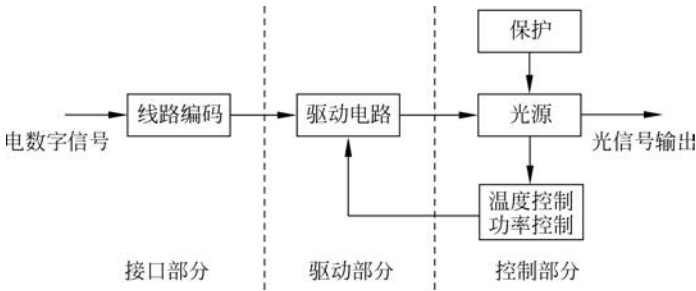


图 3.25 数字光发射机的组成

1. 线路编码单元

线路编码之所以必要,是因为电端机输出的数字信号是适合电缆传输的双极性码,而光源不能发射负脉冲,所以要变换为适合于光纤传输的单极性码。

数字光纤传输系统中常采用的码型是 5B6B 和插入码。5B6B 是将输入的码流分成 5 比特为一组,然后把每组编成 6 比特输出。通过这样的方式,可以达到平衡码流、避免码流中出现长连 0 和连 1 码,使码流中的时钟易于提取。5B 为一组,共有 32 个状态;6B 为一组,共有 64 个状态。要在 64 个状态中选出 32 个代替 5B 的状态对应,选择的方法很多,原则是使 0 和 1 的分布比较均匀。表 3.4 给出了一种编码方案。

表 3.4 5B6B 编码方案

输入码字(5B)		输出码字(6B)		输入码字(5B)		输出码字(6B)	
		模式 1	模式 2			模式 1	模式 2
0	00000	110010	110010	3	00011	100011	100011
1	00001	110011	100001	4	00100	110101	100100
2	00010	110110	100010	5	00101	100101	100101

续表

输入码字(5B)		输出码字(6B)		输入码字(5B)		输出码字(6B)	
		模式 1	模式 2			模式 1	模式 2
6	00110	100110	100110	19	10011	010011	010011
7	00111	100111	000111	20	10100	110100	110100
8	01000	101011	101000	21	10101	010101	010101
9	01001	101001	101001	22	10110	010110	010110
10	01010	101010	101010	23	10111	010111	010100
11	01011	001011	001011	24	11000	111000	011000
12	01100	101100	101100	25	11001	011001	011001
13	01101	101101	000101	26	11010	011010	011010
14	01110	101110	000110	27	11011	011011	001010
15	01111	001110	001110	28	11100	011100	011100
16	10000	110001	110001	29	11101	011101	001001
17	10001	111001	010001	30	11110	011110	001100
18	10010	111010	010010	31	11111	001101	001101

插入码是把输入的二进制原始码流分成 m 比特一组,然后在每组 mB 码的末尾插入一个码,根据该插入码的用途,可以分成 $mB1C$ 、 $mB1H$ 和 $mB1P$ 。

$mB1C$ 中 C 码称为补码,它实际上是第 m 位的补码,如果第 m 位为 1,则补码为 0,反之为 1。 $mB1H$ 中的 H 称混合码,它可以用于在线误差检测、区间通信或者是帧同步、公务、数据、监测等信息的传送。 $mB1P$ 中的 P 码是奇偶校验码,当 m 位码内 1 的个数为奇数时,则 P 码为 1,反之为 0。

输入数据的码型变换可以由编码器实现。由于对激光器的驱动必须是串行的数据脉冲,所以编码器的最后输出需将并行数据转换成串行形式。

2. 驱动电路

驱动电路的形式很多,图 3.26 为一种 LED 驱动电路的原理图。当数字信号为 0,即 u_{in} 为低电平时,三极管 VT 截止,LED 中没有电流流过,因此不发光;当数字信号为 1, u_{in} 为高电平,三极管 VT 饱和导通,LED 中有电流流过,所以发光。可见 LED 的光输出反映了输入数字信号的变化。

图 3.27 为 LD 的常用驱动电路。其工作原理如下: VT_2 管的基极加一个固定电压 U_B ,输入数字信号电压 u_{in} 加在 VT_1 管的基极,当 u_{in} 为高电平 1 时, $u_{in} > U_B$, VT_1 管导通, VT_2 管截止,LD 无光输出;以此类推,LD 在 u_{in} 为低电平时将输出光信号。通过控制 U_B 的大小,可使三极管工作在非深度饱和和深度截止状态,从而缩短开关转换时间,实现高速率的调制。

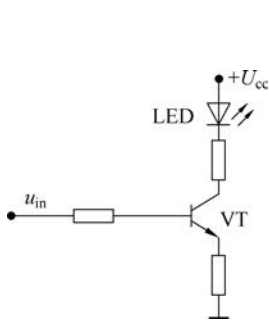


图 3.26 LED 驱动电路的原理图

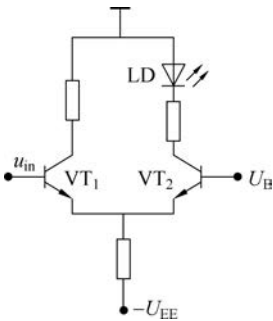


图 3.27 LD 的常用驱动电路

目前,数字光发射机的产品常以光发射模块的形式出现,线路编码单元通常不作为光设备的一个组成部分包括在其中,随着现代通信的发展,为了方便使用,将光发射和光接收的功能做在同一块芯片上,称为光收发合一模块。表 3.5 给出了工作波长为 1550nm、应用于 2.5Gb/s SDH STM-16 光纤传输系统、最长传输距离 120km 的光发射模块的技术指标,其中的输出光功率是指当发射机发送伪随机序列信号时,在它输出端所测得的平均功率;消光比是表示数字信号为 1 时与表示数字信号为 0 时平均光功率之比。

表 3.5 光发射模块 TX5S331A 技术指标

参 数	范 围	参 数	范 围
传输速率/(Mb/s)	2488.32	消光比/dB	>8.2
中心波长/nm	1535~1565	功耗/W@25℃	<4
输出光功率/dBm	≥-4	波长变化/nm,DWDM 特定波	<0.16
谱宽/(nm,-20dB)	<0.3	使用温度/℃	0~60
边模抑制比/dB	>30	电源/V	±5.0

3.4 外调制器

3.4.1 外调制器的特点和类型

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的限制和光源啁啾效应的存在,使得这种方式无法应用在 2.5Gb/s 以上的高速率光纤通信系统中。此时,必须使用外调制器。图 3.28 为外调制光发射机的基本组成。外调制下的光源是在直流状态下工作,因而避免了激光器的啁啾效应。

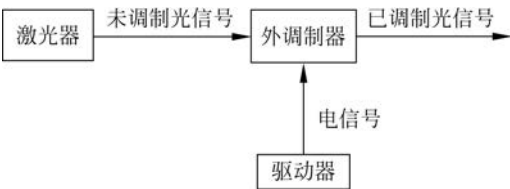


图 3.28 外调制光发射机的基本组成

1. M-Z 型电光强度调制器

图 3.29 是 M-Z 型调制器结构示意图,它用铌酸锂晶体(LiNbO₃)制成,其中的光波导是在晶体上用钛扩散技术制作而成的。电信号加到如图 3.29 所示的电极上,来自激光器的连续波输入到调制器的左端,然后被均匀地分配到两个臂中,经过电信号的调制后从右端输出。M-Z 型电光强度调制器的转移特性可表示为

$$P = \frac{P_S}{2L_e} \left[1 + \sin\left(\pi \frac{V}{V_\pi} + \varphi_b\right) \right] \tag{3.36}$$

其中, P_S 是入射光功率, L_e 是附加损耗, V_π 称作半波电压,它取决于调制器材料和尺寸, V 是调制电信号, φ_b 是配置相位,它取决于波导结构。图 3.30 画出了调制器 P - V 归一化关系曲线,可以看到,输出光与调制电压在一定范围内呈现线性的关系。

2. 多量子阱电吸收调制器

多量子阱电吸收(Multiple Quantum Well ElectroAbsorption, MQW-EA)调制器可将外调制器与激光器 DFB 集成为一体,其体积小,制造成本低,避免了 M-Z 型调制器的主要缺点,

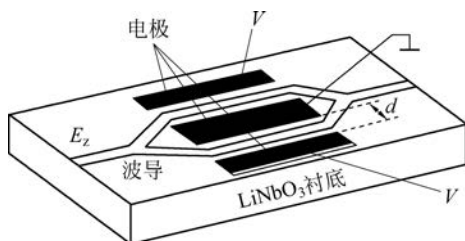


图 3.29 M-Z 型调制器结构示意图

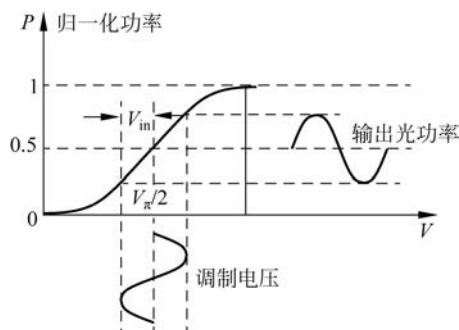


图 3.30 P-V 调制曲线

即 M-Z 型调制器要求较高的调制电压(10V),并且有较大的插入损耗。

该调制器工作过程是:由 DFB 激光器辐射的连续光波穿过由半导体材料构成的波导管。当不加电压时,因为波导管的截止波长小于入射光的波长,所以 DFB 激光器发射的光可顺利穿过波导管;当加上调制电压后,波导材料的禁带宽度变小,因而截止波长增大,波导材料开始吸收入射光,也即电场对光的作用等效成一个衰减器。转移特性表示为

$$P = P_0 \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \right] \quad (3.37)$$

其中, V 是调制电压, α 是和调制器的结构有关,对于 MQW 型,该值为 $2 \sim 4$, P_0 为调制电压为零时的输出光功率, V_0 为常数。光纤通信系统对调制的要求是:高的调制速率和宽的调制带宽;低的驱动电压;低的插入损耗;高消光比。

3.4.2 外调制器工作原理

外调制器通常是基于晶体的电光、声光、磁光等效应或者晶体对光频的吸收作用工作的。以晶体的电光效应为例,当把电压加到晶体上的时候,将使晶体的折射率发生变化,结果引起通过该晶体的光波特性发生变化,晶体的这种性质称为电光效应。

图 3.31 示出了 LiNbO₃ 波导相位调制器的结构,条形波导是通过在 x 切割的 LiNbO₃ 衬底上用钛扩散技术制造的,宽 $9\mu\text{m}$ 、长 1cm 。调制电场 E_z 加在 z 方向,产生的折射率变化为

$$\Delta n_z = \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_z \quad (3.38)$$

其中, LiNbO₃ 晶体的参数 $n_0 = 2.29$ 是光子折射率, $r_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{m/V}$ 是电光系数,调制场 $E_z = V/d$, V 为调制信号电压, d 为电极间的距离。

传输光波在波导中产生的相位变化为

$$\Delta \varphi = \frac{\omega}{C} \Delta n_z L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} \frac{V}{d} \cdot L = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (3.39)$$

其中, L 为波导长度, V_π 称为半波电压,有

$$V_\pi = \frac{\lambda}{n_0^3 r_{33}} \left(\frac{d}{L} \right) \quad (3.40)$$

由于条形波导的 L/d 很大,使得半波电压大大下降。对于如图 3.31 所示的相位波导调制器,调制电极间距 $8\mu\text{m}$,半波电压仅为 0.85V 。在相位匹配的行波状态下,调制带宽达 5GHz 。

LiNbO₃ 晶体端面进行增透处理,单模尾纤用 V 形槽和 UV 环氧树脂粘胶。在波长为 1550nm 时,光纤→波导→光纤的 TE 模插入损耗仅 1.8dB 。

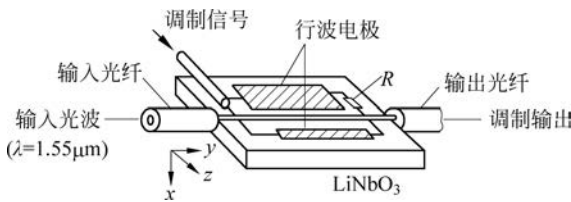


图 3.31 LiNbO₃ 波导相位调制器

因为相位调制信号的解调比较困难,所以在目前的光纤通信系统中,多采用强度调制/直接检测方式。M-Z 型电光强度调制器和多量子阱电吸收 MQW-EA 调制器是目前高速通信系统中的优选器件之一。对于 M-Z 型调制器,两臂各自的相对相位延迟分别为

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot n_e^3 r_{33} V \cdot \frac{L}{d} \tag{3.41}$$

$$\varphi_2 = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot n_e^3 r_{33} V \cdot \frac{L}{d} \tag{3.42}$$

两束光在输出端产生干涉,从而可得到如式(3.36)的功率关系。

3.4.3 外调制器技术指标

调制深度 η_I 的定义为

$$\eta_I = \begin{cases} |I - I_0| / I_0, & I_0 > I_m \\ |I - I_0| / I_m, & I_m > I_0 \end{cases} \tag{3.43}$$

其中, I 为调制波光强, I_0 为不加调制信号时的光强, I_m 为加最大调制信号时的光强。

调制指数 η_φ 的定义为

$$\eta_\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_{\text{eff}} \cdot d \tag{3.44}$$

其中, Δn_{eff} 为导模在外电场作用下产生的折射率增量, d 为电极长度。

半波电压定义为调制指数为 π 时的调制电压。调制带宽定义为

$$\Delta f_m = (\pi RC)^{-1} \tag{3.45}$$

其中, R 是调制器等效电路中与电容 C 并联的负载电阻, C 是调制器的集总电容,包括电极、连接器和引线电容,但主要由电极电容确定。

外调制器的技术指标还有最大调制频率、单位带宽驱动功率、插入损耗和消光比等。

M-Z 型电光强度调制器的调制深度可达 80%,半波电压约为 3.6V,调制带宽可达 17GHz,功耗 35μW/MHz。表 3.6 列出了工作速率为 10Gb/s LiNbO₃ 调制器的技术指标。

表 3.6 LiNbO₃ 调制器的技术指标

参 数		范 围
光学参数	工作波长/nm	1535~1565
	插入损耗/dB	<5
	消光比/dB	>12
	反射损耗/dB	>-40
射频参数	带宽/GHz	>8
	V_π (DC)/V	>5.5
	上升/下降时间/ps	<50

续表

参 数		范 围
偏置	$V_{\pi}(\text{DC})/\text{V}$	<8
	阻抗/ Ω	>1000

本章小结

光源 LD 和 LED 是光纤通信系统的关键器件。LD 基于光的受激辐射机理。LD 发光必须满足一定的阈值条件,主要参数有谱宽、 $P-I$ 特性,根据其光谱的形状,LD 有单纵模和多纵模之分,由于 LD 可以发出单色、定向性好和强度高的相干光,在长途光纤通信系统中得到了广泛的应用。新型的激光器-分布反馈激光器、量子阱激光器和垂直腔面发射激光器也在很多场合得到了普及。

LED 基于光的自发辐射机理。主要类型有面发光二极管和边发光二极管。LED 的谱宽较宽,在低速率的数字通信和较窄带宽的模拟通信系统中,LED 是可以选用的最佳光源。由于 LED 的辐射角较大,存在与光纤耦合的问题。

数字光发射机的主要参数有输出功率、消光比,应根据应用场合合理选用。

外调制器主要用在高速光纤通信系统中,它基于晶体的电光、声光、磁光等效应或者晶体对光频的吸收作用工作。对于电光晶体,晶体的折射率随着调制电压的变化而变化,从而引起通过该晶体的光波特性发生变化。由于激光器工作在直流状态,所以消除了光源啾啾。常用的类型是 M-Z 型电光强度调制器和多量子阱电吸收 MQW-EA 调制器。

习题

- 3.1 能带与能级的区别是什么?
- 3.2 半导体激光器发射光子的能量近似等于材料的禁带宽度,已知 GaAs 材料的 $E_g = 1.43\text{eV}$,某一 InGaAsP 材料的 $E_g = 0.96\text{eV}$,求它们的发射波长。
- 3.3 激光出射的条件是什么?
- 3.4 常用的激光器材料有哪些?
- 3.5 半导体发光二极管与半导体激光器发射的光子有什么不同?
- 3.6 InGaAsP 半导体激光器工作波长是 1300nm ,腔长为 $250\mu\text{m}$,损耗系数 $\alpha = 30\text{dB/cm}$,解理面反射率 $r_1 = r_2 = 0.31$,试求增益阈值。
- 3.7 某 GaAs 激光器发光波长为 800nm ,其谐振腔长为 $400\mu\text{m}$,材料折射率 $n = 3.6$,设在波长 $750\sim 850\text{nm}$ 的范围内增益大于总损耗系数,求在该激光器中的模式数量。
- 3.8 光电效率有哪几种表示方法? 并解释它们的含义。
- 3.9 某激光器的斜度效率 dP/dI 是 0.095mW/mA ,工作波长是 1500nm ,计算外微分量子效率。
- 3.10 设激光器中载流子数目 n 的关系满足

$$\frac{\delta n}{\delta t} = \frac{J}{qd} = \frac{n}{\tau}$$

其中, τ 是载流子的寿命,证明 $t_d = \tau_e \ln\left(\frac{J}{J - J_{th}}\right)$ 。

- 3.11 试述 RIN 的定义。
- 3.12 激光器的 $RIN = -135 \text{ dB/Hz}$, 接收机带宽 1 GHz , 接收到的平均功率为 $25 \mu\text{W}$, 求在接收机端接的 LD 噪声功率。
- 3.13 已知某 DFB 激光器的光栅间距 $\Lambda = 0.22 \mu\text{m}$, 衍射光栅有效长度 $L = 300 \mu\text{m}$, 介质折射率 $\bar{n} = 3.5$, 设布拉格衍射阶数 $m = 1$, 求模式波长和它们的间距。
- 3.14 试述 VCSEL 激光器的工作原理。
- 3.15 试述 LED 输出光与光纤耦合的方法。
- 3.16 试述半导体激光器和发光二极管的主要区别。
- 3.17 某发光二极管发出的光功率是 0.75 mW , 光源的半径为 $35 \mu\text{m}$, 纤芯半径为 $25 \mu\text{m}$, 数值孔径 $NA = 0.20$, 求入纤光功率的数值。
- 3.18 某光源折射率为 3.6 , 如果其尺寸小于纤芯尺寸, 并且光纤与光源之间的微小间隙充满折射率为 1.305 的凝胶, 那么从光源到光纤的功率损耗是多少分贝? 设纤芯折射率为 1.465 。
- 3.19 光发射机的性能指标有哪些?
- 3.20 试述外调制器的工作原理。