

1962年9月16日，通用电气公司的罗伯特·霍尔(Robert Hall)带领的研究小组展示了砷化镓(GaAs)半导体的红外发射，这种半导体发出的光具有“奇怪的”干涉图形，这意味着相干激光——首个半导体激光器的诞生。

左图是 Gunther Fenner, Robert Hall 和 Jack Kingsley 在通用研究实验室(1962年)。

第3章 光源和光发送机

光纤通信中光源的作用是把需要传送的电信号转换成光信号，常用的光源有激光二极管(LD，也称半导体激光器)和发光二极管(LED)两种。随着光纤的发展，半导体光源也得到了同步发展。光发送机包括激光器驱动和调制电路、功率自动控制电路等，其输入的是需要传送的电信号，而输出是经过调制的光信号。

光纤通信中使用的LD/LED和一般光电子应用技术中的LD/LED不同，光纤通信中对光源谱线宽度、调制带宽等特性有更高的要求。学习时注意区别，普通的LD和光纤通信用LD到底有何不同？常见的激光笔能用作光纤通信的光源吗？

3.1 发光二极管

3.1.1 半导体的光辐射

半导体光电器件的物理基础是光和物质的相互作用，包括受激吸收、自发辐射、受激辐射3种形式。

1. 能级图

物质是由原子组成的，原子由一个带正电荷的原子核和若干个带负电荷的电子组成。电子围绕原子核做轨道运动，电子的运动轨道不是连续的，电子只能沿着某些可能的轨道绕原子核运转，而不是任意的轨道。也就是说，原子内部的电子处于不同的能量轨道上，电子在每一个轨道上运动时具有确定的能量，离原子核较近的轨道对应的能量较小，离原子核较远的轨道所对应的能量较大。这些能量值称为原子的能级，通常用一系列的水平横线来表示原子内部的能量关系，称为能级图，如图3-1所示。

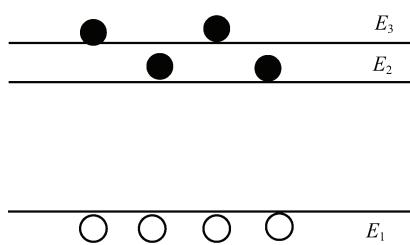


图3-1 原子能级图

电子由于发射或吸收光子而从一个能级改变到另一个能级称为跃迁，但原子发射或吸收光子，只能出现在某些特定的能级之间。当原子中的电子与外界有能量交换时，电子就在不同的能级之间跃迁，并伴随有能量如光能、热能等的吸收与释放。

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，各能级上的原子数服从玻耳兹曼统计分布，即

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) \quad (3-1)$$

式中， $k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，为波耳兹曼常数， 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。 $N_2 > N_1$ 的分布和正常状态 ($N_1 > N_2$) 的分布相反，称为粒子（电子）数反转分布。在半导体激光器中，需要得到粒子数反转分布的状态，这个问题将在后面叙述。

2. 辐射与吸收

(1) 自发辐射

处于高能级的电子状态是不稳定的，它将自发地从高能级 E_2 (在半导体中是导带的一个能级) 运动 (称为跃迁) 到低能级 E_1 (在半导体中是价带的一个能级) 与空穴复合，同时释放出一个光子，如图 3-2 所示，由于不需要外部激励，所以该过程称为自发辐射。

根据能量守恒定律，自发辐射光子的能量为 E_g ，可计算出光的波长 λ

$$\begin{aligned} E_g &= \Delta E = E_2 - E_1 \\ E_g &= hf = hc / \lambda \\ \lambda &= hc / (E_2 - E_1) \end{aligned} \quad (3-2)$$

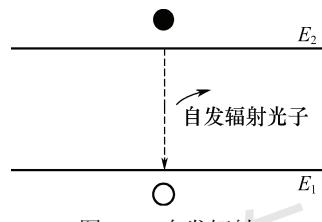


图 3-2 自发辐射

式中， h 为普朗克常数，其值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； c 为光速，其值为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ； f 为光子频率； E_2 为高能级能量； E_1 为低能级能量。

如果原子能量和能级差用电子伏 (eV) 表示， $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，式 (3-2) 可表示为

$$\lambda(\text{nm}) = 1240 / E_g (\text{eV}) \quad (3-3)$$

从上面的公式可以看到，光源的波长是由材料的能级决定的，材料的能级是由材料本身的特性决定的。不同材料的能级不同，辐射光波的波长也就不同。

比如，LED 材料的能级差 2.5 eV ，该能级差等于单个光子的能量，即 $E_p = E_g$ ，根据式 (3-2)，计算波长 $\lambda = hc / E_p = 500 \text{ nm}$ ，该 LED 辐射的光是绿色光。

【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_p 等于多少呢？假设光源的功率为 1 mW ，光源每秒发射的光子数是多少呢？

解：根据公式得

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

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 $N = E / E_p = 3.3 \times 10^{15}$ 。

从本题可以看到，尽管单个光子的能量很小，但功率 1 mW 的光源，每秒发射的光子数目仍然大得惊人。试想一想，我们能否准确地测量到底有多少个光子呢？

(2) 受激吸收

在外来光子激励下，电子吸收外来光子能量而从低能级跃迁到高能级，变成自由电子。当

处于低能级 E_1 的电子，受到光子能量恰好为 $E_p = \Delta E = E_2 - E_1$ 的外来入射光的照射时，电子吸收一个这种光子而跃迁到高能级 E_2 ，这种跃迁称为受激吸收，如图 3-3 所示。

如果材料受到外来入射光的照射，当光子能量 E_p 不等于材料的能级差 $\Delta E = E_2 - E_1$ 时，则光子不会被吸收。比如，当太阳光照射到玻璃窗时，屋外感觉明亮，屋内感觉光较弱，就是因为部分光被吸收，反映出的结果就是玻璃温度升高，变热了；其次，有部分光透过玻璃，是因为这部分光子没有被吸收。

(3) 受激辐射

当处于高能级 E_2 的电子，受到光子能量恰好为 $E_p = \Delta E = E_2 - E_1$ 的外来入射光的照射时，电子在入射光子的刺激下，跃迁回到低能级 E_1 ，而且辐射出一个与入射光子有相同频率、相同相位和相同传播方向的光子，这种类型的跃迁称为受激辐射，如图 3-4 所示。

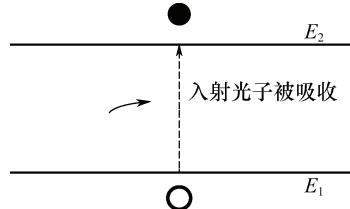


图 3-3 受激吸收

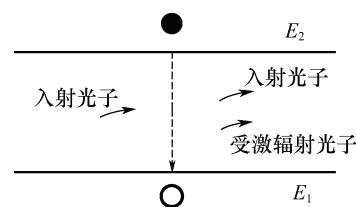


图 3-4 受激辐射

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。

3. 半导体能带

半导体是由大量原子周期性地有序排列构成的，当大量原子结合成晶体后，邻近原子中的电子态将发生不同程度的交叠，原子间的影响将表现出来。原来围绕一个原子运动的电子，现在可能转移到邻近原子的同一轨道上去，晶体中的电子不再属于个别原子所有，它们一方面围绕每个原子运动，同时又要在原子之间做共有化运动，因此，晶体的能谱在原子能级的基础上按共有化运动的不同而分裂成若干组。每组中能级彼此靠得很近，形成有一定宽度的带，成为能带，也就是说，原来的能级已经转变成能带，如图 3-5 所示。

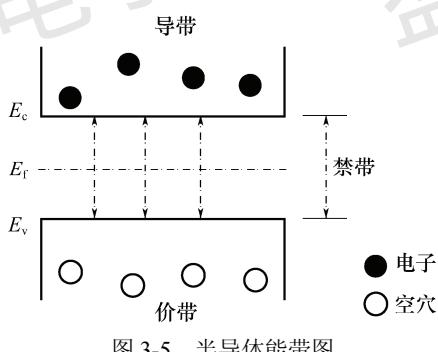


图 3-5 半导体能带图

导带是半导体能量最高的一个能带 E_c ，是自由电子（简称为电子）所处的能量范围；原子轨道能级所形成的低能量带称为能级的价带；导带和价带之间不允许电子填充，所以称为禁带，导带的能量 E_c 和价带顶的能量 E_v 之间的能量差 $E_c - E_v = E_f$ ，称为禁带或带隙，禁带是产生本征激发所需要的最小平均能量。

我们将在能级 E 上找到电子的概率看作是 E 的函数，并且假定各能级之间足够接近以形成连续的能带。电子占据能带（导带）中某个能级 E 的概率称为费米分布 $f(E)$ 。

根据量子统计理论，在热平衡状态下：当 $T > 0K$ ，即温度高于热力学零度时，热能将激发一些电子，使它们占据能级 E ，其费米分布为

$$f(E) = \left(1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right) \right)^{-1} \quad (3-4)$$

式中, k_B 为玻耳兹曼常数, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为热力学温度; E_f 称为费米能级。在热平衡状态下, 费米能级被电子和空穴占据的概率相同。

当 $T \rightarrow 0K$ 时, 即温度接近热力学零度时, 低于 E_f 以下的能级, 费米分布 $f(E) \rightarrow 1$, 也就是说, 价带填满了电子; 高于 E_f 的能级, 费米分布 $f(E) \rightarrow 0$, 即导带没有电子。

为什么会这样呢? 这是因为没有电子拥有足够的能量跃过禁带。一旦有外部能量, 一些电子获得足够的能量跃过禁带, 占据导带的能级, 称为受激电子, 受激电子在价带留下正电荷载体——空穴。导带的电子和价带的空穴是成对出现的, 统称为载流子。

完全不含杂质且无晶格缺陷的纯净半导体称为本征半导体。本征半导体中, 电子和空穴是成对出现的, 费米能级位于禁带中间位置。

为了使电子更容易跃过禁带, 可以在本征半导体中掺入其他物质的原子, 以便产生大量的电子和空穴。在本征半导体中掺入施主杂质, 导带的电子增多, 价带的空穴相对减少, 称为 N 型半导体, 掺杂使得半导体中的能量分布发生变化, N 型掺杂使得费米能级向导带移动。在本征半导体中掺入受主杂质, 导带的电子减少, 价带的空穴相对增多, 称为 P 型半导体, P 型掺杂使得费米能级向价带移动。

当 P 型半导体和 N 型半导体结合形成结后, 由于载流子向对方互相扩散的结果, 使 N 区的费米能级降低, P 区的费米能级升高, 达到热平衡时, 形成了统一的费米能级。

3.1.2 发光二极管的原理

1. LED 的发光原理

发光二极管 (LED) 的核心是由 P 型半导体和 N 型半导体组成的半导体材料晶片, 在 P 型半导体和 N 型半导体之间有一个过渡层, 称为 PN 结。当在衬底上生长一个 P 型半导体层与一个 N 型半导体层时, 一个 PN 结就形成了。LED 的发光原理如图 3-6 所示。

在 P 型和 N 型半导体组成的 PN 结上, 由于存在多数载流子 (电子或空穴) 的梯度, 产生载流子扩散运动, P 区的空穴向 N 区扩散, 而 N 区的电子向 P 区扩散, 空穴和电子可以直接结合, 释放出光子。

由于载流子的扩散运动, 靠近 PN 结的 P 区一侧留下了不能移动的带负电的离子, N 区一侧留下了不能移动的带正电的离子, 因此, 在 PN 结及其附近形成内部电场, 方向从 N 区指向 P 区。内部电场的产生又会反过来使载流子产生与扩散运动相反的漂移运动, 二者达到动态平衡。此时 PN 结内缺乏载流子, 电阻很大, 该区域称为耗尽区。

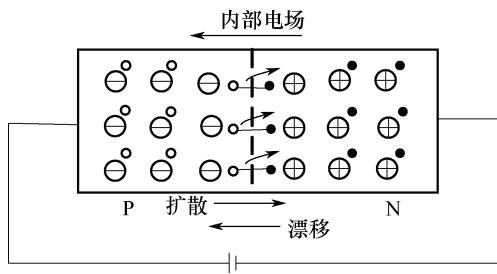


图 3-6 LED 的发光原理

在半导体的 PN 结上, 外加正向偏压 (P 端接正, N 端接负), 正向偏压在 PN 结产生一个

与内部电场方向相反的电场，内部电场减弱，空穴由 P 区流向 N 区，电子则由 N 区流向 P 区，空穴和电子可以直接复合，在复合的过程中，能量以光的形式释放出光子，这就是 LED 的发光原理。电子和空穴之间的能量（带隙）越大，产生的光子能量就越高，施加正向电压的作用是吸引 N 区电子和 P 区空穴复合。

2. LED 的结构

LED 主要由 PN 结、电极、光学系统及附件等组成。传统的 LED 大多是利用砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)或它们的组合晶体(GaAsP)等III-V族半导体构成的。

根据 LED 的结构，LED 分为两种类型：正面发光型 LED 和侧面发光型 LED。

正面发光型 LED，即 SLED，输出光的方向垂直于 PN 结平面，如图 3-7 所示。光辐射功率呈朗伯分布，即 $P(\theta)=P_0 \cos \theta$ ，式中， θ 为观测方向与法线之间的夹角， P_0 为出光面法线方向的光功率。半功率点辐射角约 120° ，朗伯源产生的功率的一半都集中在一个 120° 的圆锥之中。

侧面发光型 LED，即 ELED，输出光的方向平行于 PN 结平面，如图 3-8 所示。半功率点辐射角水平方向约 120° 、垂直方向约 30° ，由于半功率点辐射角大，

LED 与光纤的耦合效率一般小于 10%，入射到光纤的功率只有几百微瓦。

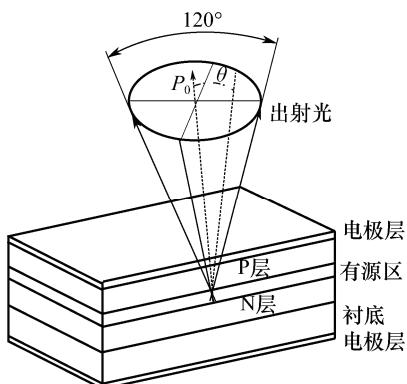


图 3-7 正面发光型 LED

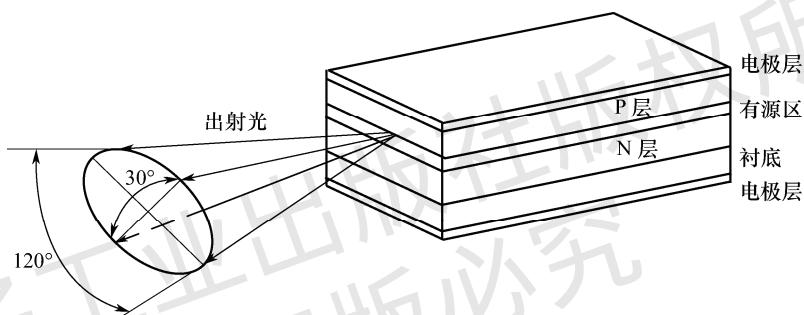


图 3-8 侧面发光型 LED

同质结 LED 的结构特点是两种半导体有相同禁带，缺点是激活区太发散、效率低、光束太宽。实际的 LED 产品大都是异质结结构，异质结结构的内容可参考本章 3.2 节内容。

3.1.3 发光二极管的特性

1. 光谱特性

(1) 波长

LED 的发光波长由半导体禁带决定，我们无法改变单一物质的能级，也无法改变它们的禁带，因此为了得到一个特定的波长，可选择由几种不同成分的材料构成的半导体化合物以得到特定的禁带宽度。例如，砷化镓(GaAs)的禁带为 1.42eV ，但是半导体化合物砷化镓铝(GaAlAs)就可以得到 $1.42\sim1.92\text{eV}$ 不等的禁带。

短波长 LED 由半导体化合物材料 GaAlAs 制成，各元素成分掺杂的比例不相同，一般用 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 表示，其中 x 表示成分数(摩尔比)， $0 \leq x \leq 0.37$ ，这样的材料的带隙能量

$$E_g(\text{eV}) = 1.424 + 1.266x + 0.266x^2 \quad (3-5)$$

但 $x > 0.37$ 时, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 中的电子将不再是直接带隙跃迁, 因此该材料在波长 $< 650\text{nm}$ 以下时不能产生有效的受激辐射。

对于长波长 LED, 常用的材料为四元合金 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, 其中 x 和 y 表示成分数, 当 $0 \leq x \leq 0.47$, $y=2.2x$ 时, 这样的材料的带隙能量

$$E_g(\text{eV}) = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2 \quad (3-6)$$

选择合适的 y 和 x , 可以使得 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的发射波长为 $1300\text{~}1600\text{nm}$, 适合在光纤的低损耗窗口传送。

【例 3-2】已知材料 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 中, x 满足 $0 \leq x \leq 0.37$, 求这样的 LED 能覆盖的波长范围。

解: 根据式 (3-5) 计算得

$$1.424 \leq E_g \leq 1.93$$

由公式 $\lambda(\text{nm}) = 1240/E_g(\text{eV})$, 可得波长范围为 $640\text{nm} \leq \lambda \leq 870\text{nm}$ 。

(2) 谱线宽度

光源的谱线宽度是指当光功率下降到峰值功率的一半时所对应的两个波长的差, 即半功率带宽, 简称谱宽, 或者线宽, 如图 3-9 所示, 图中光功率用相对功率表示, 峰值功率为 1, 半功率为 0.5。

LED 发出的光是自发辐射光, 由于在价带和导带之间的能级不是一个, 而是多个能级参与了自发辐射过程, 位置高于禁带的能级邻近的波长都可以被辐射, 多波长辐射的结果导致了 LED 的谱线宽度较宽。

第一代光纤通信用的 LED 是短波长 850nm , 由砷化镓/砷化镓铝 ($\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$) 材料制成的, LED 谱线宽度为 $30\text{~}50\text{nm}$; 第二代光纤通信用的 LED 是长波长, 由磷化砷铟镓/磷化铟 ($\text{InGaAsP}/\text{InP}$) 材料制成的, 辐射波长为 1310nm 或 1550nm , LED 谱线宽度为 $60\text{~}120\text{nm}$ 。

随着温度升高或注入电流增大, LED 的谱线宽度加宽。

随着温度升高, LED 的峰值波长向长波长方向移动, 短波长和长波长 LED 的移动分别为 $0.2\text{~}0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.3\text{~}0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

2. 输出光功率特性

LED 的发射功率与注入电流的关系 ($P-I$ 曲线) 如图 3-10 所示, LED 的发射功率正比于工作电流。显然, 当工作电流增大时, 导带中被激发的电子数目将增多, 同时有更多的光子被发射。工作电流较小时, $P-I$ 曲线的线性较好; 工作电流过大时, 由于 PN 结发热产生饱和现象, 使 $P-I$ 曲线的斜率减小, 当温度升高时, 相同的工作电流下, LED 的发射功率约减小一半。典型的 LED 工作电流为 $50\text{~}100\text{mA}$, 输出功率为几毫瓦。

3. 电特性

LED 和电子线路中的二极管类似, 也有电特性参数。

① 正向电压、电流, 指维持额定输出功率时 LED 两端的压降和电流。

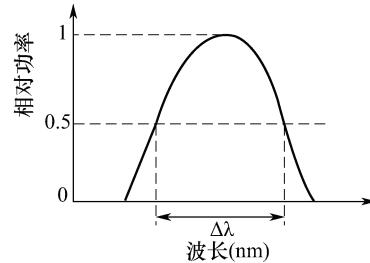


图 3-9 LED 谱线宽度

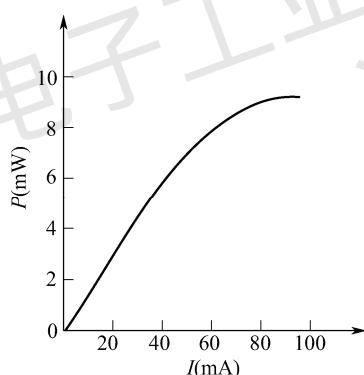


图 3-10 LED 的 $P-I$ 特性

- ② 反向电压，指 LED 击穿前的最大的反向电压。
- ③ 电容特性，其中电荷电容与 PN 结有关，扩散电容与载流子生存期有关。电容特性限制了 LED 的调制带宽。

4. 调制特性

光调制是指用电信号控制光信号的幅度等特性，LED 无光输出，表示电信号“0”；LED 有光输出，表示电信号“1”。LED 的调制带宽可以用输出脉冲功率的上升/下降时间来表示，上升时间 (t_r) 定义为功率从 10% 增加到 90% 所需的时间；下降时间 (t_d) 定义为功率从 90% 减小到 10% 所需的时间，如图 3-11 所示。

LED 的上升时间约 2~4ns。

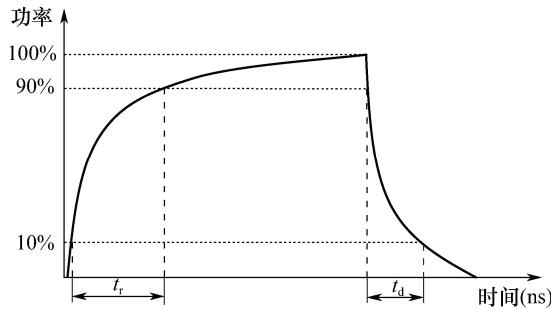


图 3-11 LED 的上升/下降时间

LED 的调制带宽为

$$B = 0.35 / t_r \quad (3-7)$$

上升时间由载流子复合生存期决定。载流子复合生存期是指载流子从激活到被复合之间的一段时间，ns 量级，电子在复合生存期间，不能改变其状态。一般地，LED 的调制带宽为几百 MHz。

值得一提的是，1976 年贝尔实验室在华盛顿亚特兰大建立了一条光纤通信实验线路，使用的是多模光纤，用 LED 做光源，因为当时尚无通信用的半导体激光器，传输速率仅 45Mb/s，只能传输数百路电话。

LED 的带宽用带宽-功率积表示， $B \times P = \text{常数}$ ，也就是说，对于一个 LED 的光纤通信系统，增大 LED 的功率，信号可以传输得更远，但付出的代价是带宽减小了。

5. 封装和应用

LED 封装时，由金属管座、封装连接器、封装尾纤制作成组件。LED 在通信方面的应用包括局域网、FTTx 等短距离的通信领域。

LED 的主要特性参数如表 3-1 所示，使用时可根据需要，选择性能合适的器件。

表 3-1 LED 的主要特性参数

中心波长 (nm)	850	1310
谱线宽度 (nm)	30~50	60~120
光谱温度系数 (nm/°C)	0.75	0.75
谱线宽度温度系数 (nm/°C)	0.2~0.3	0.3~0.5
上升/下降时间 (ns)	6.5/6.5	1.5/2.5
正向电流 (mA)	50~150	30~150
额定电压 (V)	2	2
额定电流 (mA)	200	200
入纤功率 (多模光纤) (μW)	100~300	100~150

【讨论与创新】上网搜索资料，讨论学习下面的问题。

- (1) LED 的谱线宽度与传输速率有什么关系？能否制作出谱线宽度更小的 LED 呢？
- (2) 如何做出调制带宽更大的光源？

3.2 激光二极管

在组成物质的原子中，有不同数量的电子分布在不同的能级上，在高能级上的电子受到某种光子的激发，会从高能级跃迁到低能级上，这时将辐射出与激发它的光相同性质的光，在光反馈状态下，能出现一个强光的现象，称为“受激辐射的光放大”，简称激光。这种光是相干的，也就是传播时不会漫散开，几乎始终保持成一窄束光。1960 年，美国物理学家梅曼 (Meiman) 用一根红宝石棒产生出间断的红光脉冲，发明了世界上第一台红宝石激光器。

1962 年，美国研制成功砷化镓 (GaAs) 同质结半导体激光器，标志着第一代半导体激光器产生，但该激光器只能在液氮温度下工作，无实用价值。直到 1967 年，人们使用液相外延的方法制成了单异质结激光器，实现了在室温下工作的半导体激光器。

1970 年，贝尔实验室和 Leningrad Ioffe 研究所分别实现了双异质结的、在室温下连续工作的半导体激光器，至此之后，半导体激光器得到了突飞猛进的发展。半导体激光器具有许多突出的优点：转换效率高、覆盖波段范围广、使用寿命长、可直接调制、体积小、易集成、调制效率高、调谐方便，且大部分激光器无须制冷，是光纤通信系统理想的光源。

3.2.1 激光二极管的原理

1. 激光二极管的基本结构

早期的法布里-珀罗 (FP, Fabry-Perot) 激光二极管 (LD, Laser Diode) 使用单一的半导体材料，主要是砷化镓 (GaAs) 构成的单个 PN 结二极管，如图 3-12 所示。该二极管被称为同质结激光二极管，激光二极管也称为半导体激光器。

PN 结上不加电压时，能带图如图 3-13 (a) 所示。在 P 型和 N 型半导体组成的 PN 结界面上，由于存在多数载流子（电子或空穴）的梯度，因而产生扩散运动，电子将从费米能级高的 N 区向费米能级低的 P 区扩散，空穴的扩散方向正相反，从而形成内部电场，内部电场产生与扩散相反方向的漂移运动，最终的结果是两种运动达到平衡状态。必须强调的是，处于平衡状态时，PN 结两侧的费米能级相等，结果能带发生倾斜。

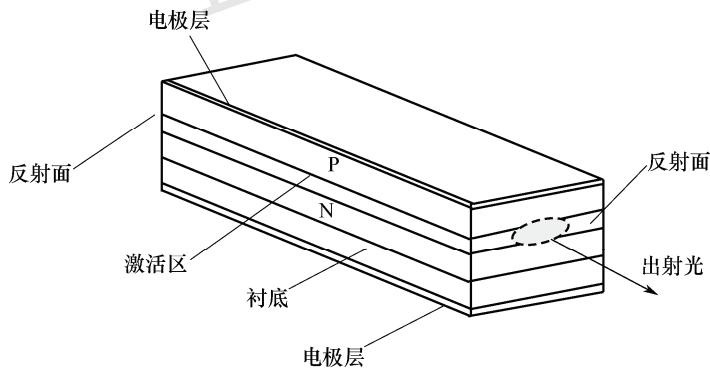


图 3-12 FP-LD 结构示意图

当 PN 结加上正向偏压时，如图 3-13 (b) 所示。外加电压的电场方向正好和内部电场的方

向相反，因而削弱了内部电场，破坏了热平衡时统一的费米能级，在P区和N区各自形成了准费米能级。此时PN结能带倾斜减小，扩散运动增强，电子运动方向与外加电场方向相反，使得N区的电子向P区运动，而P区的空穴向N区运动。这时PN结中间接触部分的导带主要是电子、价带主要是空穴，因此形成了粒子数反转分布，成为激活区，激活区也称为有源区。

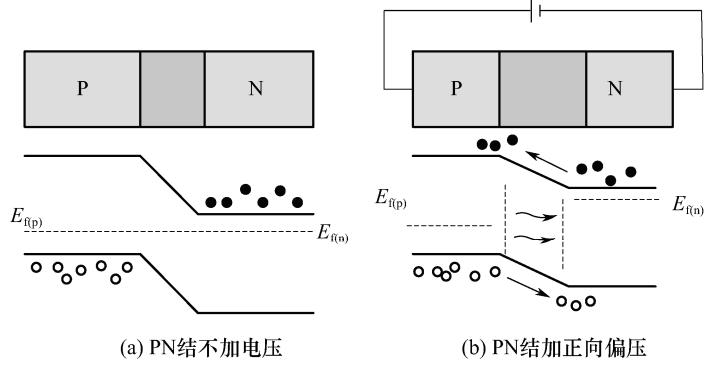


图 3-13 PN 结能带图

在电子和空穴扩散过程中，导带的电子可以跃迁到价带，与空穴复合，产生自发辐射光。

2. 激光二极管产生激光的原理

激光二极管产生激光的原理包括以下3个过程。

(1) 粒子数反转分布

在外部电压的激励作用下，PN结激活区高能级导带中的电子比低能级价带中的电子多，即粒子数反转分布，如图3-14所示。

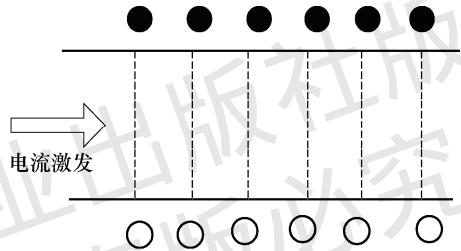


图 3-14 粒子数反转分布

(2) 受激辐射

在激活区，电子-空穴对复合辐射出光子，初始的光子来源于导带和价带的自发辐射，方向杂乱无章，其中偏离轴向的光子很快逸出谐振腔外，沿轴向运动的光子受激，产生受激辐射而发射全同光子，如图3-15(a)所示。

(3) 光振荡放大

半导体材料的天然解界面作为反射镜组成光子谐振腔，如图3-15(b)、(c)所示。

受激辐射的光子通过反射镜反射，往返不断通过激活物质，使受激辐射过程如雪崩般地加剧，从而使光得到放大。如此反复，直到放大作用足以克服有源层和高反射率界面的损耗后，就会向激活物质外面输出激光，在反射系数小于1的反射镜中输出，这就是经受激辐射的光放大，激光就是这样产生的！

LD要产生激光，除粒子数发生反转外，还需要满足阈值条件，即谐振腔的双程光放大倍数大于1。光子损耗、吸收和反射损耗导致LD有一定的阈值，只有增益大于损耗时才能产生激光。

这里有一个有趣的问题，试想一想，参与受激辐射的第一个光子是从哪里来的呢？

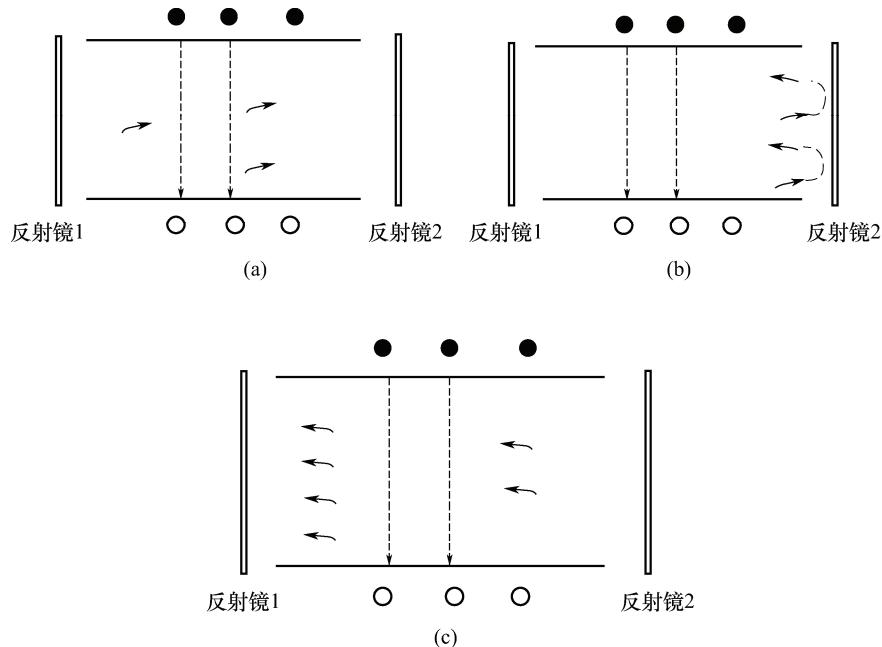


图 3-15 激光的产生

受激辐射和自发辐射有以下 4 个方面的区别。

- ① 谱线宽度：自发辐射的谱线宽度较大，受激辐射中新产生的光子和原来的光子同频率，所以谱线宽度窄，也就是说，激光是单色的。
- ② 方向性：自发辐射中光子的辐射方向是任意的，受激辐射是单一方向，方向性好。
- ③ 光电效率：自发辐射的输出功率较低，受激辐射的输出功率较高。
- ④ 相干性：自发辐射中光子的辐射随时都在发生，在不同光子间不存在相位相关，这样的辐射光被称为非相干光。受激辐射中新产生的光子和原来的光子同相位，也就是说，时间上是一致的，激光是相干光。

光纤通信的应用中，半导体激光器有多种类型。按结构分类，可分为 FP-LD、DFB-LD、DBR-LD、QW-LD、VCSEL；按波导机制分类，可分为增益导引 LD 和折射率导引 LD；按性能分类，可分为低阈值 LD、超高速 LD、动态单模 LD、大功率 LD 等。

3. 双异质结 (DH) 激光二极管

实际应用中，很少使用单一的 PN 结 LD。1970 年，俄罗斯科学家阿尔费洛夫 (Zhores Alferov) 的团队发明了世界上第一个基于 AlAs/GaAs 双异质结构系统，制作出可在室温下工作的 FP-LD。

双异质结激光二极管的常用材料也是砷化镓/砷化镓铝 (GaAs/GaAlAs) 和磷化砷铟镓/磷化铟 (InGaAsP/InP)，其结构如图 3-16 所示。中间有一层厚 $0.1\sim0.2\mu\text{m}$ 的窄带隙 P 型半导体，称为有源层，两侧分别为宽带隙的 P 型和 N 型半导体，厚度 $1\sim2\mu\text{m}$ ，称为限制层。有源层夹在 P 型和 N 型限制层中间，这样就构成了两个 PN 结，这种结构称为异质结。三层半导体置于基片（衬底）上，前后两个晶体解理面作为反射镜构成 FP 谐振腔。

由于限制层的带隙比有源层宽，施加正向偏压后，P 型限制层的空穴和 N 型限制层的电子注入有源层。P 型限制层的带隙宽，导带的能量比有源层高，如图 3-17 所示，对注入电子形成了势垒，注入有源层的电子不可能扩散到 P 型限制层。同理，注入有源层的空穴也不可能扩散到 N 型限制层。这样，注入有源层的电子和空穴被限制在厚 $0.1\sim0.3\mu\text{m}$ 的有源层内形成粒子数反转分布，这时只要很小的外加电流，就可以使电子和空穴浓度增大而提高效率。

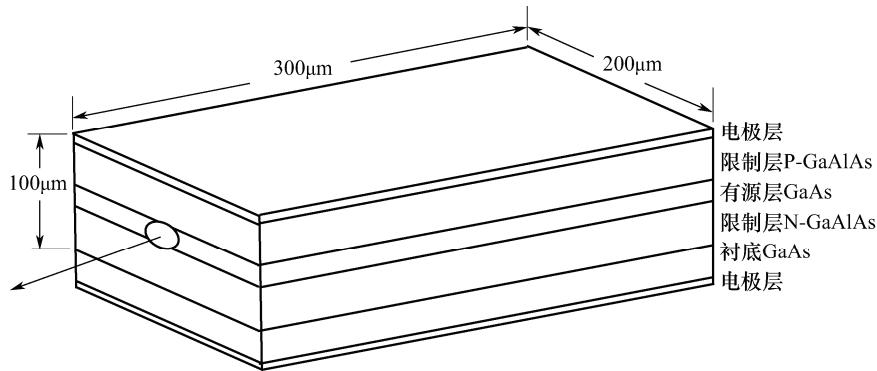


图 3-16 双异质结激光二极管的结构

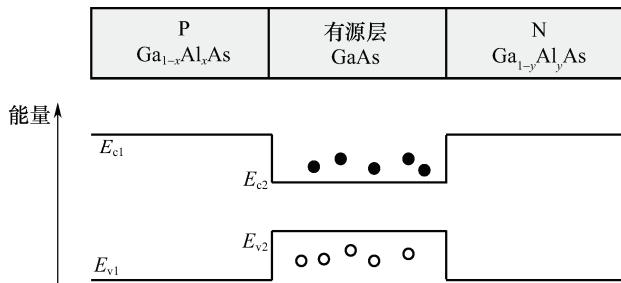


图 3-17 双异质结的能带

另一方面，有源层的折射率比限制层高，限制了光波衍射，产生的激光被限制在有源层内，因而电/光转换效率很高，输出激光的阈值电流很低，很小的散热体就可以在室温下连续工作。

3.2.2 FP 激光二极管及其特性

1. FP 激光二极管的结构和原理

FP 激光二极管是最常见、最普通的半导体激光器，简写为 FP-LD，也称为 FP 激光器。FP-LD 由有源层和有源层两边的限制层构成，谐振腔由晶体的两个解理面作为反射镜构成，其结构如图 3-18 所示。

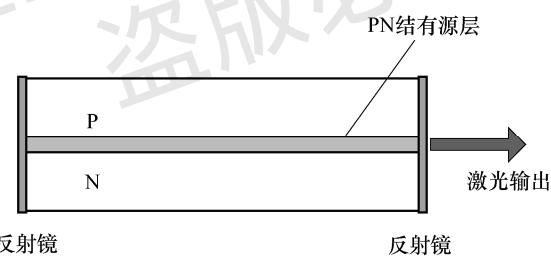


图 3-18 FP-LD 的结构

有源层内自发辐射的光，一部分光在右端面透射过去，另一部分光被右端面反射回来，然后在左端面又被反射回来，来回不断反射，并且产生受激辐射，与腔内谐振波长相对应，一些波长的光得到了很大的增强。当增益和损耗相当时，在谐振腔内开始建立稳定的激光振荡。光在谐振腔内产生驻波，表明它对该波长的光发生了谐振，因此谐振腔内就有该波长的激光。驻波是指稳定的传播模式，沿激光器输出方向形成的驻波模式称为纵模，纵模由谐振腔选择，纵模个数是指在增益曲线内模式的数量。

谐振腔具有波长选择性，因为激光振荡需满足下面的相位条件

$$L = q\lambda / 2n \quad (3-8)$$

或者

$$\lambda = \frac{2nL}{q} \quad (3-9)$$

式中， λ 为激光波长； n 为激活物质的折射率； L 为谐振腔的腔长； $q=1, 2, 3, \dots$ 称为纵模个数。从上式可以看出， L 应为介质中激光传播波长的 $1/2$ 的整数倍。

纵模间隔是指纵模的频率差，计算公式为

$$\Delta f = \frac{c}{2nL} \quad (3-10)$$

一个 FP-LD 到底可以辐射多少个纵模呢？理论上，可以支持无限多个纵模，但实际上，只有落在增益曲线内的谐振波长才能被辐射，如图 3-19 所示。

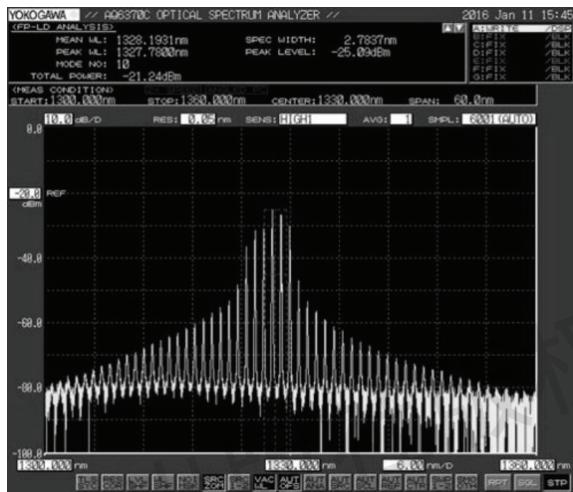


图 3-19 FP-LD 的光谱

FP-LD 的谐振腔由镀膜的自然解理面形成，当注入电流较大时，FP-LD 能实现静态单模工作，但在高速调制或温度、电流变化时，会出现模式跳跃和谱线展宽。

2. FP 激光二极管的特性

(1) 光谱特性

1) 波长特性

FP-LD 的发射波长和制作器件所用的半导体材料的种类有关，波长的大小取决于导带的电子跃迁到价带时所释放的能量，这时材料的禁带宽度就决定了 FP-LD 的工作波长，利用式(3-2)可计算波长大小。GaAs/GaAlAs 激光二极管的发射波长为 850nm，InGaAsP/InP 激光二极管的发射波长为 1300~1600nm。

FP-LD 的输出光谱可用光纤光谱仪（OSA）测得，图 3-19 是一个实际的 FP-LD 的光谱图。在规定输出光功率时，光谱内的发射模式中，最大强度的光谱波长被定义为峰值波长。

2) 模式特性

FP-LD 的光谱由几个模式组成，因为只要电磁波半波长的整数倍等于谐振腔的长度，就可能发生谐振，工作在这种状态的谐振腔被称为多纵模谐振腔。

为了保证足够大的输出光功率，谐振腔的长度一般大于 $200\mu\text{m}$ ，典型的谐振腔的长度为

200~400μm，则纵模间隔为2~4nm，光增益带宽一般为100nm量级，所以FP-LD谐振腔内可以有多个纵模振荡。在阈值电流以上，随着注入电流的增加，主模增益增加，边模增益受到抑制，谐振腔内的振荡模数减少。

如果激光器同时有多个模式振荡，就称为多模激光器（MLM）；如果激光器仅仅工作在单纵模状态，这样的激光器称为单纵模激光器（SLM）。

3) 激光空间场分布

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。沿激光器输出方向形成的驻波模式称为纵模，垂直于有源层方向的模式称为垂直横模，平行于有源层并和输出方向垂直的模式称为水平横模。在光通信领域中，要求激光器工作在基横模状态，基横模在横截面上的分布就是一个光斑，高阶模在横截面上有多个光斑。注意，当在横截面上看到一个光斑，它不一定是单纵模！对于FP-LD来说，基横模实现比较容易，主要通过控制激光器有源层的厚度和条宽来实现，常用的结构有掩埋异质结、脊波导等。基横模的光能量集中在光斑中心，比较容易耦合到光纤里面。对于高速光纤通信系统，要求采用基横模单纵模的光源。

4) 谱线宽度

FP-LD是多纵模激光器，其发射光谱的谱线宽度用均方根带宽表示。从接收器的角度看，FP-LD的谱线宽度等于发射光功率最大值的一半时的带宽，因此FP-LD的谱线宽度可以用最大输出功率一半时对应的两个波长之间的宽度来度量，如图3-20所示。FP-LD的谱线宽度通常达几纳米。

FP-LD输出的有限谱线宽度源于两个因素：一是谐振腔内自发辐射引起的光场相位脉动；二是载流子浓度脉动引起的折射率变化，使谐振腔的谐振频率发生变化。

(2) 输入/输出特性

1) 电光转换效率

FP-LD的电光转换效率可用功率转换效率和量子效率来衡量。

功率转换效率表示加在FP-LD上的电功率转换为输出光功率的效率，定义为激光器发射的光功率和消耗的电功率之比，即

$$\eta = \frac{P}{IV + I^2R} \quad (3-11)$$

式中， P 为激光器输出光功率； I 为注入电流； V 为激光器的结电压（PN结正向电压）； R 为激光器的结串联电阻（包括半导体材料电阻和接触电阻）。

内量子效率是指激活区内每秒发射的光子数和激活区内注入的电子-空穴对数的比率。

外量子效率是指激光器每秒发射的光子数和激活区内注入的电子-空穴对数的比率。

外微分量子效率是指对应于 $P-I$ 曲线中超过阈值时线性部分的斜率，也称为激光器斜效率。利用外微分量子效率可以很直观地比较不同激光器之间效率上的差别。

激光器功率可用光功率计（见图2-41）来测量，光功率单位有mW和dBm，二者换算公式见式(2-39)。

2) $P-I$ 曲线

FP-LD发射的光功率 P 与注入电流 I 的关系如图3-21所示。

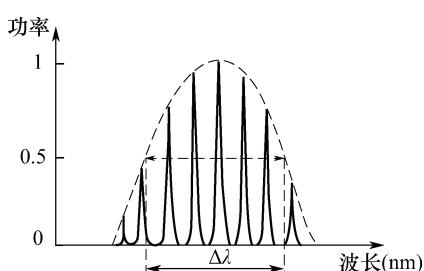


图3-20 FP-LD的模式与谱线宽度

随着注入电流的增加, FP-LD 首先是渐渐地增加自发辐射光, 直至开始发射受激辐射光。

输出光功率和注入电流的关系为

$$P = P_{\text{th}} + \frac{\eta_d h f}{e} (I - I_{\text{th}}) \quad (3-12)$$

式中, P 为总发射光功率; I_{th} 为阈值电流; I 为注入电流; P_{th} 为相应的功率阈值; η_d 为外微分量子效率; h 为普朗克常数; f 为光频率; e 为电子电荷。

3) 阈值

FP-LD 存在阈值电流, 当注入电流大于阈值电流时, 激光器才能辐射出激光, 外加激励电流刚达到阈值时, 激光器虽有激光输出但功率很弱。对激光器而言, 希望其阈值电流越小越好, 因为阈值电流小, 要求的外加激励电流就小, 激光器本身发热就少。FP-LD 阈值的大小与反射率等因素有关, 常用下式表示为

$$g_{\text{th}} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (3-13)$$

式中, g_{th} 为阈值增益系数; α 为谐振腔内激光物质的损耗系数; L 为谐振腔长度; R_1 、 R_2 为两个反射镜的反射率, 激光器出射面的反射镜的反射率略小。

4) 功率额定值

光输出功率额定值是指一个未损伤器件可辐射出的最大连续光输出功率。但要注意区别, 器件端面输出的光功率和带有尾纤的器件输出的光功率的大小是不同的。

5) 正向电压/电流

在电子电路中, 激光二极管的实质是半导体二极管, 具有单向导电性, 反向电阻大于正向电阻, 二极管的正极接在高电位端, 负极接在低电位端, 注入电流维持额定输出功率时 FP-LD 两端的压降称为正向电压, 此时的注入电流称为正向电流。FP-LD 工作在额定功率的情况下, 其压降大约为 1.5V, 正向电压/电流如图 3-22 所示。

串联电阻值可以通过万用表测量, 测量正、反向电阻可确定激光二极管的极性及检查它的 PN 结好坏, 但在测量时必须用 $1k\Omega$ 以下的挡位, 用大量程挡时, 激光二极管的电流太大, 容易烧坏。

6) 反向电压

在电子电路中, 二极管的正极接在低电位端, 负极接在高电位端, 此时二极管中几乎没有电流流过, 此时二极管处于截止状态, 这种连接方式称为反向偏置。二极管处于反向偏置时, 仍然会有微弱的反向电流流过二极管, 称为漏电流。当二极管两端的反向电压增大到某一数值时, 反向电流会急剧增大, 二极管将失去单向导电性, 这种状态称为二极管的击穿, FP-LD 击穿前的最大电压称为反向电压。

注意: 在激光二极管上加载大的反向偏置电流会烧毁激光二极管。即使在最极端的应用中, 一般也必须保证反向电流不超过 $10\mu\text{A}$ 。

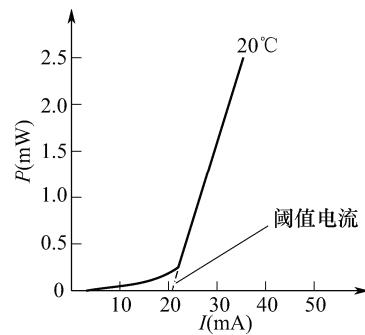


图 3-21 FP-LD 的 P-I 曲线

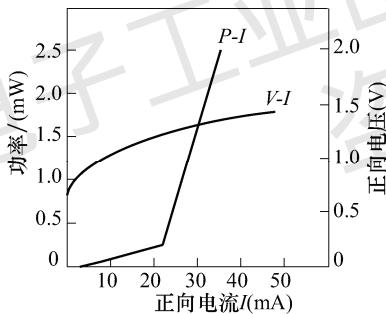


图 3-22 FP-LD 的功率与正向电压/电流的关系

(3) 调制特性

使光源发出的光载波功率大小在时间上随注入电流变化而变化，从而获得相应的光信号，这种方式是直接-强度调制，简称 D-IM (Direct-Intensity Modulation)。对激光器进行直接强度调制会使发射谱线增宽，振荡模数增加，这是因为对激光器进行脉冲调制时，注入电流不断变化，使有源层中载流子浓度随之变化，进而导致折射率随之变化，激光器的谐振频率发生漂移，动态谱线展宽。调制速率越高，调制电流越大，谱线展宽就越大，这就决定了 FP-LD 不能应用于高速光纤通信系统。要提高激光器的调制速率，设计光模块电路时，需要分析研究很多因素，详细内容可参考本章 3.4 节。

(4) 温度特性

激光器是一个温度敏感器件，其阈值电流 I_{th} 随温度的升高而增大，激光器的调制效率（单位调制电流下激光器的发光功率，量纲为 mW/mA）随温度的升高而减小。同时激光器的阈值电流 I_{th} 还随器件的老化时间而变大，随器件的使用时间而变大。激光器管芯在正常温度条件下的寿命可达数十万小时，在高温环境下，其寿命将大大缩短。

1) 光谱温度特性

激光二极管的发射波长随结区温度而变化。由于电流的热效应，使 PN 结温度升高，当结温升高时，半导体材料的禁带宽变窄，因而使激光二极管发射光谱的峰值波长向长波长方向移动，InGaAsP/InP 激光器的光谱温度系数为 $0.4\sim0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，GaAs/GaALAs 激光器的光谱温度系数约为 $0.2\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

2) 阈值电流与温度关系

激光二极管的阈值电流 (I_{th}) 定义为激光二极管发射激光的最小电流， I_{th} 随着温度的升高呈现指数形式增大， I_{th} 为关于温度的函数，即

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0) \quad (3-14)$$

式中， T 为器件的绝对温度； I_0 为常数，数量级为几十毫安； T_0 为 LD 材料的特征温度，与器件的材料、结构等有关， T_0 表示了阈值电流 (I_{th}) 对温度的敏感性， T_0 越大，器件的温度特性越好。通过上式可对激光二极管的阈值电流进行估算。

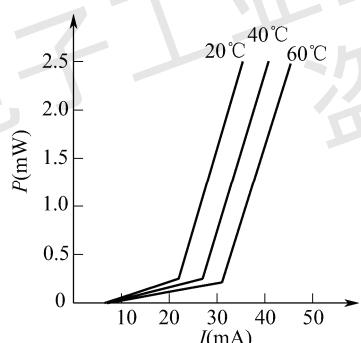


图 3-23 FP-LD 的阈值电流和功率与温度的关系

激光二极管的温度升高时，阈值电流增加，外微分量子效率减小，导致激光二极管的性能下降。FP-LD 的阈值电流和功率与温度的关系如图 3-23 所示。

对于传统常规条形结构的 GaAs/GaALAs，波长为 850nm 激光器， T_0 的典型值为 $120\sim165^\circ\text{C}$ ；对于 InGaAsP/InP，波长为 1300nm 激光器， T_0 的典型值为 $60\sim80^\circ\text{C}$ 。从式 (3-14) 可以看出，长波长激光二极管的输出功率阈值对温度的变化更加敏感，因此，使用时必须进行温度控制。对于 1550nm 的 InGaAsP/InP 激光器，当温度超过 100°C 时，一般不能再产生激光。

注意：设计光模块时，要考虑由于温度变化引起的激光器阈值电流、偏置电流的变化带来的问题，需要设计激光二极管的电流补偿电路。

(5) 监测特性

激光二极管的谐振腔由两个反射镜构成，它们的作用是保证光子在其中往返运动以激射出

新的光子。前反射镜透射出去的光，通过与光纤的耦合发送到光纤中传输，而后反射镜辐射出去的光，也就是背向光。光发射组件（TOSA）将此背向光转换为背光电流，利用它可用来监控光源器件发光功率的大小，也就是说，激光二极管封装时还包括一个监测内部输出功率的光电二极管（PD），PD 的正向电流正比于 LD 的发光功率，可用负反馈电路去控制 LD 的工作电流。

你注意观察了吗？为什么封装好的激光二极管有 3 个引脚？

FP-LD 的典型参数如表 3-2 所示。

表 3-2 FP-LD 的典型参数（25℃）

	最小值	典型值	最大值	单位
输出功率（单模尾纤）	0.3		2.5	mW
阈值电流	5	20		mA
正向电流	10		35	mA
正向电压		1.1	1.5	V
中心波长	1280	1310	1340	nm
谱线宽度		3	5	nm
光谱温度系数	0.4		0.55	nm/°C
光上升、下降时间			0.5	ns
监测电流	100			μA

FP-LD 主要用于低传输速率、短距离传输，比如传输距离一般在 20km 以内，传输速率一般在 1.25Gb/s 以内。现在市场上也存在一些制造商用 FP 器件制作千兆 40km 的模块，为了达到相应的传输距离，必定调高发光功率，长时间工作会让产品的器件老化，缩短使用寿命。根据工程师的建议，1.25G×40km 的双纤模块应用 DFB 器件更为稳妥！

本节介绍了 FP-LD，下面介绍光纤通信中常用的其他几种激光二极管，在实际应用中，可根据传输速率、传输距离的不同选择不同的激光二极管。

【讨论与创新】上网搜索资料，讨论学习下面的问题。

- (1) 光源的谱线宽度对光纤传输速率有什么影响？
- (2) 如何测量 LD 光源的谱线宽度？

3.2.3 分布反馈激光二极管及其特性

1. 分布反馈激光二极管的原理

为了降低谱线宽度，我们需要只发射一个纵模的激光二极管。利用布拉格（Bragg）光栅选择工作波长的概念早在 20 世纪 70 年代初就被提出来了，并得到广泛重视，但由于技术原因，有关分布反馈（DFB，Distributed Feed Back）激光器的研究曾一度进展缓慢。在制作技术的发展过程中，人们发现直接在有源层刻蚀光栅会引入污染和损伤，为此提出了分别限制结构，即将光栅刻制在有源层附近的透明波导层上，这样能有效降低分布反馈激光二极管（DFB 激光二极管）的阈值电流，这种结构在后来被广泛应用。DFB 激光二极管的最大特点是具有非常好的单色性，同时具有非常高的边模抑制比（SMSR）。DFB 激光二极管简写为 DFB-LD，也称为 DFB 激光器。

目前，DFB-LD 主要以半导体材料为介质，包括砷化镓（GaAs）、磷化砷铟镓（InGaAsP）、磷化铟（InP）等，其结构如图 3-24 所示，由多层材料构成，包括电极层、衬底、限制层（n-InP 或 p-InP）、波导层、有源层。DFB-LD 的腔体宽度约为 5~10μm，长度约为 100~200μm。

有源层的带隙对应的波长为 1550nm，该层被 InGaAsP 波导层包围，其中一边的波导层边缘有周期 Λ 的光栅，波导层外相邻的限制层由一种高带隙、低折射率材料（p-InP 或 n-InP）构成。

DFB-LD 靠近有源层沿长度方向制作的周期性结构（波纹状）衍射光栅实现光反馈，如图 3-25 所示，实际上，任何采用周期性波导来获得单纵模的激光器都称为分布反馈激光器。有源层发射的光子会受到每一条光栅波纹峰的反射，这种反射是由于周期性波纹光栅造成的材料折射率的周期性变化，对有源层传播的光产生的微扰造成的，成百上千次的反射形成光反馈，光反馈的作用使有源层中前向和后向的波发生耦合。波的耦合过程可用光波导理论来分析。布拉格光栅的作用本质上和谐振腔一样，实现光的反馈，所以最终能产生激光。

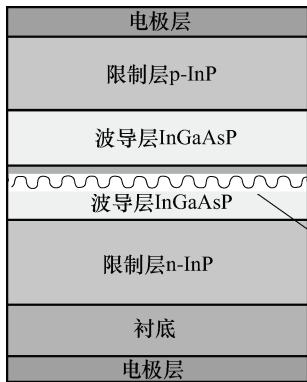


图 3-24 DFB-LD 的结构

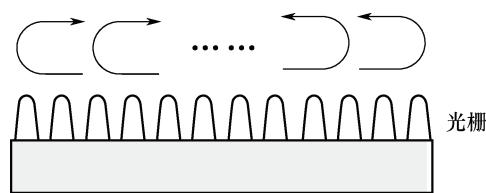


图 3-25 DFB-LD 光栅示意图

器件的波长选择机制是由布拉格光栅条件所决定的，即两束反向波之间，只有满足布拉格光栅条件的波长才会出现相干耦合。布拉格条件为

$$\Lambda = m \frac{\lambda_B}{2n} \quad (3-15)$$

式中， Λ 为光栅周期； n 为材料的折射率； λ_B 为布拉格波长； m 为光栅引起的布拉格衍射的级数。

当 $m=1$ 时，正向波和反向波之间的耦合最强，通过选择适当的光栅周期，就能实现选定波长的反馈。在普通均匀的光栅中，引入一个 $\lambda/4$ 相移变换，形成相移光栅，可以有效提高模式选择性和稳定性，实现单纵模激光器的要求。

根据分布反馈激光二极管不同的反馈结构，有分布反馈（DFB）激光二极管（DFB-LD）和分布布拉格反射型（DBR, Distributed Bragg Reflection）激光二极管（DBR-LD）两种类型。DFB-LD 仅指周期性出现在谐振腔的有源增益区。如果周期性出现在有源增益区的外面，则称为 DBR-LD。DBR-LD 的优点是其增益区和波长选择是分开的，因此可以对它们分别进行控制，例如，通过改变波长选择区的折射率，可以将激光二极管调谐到不同的工作波长而不改变其他的工作参数。

DFB-LD 的特点是光栅分布在整个谐振腔中，光波在反馈的同时获得增益。因为 DFB-LD 的谐振腔具有明显的波长选择性，所以决定了它们的单色性优于一般的 FP-LD。

2. DFB 激光二极管的特性

DFB-LD 的部分特性和 FP-LD 的特性是一致的，这里重点介绍 DFB-LD 与 FP-LD 不同的特性。

(1) 单纵模激光

DFB-LD 的谱线宽度窄，其波长稳定性好。典型的 DFB-LD 光谱图如图 3-26 所示，与图 3-19 比较，二者的光谱图有明显的不同，DFB-LD 的辐射光谱只有一个辐射模式。另外，DFB-LD 内置光隔离器，作用是防止回射光渗入激活区。



图 3-26 DFB-LD 的光谱

(2) 谱线宽度

根据 G957 的建议, DFB-LD 谱线宽度用最大功率-20dB 光谱宽度表示, 即由激光二极管输出功率的最高点降低 20dB 时的带宽为 DFB-LD 的光谱宽度。DFB-LD 的谱线宽度通常为 0.3~0.5nm, DFB-LD 的谱线宽度也用频率描述, 部分 DFB-LD 的谱线宽度可达 1~10MHz。

(3) 边模抑制比

边模抑制比 (SMSR) 定义为激光二极管主纵模和最大边模的强度差, 即在最坏反射条件下, 激光二极管光谱中主纵模光功率峰值强度 (P_{m0}) 与最大边模光功率峰值强度 (P_{m1}) 之比的对数, 表示为

$$\text{SMSR} = 10 \lg(P_{m0} / P_{m1}) \quad (3-16)$$

DFB-LD 的边模抑制比目前可高达 40~50dB。

(4) 动态谱线

DFB-LD 的最大优点是在高速调制 (2.5~10Gb/s) 的情况下仍能保持动态单模, 非常适合高速短距离的光纤通信系统。DFB-LD 在高速调制时也能保持单模特性, 这是 FP-LD 无法比拟的。尽管 DFB-LD 在高速调制时存在啁啾, 谱线有一定展宽, 但比 FP-LD 的动态谱线的展宽要改善一个数量级左右。DFB-LD 的主要特性如表 3-3 所示。

表 3-3 DFB-LD 的主要特性 (25°C)

	最小值	典型值	最大值	单位
输出功率 (单模尾纤)	0.3		2.5	mW
阈值电流	15	20		mA
正向额定电流			100	mA
正向额定电压			2	V
工作电压	0.9	1.2	1.4	V
中心波长		1550		nm
谱线宽度 (-20dB)		0.3		nm
边模抑制比 (SMSR)	33	40		dB
光谱温度系数		0.085		nm/°C
光上升、下降时间			50	ps

注意比较图 3-19 和图 3-26, 以及表 3-2 和表 3-3 内的不同参数, 对比 FP-LD 和 DFB-LD 的特性参数, 尤其是谱线宽度、中心波长有明显不同, 深入理解激光二极管的特性, 有利于光模块的设计和应用。

【讨论与创新】在相干光通信中需要窄频的激光器, 如何实现呢?

3.2.4 量子阱激光器

20世纪80年代, 量子阱(QW, Quantum Well)结构的出现使半导体激光器出现了大的飞跃。量子阱结构源于20世纪60年代末期贝尔实验室的江崎(Esaki)等提出的超薄层晶体的量子尺寸效应。当超薄有源层材料厚度小于电子的德布罗意波长时, 有源区就变成了势阱区, 两侧的宽带系材料成为势垒区, 电子和空穴沿垂直势阱壁方向的运动出现量子化特点, 从而使半导体能带出现了与块状半导体完全不同的形状与结构。

激光器的有源层的厚度减至可以和波尔半径(1~50nm)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。由一个势阱构成的量子阱结构为单量子阱(SQW, Single Quantum Well); 由多个势阱构成的量子阱结构为多量子阱(MQW, Multiple Quantum Well)。

量子阱激光器的结构和能带如图3-27所示, 该结构包含10nm厚的GaAs有源层, 有源层外面是两层厚度为100nm的 $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 限制层, 限制层则被两层厚1μm的高带隙、低折射率 $\text{Ga}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{As}$ 材料包围。

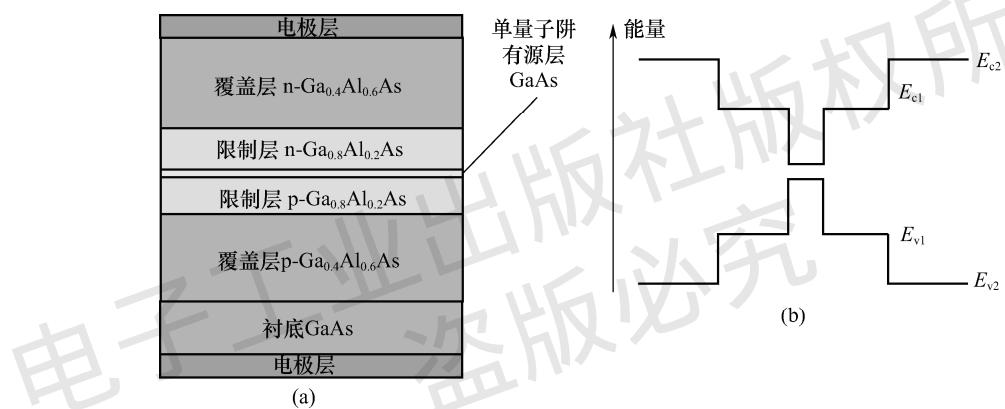


图 3-27 量子阱激光器的结构和能带

量子阱激光器的阈值电流密度是类似的DH激光器($J_{th} \approx 100 \sim 300 \text{ A/cm}^2$)阈值电流密度的 $1/5 \sim 1/4$ 。由于使用了特殊的覆盖层/限制层结构, 量子阱结构的厚度减小的同时增大了光子的禁锢效应。此外, 与晶体结构相比, 由于增益的增大, 使得量子阱结构对器件性能也有一定的提升。

根据量子阱激光器的结构, 激光器可分为单量子阱(SQW)激光器和多量子阱(MQW)激光器。多量子阱(MQW)激光器的结构和能带, 如图3-28所示。

量子阱激光器的特点如下:

- ① 阈值电流低, 由于其中“阱”的作用, 使电子和空穴被限制在很薄的有源层内, 有源层内粒子数反转浓度很高, 大大降低了阈值电流。阈值电流仅为同尺寸普通DH激光器的 $1/3$ 。
- ② 高量子效率和大输出功率。量子阱激光器的内部损耗小, 总的电光转换效率高, 适合做成功率输出的阵列激光器。

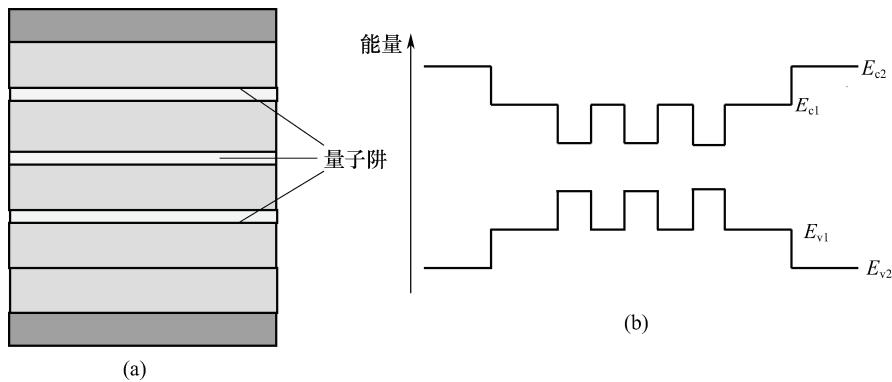


图 3-28 多量子阱激光器的结构和能带示意图

③ 谱线宽度很窄，与 DH 激光器相比，其谱线宽度可缩小一半，仅为几十到几百 kHz。另外，量子阱激光器的动态单纵模特性好，调制速度快。

④ 温度灵敏度低，量子阱使激光器的温度稳定条件大为改善。AlGaInAs 量子阱激光器的特征温度可达 150K，甚至更高。

⑤ 发射光波长与量子阱厚度有关，可改变激光器的波长。

3.2.5 垂直腔面发射激光器

垂直腔面发射激光器（VCSEL，Vertical Cavity Surface Emitting Lasers）的结构由东京工业大学 Iga 教授提出，它的有源层位于两个限制层之间，并构成双异质结构。VCSEL 的腔长是隐埋双异质结构的纵向长度，一般为 $5\sim10\mu\text{m}$ ，其结构如图 3-29 所示。

所谓表面发射是相对于一般端面发射激光器而言的，光从垂直于结平面的表面发射；而所谓垂直腔是指激光腔方向（光子振荡方向）垂直于半导体芯片的衬底，即光子振荡方向与光出射方向一致。有源层厚度即为腔长，由于有源层很薄，要在如此短的腔内实现低阈值振荡，除要求有高增益的有源介质外，还要求有高的腔面反射率。到了 20 世纪 80 年代，用 MBE 和 MOCVD 等技术制成量子阱材料和 DBR 反射器后，VCSEL 才被制作出来。

VCSEL 的有源区包含几个厚度为 $5\sim10\text{nm}$ 的应变量子阱，并在量子阱之间填充 $4\sim6\text{nm}$ 厚的高带隙材料。该激光器的 DBR 反射器，包含在一个厚 $\lambda/4$ 的高折射率/低折射率重复排布的材料层中。这种多个 DBR 反射器（为 15~25 个）的分层结构会在光每经过 $\lambda/4$ 就产生一个峰值反射率，对应模式的光就会被增益介质放大。谐振腔中的其他模式将被减小而损耗，每一组 DBR 反射器相当于一个高反射镜。这种结构固定在一片厚基底上，并接有金属电极。发射表面厚度为 $\lambda/2$ （用于位相匹配），上面带有一个直径为 $5\sim10\mu\text{m}$ 的圆形金属电极。

由于特殊结构，VCSEL 的特点如下：

① 谐振腔尺寸小，仅 $2\mu\text{m}$ ，可以做成二维面阵，能够大规模集成；

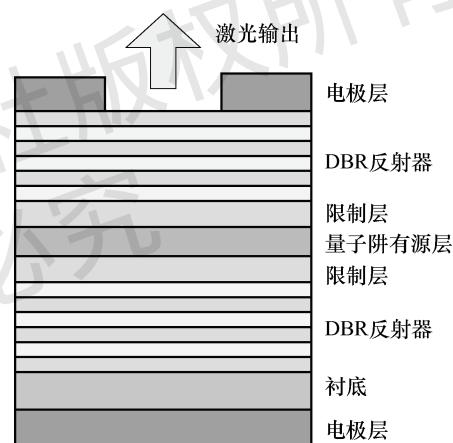


图 3-29 VCSEL 的结构

- ② VECSEL 的腔长很短，所以纵模间距很大，以实现动态单纵模工作；
- ③ 可以实现极低的阈值电流工作，功耗低，转换效率非常高，功耗仅为边缘发射 LD 的几分之一；
- ④ 开关速度高，调制速度快，在 1GHz 以上；
- ⑤ 圆形输出光，从其顶部发射出圆柱形光束，光束无须进行不对称矫正或散光矫正，即可调制成用途广泛的环形光束，易与光纤耦合；
- ⑥ 易集成，垂直腔面很小，易于高密度大规模制作，成本低。

VCSEL 是近几年才成熟起来的新型商用激光器，有很高的调制效率和很低的制造成本，特别是波长 850nm 的 VCSEL，在短距离多模光纤传输系统中已经得到非常广泛的应用。目前，波长 850nm 的 VCSEL 已用于 25Gb/s 以太网的高速网络，在 OM3 多模光纤上的传输距离可达 70m，在 OM4 上可达 100m。

谱线宽度是激光器输出光谱的一个非常重要的特性，窄的谱线宽度有利于减小光纤中光脉冲的色散。量子阱（特别是应变量子阱）激光器具有好的动态特性和低的阈值电流，再引入 DFB 进一步减小谱线宽度，成为目前高速通信中最理想的光源。

【深入学习】各种 LD 器件的详细技术资料，读者可参考相关公司的网站进行自学。

3.3 激光二极管的调制

3.3.1 码型与调制

用电信号控制光信号的幅度、频率和相位等特性，把电信号加载到光信号的过程称为调制。根据电信号的特性，调制分为模拟调制和数字调制；根据调制方式，调制分为直接调制和外部调制。

1. 光纤通信中的常用码型

为了便于学习，下面先介绍非归零码（NRZ）和归零码（RZ）。

(1) 非归零码

非归零（NRZ, Non-Return-to-Zero）码的特点是无电压表示“0”，恒定正电压表示“1”，每个码元时间的中间点是采样时间，判决门限为半幅电平。非归零码如图 3-30 所示，其中二进制比特流 101101 表示数据，数据下的脉冲波形是对应的 NRZ 码。

(2) 归零码

归零（RZ, Return-to-Zero）码的特点是高电平和零电平分别表示二进制码“1”和“0”，无电压表示“0”，恒定正电压表示“1”，但持续时间仅等于一个码元的时间宽度的一半，即发出一个窄脉冲，每传输完一位数据，信号返回到零电平，如图 3-30 所示。对于 RZ 码，其优点在于它能够与交流耦合方式互相兼容。它在编码位中一直能够产生不同的变换，故而接收端能够更加准确地接收信号并加以解调。

NRZ 码调制方式所运用的调制和解调模块相对比较简单，在光纤通信中被广泛运用，光接口 STM-N、1000Base-SX、1000Base-LX 采用此码型。与 RZ 码相比，NRZ 码的频谱相对较窄，应对色散的功能较好。但是在高速大容量的光纤通信系统中，如 WDM 系统，由于 NRZ 码本身的特点，即其数据流连续出现 0 或 1 时，接收端难以分辨信号位的开端或结尾，必须在发送端与接收端之间给予对应的信号定时同步信号，而且 NRZ 码长连 1 会产生较大成分的直流信号，所以无法使用交流耦合的线路和设备，因此 NRZ 码在某些场合会受到非线性效应与噪声的干扰从而表现不佳。

在接收平均功率不变的情况下，RZ 码和 NRZ 码相比，RZ 码一般会具有更好的输出特性，这表现在睁开度更大的眼图与较小的误码率上。在时域中，RZ 码拥有更窄的时钟特性，使得其在波分复用系统信道之中的非线性效应会相对更小。但是，由于 RZ 码每次传输 1 时都要在后一位回到 0，故而其传输的带宽在相同传输速率情况下是 NRZ 码的两倍，这是它的一个缺点，也是 NRZ 码带宽上的优点。

2. 直接调制

要传送的信息转变为电流信号注入 LD 或 LED，通过驱动电路直接改变（调制）LD/LED 的电流，使光源发出的光载波功率大小在时间上随注入电流变化而变化，从而获得相应的光信号，这种方式称为直接/强度调制，简称 IM (Intensity Modulation)，如图 3-31 所示。

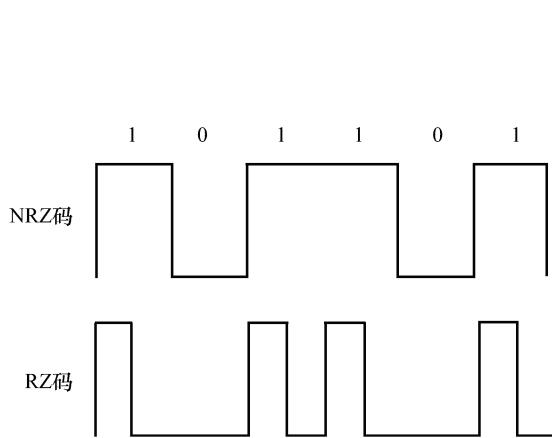


图 3-30 NRZ 码与 RZ 码

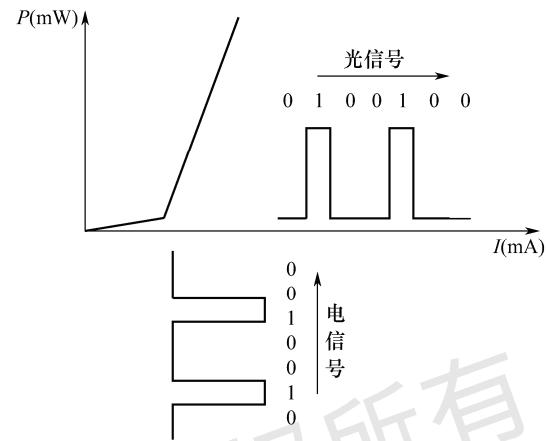


图 3-31 激光二极管 (LD) 的直接调制

激光二极管 (LD) 在一定的偏置电流下，输入需要传送的电信号，即二进制比特流 0010010，在调制电路的控制下，LD 发光表示“1”，不发光表示“0”，就实现了 LD 的直接调制。

传输速率为 2.5Gb/s 以下的光传输系统，LD 光源的调制采用的都是直接调制方式，这种激光器也称为直接调制激光器 (DML, Direct Modulation Laser)。

3. 外调制

对于直接调制来讲，调制带宽受激光二极管振荡频率的限制，调制时单纵模激光器引起的啁啾 (Chirp) 噪声限制了传输距离。对于 DFB-LD 的高速通信系统来说，这是一个重要的限制因素。要解决与调制相关的内部问题，根本方法是改用外调制。LD 的外调制如图 3-32 所示。

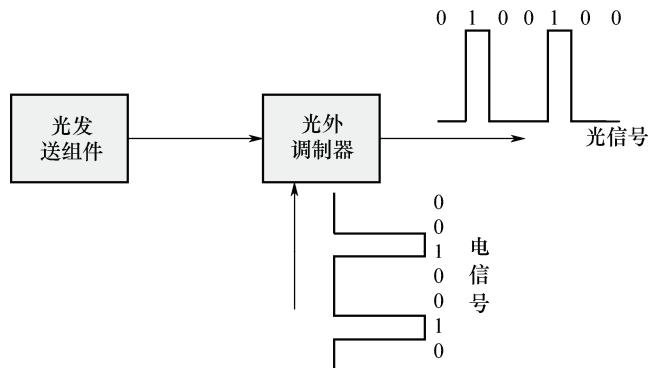


图 3-32 LD 的外调制

在外调制情况下，LD 辐射连续光波，高速电信号不再直接调制激光器，而是加载在某一媒

介上，利用该媒介的物理特性使通过的激光信号的光波特性发生变化，从而间接建立了电信号与激光的调制关系。当 LD 外部的光能发生变化时，LD 不受任何影响，这时 LD 辐射的功率能够达到一个较高的水平，因为这一回路不必承担偏移和啁啾。这一优点对辐射波长的稳定性为基本要求的波分复用 WDM 系统来说，具有非常重要的意义。外调制对光功率没有限制，而发送器的带宽由光外调制器决定。

当然，外调制带来了很多好处，但在光回路中插入一个外部构件，不难想象，光纤通信系统中会增加一个额外的连接或插入损耗。

3.3.2 激光二极管的调制特性与速率

LD 的光电转换效率高、覆盖波段范围广、寿命长、体积小，可以通过电信号直接控制 LD 的注入电流而实现调制，所以 LD 是光纤通信的理想光源。要提高光纤通信系统的传输速率，就必须提高光源的调制速率。

究竟是哪些因素限制了 LD 的直接调制速率呢？

LD 在接通电源、关闭电源或受其他电流扰动时的瞬态特性，对 LD 的调制速率有影响。LD 在高速脉冲调制下，其瞬态特性会出现许多复杂现象，如常见的电光延迟、张弛振荡和自脉动现象，这些特性严重限制了系统的传输速率和通信质量。

LD 的调制特性可用其速率方程的瞬态解和小信号近似情形来分析。这里只分析一些有用的结论，对基带信号直接调制 LD 特性的数学分析并不做深入讨论，有兴趣的读者可参阅其他书籍。

1. 电光延迟

LD 在高速脉冲调制下，输出光脉冲的瞬态响应波形如图 3-33 所示。输出光脉冲和注入电脉冲之间存在一个初始延迟时间，称为电光延迟时间 t_d ，其数量级一般为 ns，原因是载流子浓度达到激光阈值需要一定的时间（0.5~2.5ns）。

电光延迟时间为

$$t_d = \tau \ln \frac{I_p}{I_p + (I_b - I_{th})} \quad (3-17)$$

式中， I_p 为调制电流； I_b 为直流偏移电流； I_{th} 为阈值电流； τ 为当复合区内总电流 $I = I_p + I_b$ 接近阈值电流 I_{th} 时的载流子平均寿命。

从式 (3-17) 可以看出，当 $I_b = I_{th}$ 时， $t_d = 0$ ，也就是说，可以通过在 LD 上施加与受激辐射阈值电流大小相等的直流偏置来消除该延迟时间，仅当工作电流范围在阈值电流以上时，才对 LD 进行脉冲调制。在此范围内，载流子的寿命缩短到与辐射寿命相同，因而可获得较高的调制速率。电光延迟时间限制了 LD 的直接调制速率（可达到 Gb/s 数量级）。

电光延迟时间还会产生码型效应。当电光延迟时间 t_d 与数字调制的码元持续时间 $T/2$ 为相同数量级时，会使“0”码过后的第一个“1”码的脉冲宽度变窄，幅度减小，严重时可能使单个“1”码丢失，这种现象称为“码型效应”。

2. 张弛振荡

当电流脉冲注入 LD 后，输出光脉冲会出现幅度逐渐衰减的振幅，称为张弛振荡，其振荡

频率一般为 0.5~2GHz。张弛振荡幅度和频率特性与 LD 有源区的载流子自发辐射寿命、受激载流子寿命、谐振腔内光子寿命有关。

载流子自发辐射寿命 τ_{sp} 是半导体能带结构及载流子浓度的函数。室温下，在掺杂浓度为 10^{19}cm^{-3} 量级的 GaAs 材料中，载流子自发辐射寿命大约为 1ns。受激载流子寿命由谐振腔内的光子浓度决定。

光子寿命 τ_{ph} 是光子在被吸收或通过端面辐射之前驻留在谐振腔内的平均时间，也就是光子从它最初的位置开始跑出 LD 所需要的时间。光子寿命给 LD 调制增加了一个上限，光子一旦产生，状态就无法改变。

结合式 (3-13)，推导可得，在谐振腔中光子寿命为

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{c}{n} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) = \frac{c}{n} g_{th} \quad (3-18)$$

典型情况下，当 $g_{th}=50\text{cm}^{-1}$ 、谐振腔内材料折射率 $n=3.5$ 时，光子寿命 $\tau_{ph} \approx 2\text{ps}$ 。光子寿命的大小决定了 LD 直接调制速率的上限。

张弛振荡幅度衰减时间

$$\tau_0 = 2\tau_{sp} \frac{I_{th}}{I} \quad (3-19)$$

式中， τ_0 为张弛振荡幅度衰减到初始值的 $1/e$ 的时间； τ_{sp} 为载流子自发辐射寿命； I 和 I_{th} 分别为注入电流和阈值电流。

张弛振荡频率由载流子自发辐射寿命与光子寿命决定。理论上，张弛振荡频率约为

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{(\tau_{sp} \tau_{ph})^{1/2}} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right)^{1/2} \quad (3-20)$$

张弛振荡频率随着 τ_{sp} 和 τ_{ph} 的减小而增加，随着注入电流 I 的增加而增加。在典型的激光器中， τ_{sp} 约为 1ns， τ_{ph} 大小为 2ps 的数量级。

因为光子寿命远小于自发载流子寿命，所以可方便地对 LD 进行脉冲调制。若激光器在每个脉冲输出后都完全停止发光，则自发载流子寿命将成为限制 LD 调制速率的主要因素。

电光延迟和张弛振荡的后果是限制调制速率。当最高调制频率接近张弛振荡频率时，波形产生严重失真，会使光接收机在采样判决时增加误码率，因此实际使用的最高调制频率应低于张弛振荡频率。理论上，LD 的调制速率可到 8.3THz，但实际上，LD 的直接调制速率一般为 1~10Gb/s，两者之间有相当大的差距。

3. 自脉动现象

某些 LD 在脉冲调制甚至直流驱动下，当注入电流达到某个范围时，输出光脉冲出现持续等幅的高频振荡，这种现象称为自脉动现象。这是 LD 内部元件非线性特性所引起的带外频率对自身进行调制而产生的自激振荡，或者 LD 在直流驱动下的寄生频率所产生的自激振荡，如图 3-34 所示。

自脉动频率可以达到 2GHz，严重影响 LD 的高速调制特性。自脉动现象是 LD 内部不均匀

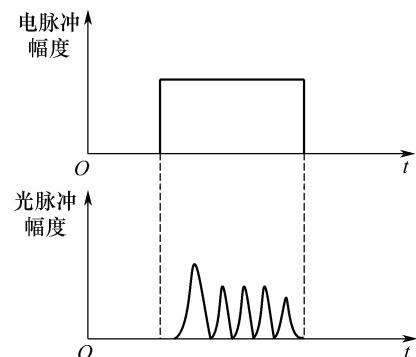


图 3-34 光脉冲的自脉动现象

增益（主要针对电信号）或不均匀吸收（主要针对光信号）所产生的。

4. 结发热效应

由于调制电流的作用，引起 LD 结区温度的变化，因而使输出光脉冲的形状发生变化，这种效应称为结发热效应。

给 LD 注入电流，由于电流的热效应，在脉冲持续时间里，PN 结区的温度随时间而升高，LD 的阈值电流随时间而增大，使输出光脉冲的幅度随时间而减小。当注入电流减小时，电流散发的热量减少，结区温度随时间而降低，阈值电流减小，使输出光脉冲的幅度增大。

结发热效应将引起调制失真，随着调制速率的提高，码元时间间隔缩短，使结区温度来不及发生变化。

5. 哨啾（Chirp）特性

在直接调制 LD 时，不仅输出光功率随调制电流发生变化，而且光的频率也会发生波动，即在幅度调制的同时还受到频率调制。

对于处于直接调制下的单纵模激光器，载流子浓度的变化是随着注入电流的变化而变化的，这样就会使有源区的折射率指数发生变化，从而导致谐振腔的光通路长度相应变化，结果致使振荡波长随时间偏移，导致哨啾现象。

激光二极管哨啾的数量级大约为 1/100000，带有频率哨啾的信号在单模光纤中传播时，在色散作用下，将增大非线性失真。哨啾引起脉冲展宽（色散），随着调制速率增加，哨啾现象愈加严重。

6. 噪声

即使 LD 的偏移电流理想地保持恒定，其辐射的光的强度和相位仍会有一定的波动，这主要是由自发辐射引起的波动，这就是 LD 的噪声。相位波动噪声是指相位波动引起光谱展宽。由于谐振腔内载流子和光子密度的量子起伏，造成输出光波中存在着固有的量子噪声，导致 LD 光强的波动，即 LD 强度噪声。强度噪声产生的另一个原因是由于光纤端面或连接器的反射功率引起的，当反射的光功率进入 LD，被 LD 激活区放大从而引起噪声。

LD 的强度噪声一般用相对强度噪声（RIN, Relative Intensity Noise）来度量，定义为有效的噪声带宽内功率偏离的均方差和平均光功率平方的比，即

$$RIN = \langle (\Delta P)^2 \rangle / (\bar{P}^2 \cdot B) \quad (3-21)$$

式中， B 为带宽。要测试得到尽可能多的功率点，这样才能够更准确地计算光功率的平均值，也能更准确描述即时功率和平均功率的偏离情况。采用数学统计手段，引入均方差，让这个结果更准确，更接近于真实。瞬时的随机波动无法用现有的时域测试手段测量，工程上在频域测试 RIN，测量时间定义为 1s，反映到频域上就是 1Hz，相对强度噪声值很小，通常用对数的形式表示，单位为 dB/Hz。

【讨论与创新】现阶段商用的直接调制激光器（DML）最高的调制速率是多少？

3.3.3 马赫-曾德尔调制器（MZM）

1. 调制器原理

调制器可以用电光效应、磁光效应或声光效应来实现。最常用的调制器是利用具有强电光效应的铌酸锂（LiNbO₃）晶体制成的。

折射率 n 和外加电场 E 的关系为

$$n = n_0 + \alpha E + \beta E^2 \quad (3-22)$$

式中, n_0 为 $E=0$ 时晶体的折射率; α 和 β 为张量, 称为电光系数。

当 $\beta=0$ 时, n 随 E 按比例变化, 称为线性电光效应或泡克耳斯 (Pockels) 效应。当 $\alpha=0$ 时, n 随 E^2 按比例变化, 称为二次电光效应或克尔 (Kerr) 效应。

光波导是制作一切波导产品的核心。对 LiNbO_3 光波导而言, 有两种技术制作光波导, 一种是钛 (Ti) 内扩散技术, 另一种是质子交换技术。制作 Ti 内扩散光波导时, 首先在 LiNbO_3 衬底上蒸发 Ti 膜, 然后用光刻和腐蚀技术刻蚀出 Ti 条, 最后在高达 1000°C 左右的温度下进行 Ti 扩散而形成光波导。这种方法有较多缺点, 如高的扩散温度、复杂的制作过程和波导较高的传输损耗。质子交换技术是制作低成本 LiNbO_3 光波导有吸引力的技术, 因为质子交换技术和 Ti 内扩散技术相比有如下优点: 工艺简单, 可获得较大的折射率变化和相当低的工艺温度。马赫-曾德尔调制器原理图如图 3-35 所示。

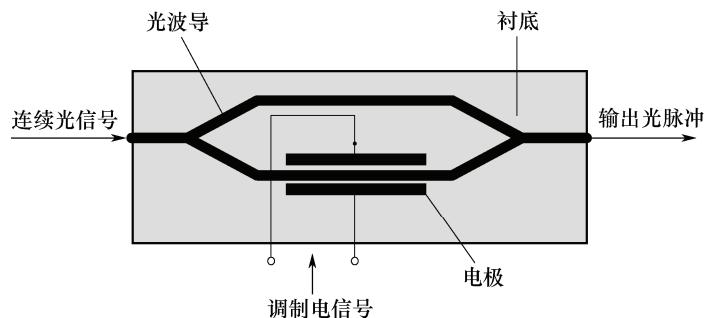


图 3-35 马赫-曾德尔调制器原理图

在马赫-曾德尔调制器 (MZM) 中, 输入的光信号在 Y 形分支器 (3dB 分束器) 上被分成振幅和相位完全相同的两束光, 并且随着光波导在上、下两臂上进行传输, 调制器是利用线性电光效应实现的, 因为折射率 n 随外加电场 E (调制电压 U) 而变化, 改变了入射光的相位和输出光功率。如果上、下两臂完全对称, 在不加调制电压时, 两支路光束在输出 Y 形分支器内重新合并成与原输入光信号相同的光束, 由单模波导输出。

马赫-曾德尔调制器的结构如图 3-36 所示。

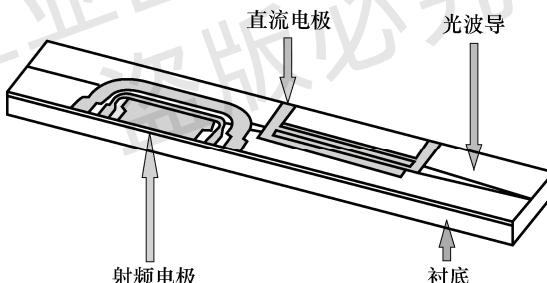


图 3-36 马赫-曾德尔调制器的结构

2. 马赫-曾德尔调制器的传输函数

设 MZM 上、下两臂输入电压分别为 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$, 只考虑一次电光效应, MZM 单个臂的相位变化与输入电压是线性函数, 相位变化为

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_{\text{eff}} L \cdot u(t) \quad (3-23)$$

式中, $u(t)$ 为输入电压; Δn_{eff} 为单位电场作用下导模折射率的增量; L 为调制器波导长度; λ 为光波波长。

定义半波电压 V_π , 即能使光波产生 π 相位偏移的电压, 为

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2\Delta n_{\text{eff}} L}$$

则输入电压引起的相位变化为

$$\phi(t) = \frac{u(t)}{V_\pi} \pi$$

则上、下两臂的相位变化分别为

$$\phi_1(t) = \frac{u_1(t)}{V_{\pi 1}} \pi \quad (3-24a)$$

$$\phi_2(t) = \frac{u_2(t)}{V_{\pi 2}} \pi \quad (3-24b)$$

作为强度调制器, 设上、下两臂的输入电压 $u_1(t) = -u_2(t) = u(t)/2$, 上、下两臂的相位变化相反, 即 $\phi_1(t) = -\phi_2(t)$, 输出电场可表示为 $E_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2} \cdot E_{\text{in}}(t) \cdot (e^{j\phi_1(t)} + e^{j\phi_2(t)})$, 这里 $E_{\text{in}}(t)$ 表示光波的输入电场, 进一步化简可得

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{u(t)}{V_\pi}\right) \quad (3-25)$$

习惯上, 使用信号光功率来表示 MZM 的传输函数, 即

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\phi_1(t) - \phi_2(t)}{2}\right) = P_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{u(t)}{V_\pi}\right) \quad (3-26)$$

式中, $\phi_1(t) - \phi_2(t)$ 为上、下两臂光信号的相位差。

当进行强度调制时, 调制器的直流偏置要在正交位置, 即 $u(t) = V_\pi/2$ 时, 如图 3-37 中 Q_1 点的位置, 则

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right) = P_{\text{in}}/2 \quad (3-27)$$

输入电压变化范围在 $0 \sim V_\pi$, 当输入电压等于 V_π 时, 产生一个 π 相移。图 3-37 所示为典型的 MZM 的传输函数曲线, 图中 V_π 为调制器的半波电压, 该曲线表示 $P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ 与输入电压的关系。在工作点 Q_1 点, MZM 的输出功率随射频信号而变化, 从而实现光信号的调制。

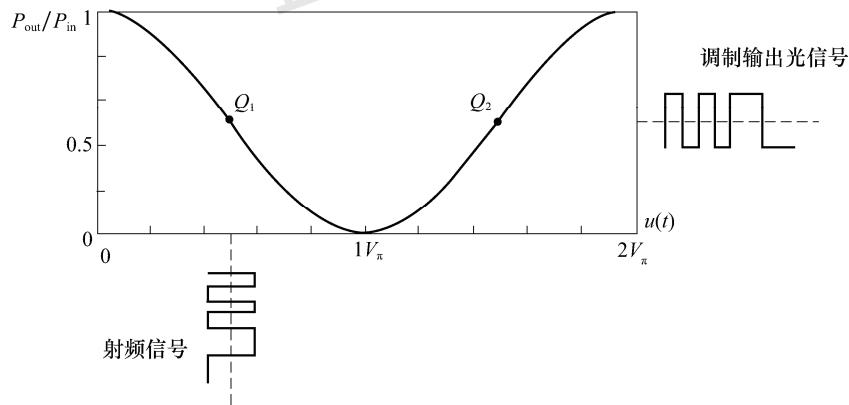


图 3-37 MZM 的传输函数曲线

MZM 的可以由单个电极结构驱动，也可以由两个电极结构驱动。在两个电极驱动结构中，两输入电压有 π 相位偏转（电极上施以互为相反相位变化的电压），称为双驱动推挽式马赫-曾德尔调制器（DD-MZM）。DD-MZM 可以实现低电压驱动，故可实现啁啾可调特性。

为解决光长距离传输的问题，各种新型的调制格式应运而生，这些新的调制码型能够有效减小信道间隔，增强光信号在传输过程中抵抗各类干扰的能力，使得整个光纤通信系统的传输距离和容量得到有效的提高。这些新型的调制格式主要包括基于相位调制的 BPSK 和 QPSK 及结合偏振复用的调制技术 PM-QPSK 等。

【讨论与创新】上网搜索资料，讨论马赫-曾德尔调制器有什么缺点？马赫-曾德尔调制器的调制电压高、损耗大、不能集成，对于以上不足，我们怎么办？

3.3.4 电吸收调制器

1. 电吸收调制器原理

电吸收调制器（EAM，Electro Absorption Modulator）是一种半导体器件，它通过施加电压来控制（调制）激光光束的强度，其工作原理为 Franz-Keldysh 效应，施加的电场引起体材料有效能隙减小，使得吸收边发生移动，从而导致吸收光谱发生改变。

为了得到高的消光比，EAM 通常采用量子阱结构。当在垂直于量子阱壁的方向上施加电场时，量子阱能带发生倾斜，电子与空穴的量子能级下降，激子束缚能降低，总的结果使吸收边发生移动。

EAM 的基本结构是一个 PIN 管，I 区部分为多量子阱（MQW）结构。当 EAM 上有外加调制电压时，I 区材料的吸收区边界移动，使得光源发送波长在调制器材料吸收范围内，入射光完全被 I 区吸收，入射光不能通过，相当于“0”码；反之，当调制电压为零时，带隙恢复初始态，入射光不被 I 区吸收而通过它，此时该波长的输出功率最大，调制器为导通状态，相当于“1”码，从而实现对入射光的调制。

EAM 在速度和啁啾方面的特性不如铌酸锂调制器，但具有体积小，输入电压低，耗电量小等优点，可工作在更低的工作电压下，调制带宽可达几十 GHz。EAM 一个很重要的特性是它可以与 DFB-LD 集成到一个芯片上。

2. 电吸收调制激光器

电吸收调制激光器（EML）是电吸收调制器（EAM）与 DFB-LD 的集成器件，其结构如图 3-38 所示。

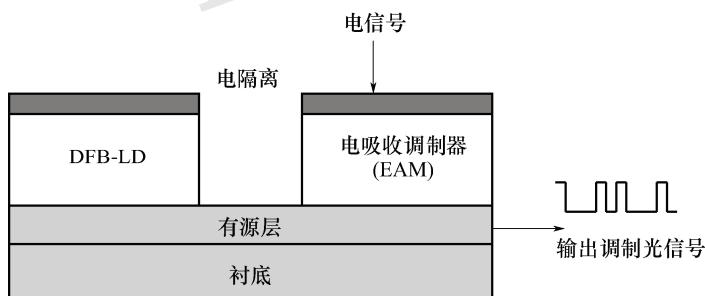


图 3-38 EML 的结构

EML 的优点如下：

- ① EML 中的激光二极管工作于恒定功率，激光器电流不被调制，解决了 DFB-LD 在高频调制下由啁啾引起的光谱展宽及激光二极管的张弛振荡现象。

② 调制器和激光二极管之间直接耦合，提高了耦合效率和调制光的输出功率。

③ EML 减小了封装尺寸，降低了成本。

因此，EML 是高速光纤通信技术中的理想光源。EML 主要用于更高的速度（大于 25Gb/s），在电信应用中使用的距离更长（10~40km）。EML 的频率响应依赖于 EAM 部分的电容，该电容可以使工作速度更快，甚至超过 40GHz。EML 中的消光是由于吸收引起的，其系数随施加于 EAM 的调制电压的变化而变化，当输入电压较大时，消光比增大。

EML 产品同样分为芯片产品、组件产品和模块产品。模块产品内包含组件产品，组件产品内包含芯片产品，所以 EML 模块的关键核心是 EML 芯片。因为 EAM 和 EML 均属于高频器件，在封装设计过程中必须考虑传输线匹配、反射及高频损耗等，以达到在整个频率响应范围内的响应度平坦、抖动最小，同时带宽又足够大。因此，当 EML 应用在 10Gb/s 或更高传输速率的光传输系统时，必须从微波设计方面进行更多的考虑。

【讨论与创新】现阶段商用的 EML 最高的调制速率是多少？

3.3.5 光调制器及其参数

如图 3-39 所示为调制速率为 2.5Gb/s 的 MZM，其中干涉仪的偏置点可通过外加的电压来设置。该调制器是为密集波分复用（DWDM）中长距离传输系统应用而设计的，其特性参数如表 3-4 所示。

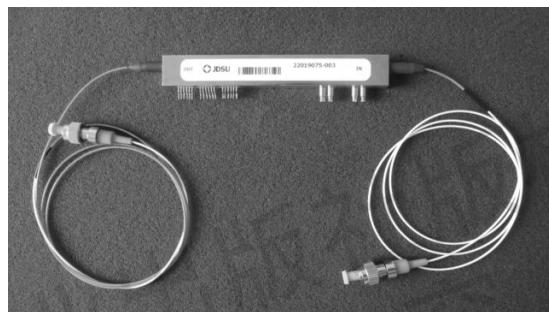


图 3-39 2.5Gb/s 的 MZM

表 3-4 MZM 的特性参数

材料	铌酸锂
波导制作	钛内扩散技术
工作波长	1530~1565nm
插入损耗（无连接头）	≤4.5dB
消光比（低频）	≥20dB
光回波损耗	≥50dB
输入电压（峰峰值，2.5Gb/s PRBS）	3.9V
半波电压（100kHz）	≤4.5V
S21 电光带宽（-3dB）	≥2.5GHz
S11 回波损耗（0.03~2.5GHz）	≤-8dB
RF 输入功率	≤24dBm
啁啾参数	$ \alpha < 0.2$
半波电压（DC）	≤8.5V
输入光纤	SM-15-P-8/125-UV/UV-400
输出光纤	SMF-28

3.4 光发射组件

3.4.1 概述

随着光通信技术的发展，对光器件性能的要求越来越高，在光纤通信应用中，LD和其他相关的部件一起做成光发射组件（TOSA，Transmit Optical Sub-Assembly）。

光发射组件也称为光发射次模块。由于 LD 和光接收组件的封装形式多种多样，各个厂家使用的光发射组件的封装形式、管壳外形尺寸等相差较大，业界没有统一的标准。

光发射组件一般包括下面的器件，但不包括电路。

- 激光器：一般有 VCSEL-LD、FP-LD、DFB-LD。
- 光隔离器（ISO）：防止反射光进入激光器而影响激光器的性能。
- 光滤波器：如布拉格滤波器，用来选择合适的光波长，用于 DWDM 系统。
- 调制器：如 MZ 调制器和电吸收调制器（EAM），用于高速率的系统。
- 尾纤：激光器与光纤的耦合部分，以便将光很好地耦合到光纤。
- 热敏电阻和热电制冷器：用于 LD 自动温度控制。

一般来说，TOSA 封装有同轴型（包括尾纤）封装、蝶形封装、双列直插式封装等。

光发射组件有多种类型，其速率、发射波长、LD 芯片类型各不相同，常见的有 850nm VCSEL TOSA、低速 1310nm FP-LD TOSA、高速 1550nm DFB-LD TOSA、高速 EMLTOSA 等。

1. 同轴型封装

为了避免损害、保证清洁，提高机械强度，抵抗恶劣环境，提高光学性能和连接强度等，激光器可做同轴型封装（TO 封装）。光发射组件的同轴型封装带有尾纤，如图 3-40（a）所示。TO 封装是简单的圆柱形封装，激光器管芯和背光检测管粘接在热沉上，通过键合的方法与外部实现互联，并且 TO-CAN（一种封装形式）一定要密闭封装。耦合部分一般都是透镜，透镜可以直接装在 TO-CAN 上。

TOSA 的引脚、LD 正负极如何识别呢？

常见的 TOSA 引脚排列有 A、B、C 3 种类型，不同类型的封装中，LD+、LD-、PD+、PD- 等引脚的排列位置不同。目前最常见的类型为 A 型，如图 3-40（b）所示。此图为底视图，涂阴影的引脚（CASE）与外壳相连。TOSA 一般为 4 个脚，具体产品可查阅产品说明。

LD/LED 与光纤的耦合主要是尾纤式同轴封装。

LED 通常和多模光纤耦合，用于 $1.3\mu\text{m}$ （或 $0.85\mu\text{m}$ ）波长的小容量短距离系统。因为 LED 发光面积和光束辐射角较大，而多模 SIF 光纤或 G.651 规范的多模 GIF 光纤具有较大的芯径和数值孔径，所以有利于提高耦合效率，增加入纤光功率。

LD 通常和 G.652 或 G.653 规范的单模光纤耦合，用于 $1.3\mu\text{m}$ 或 $1.55\mu\text{m}$ 大容量长距离系统。

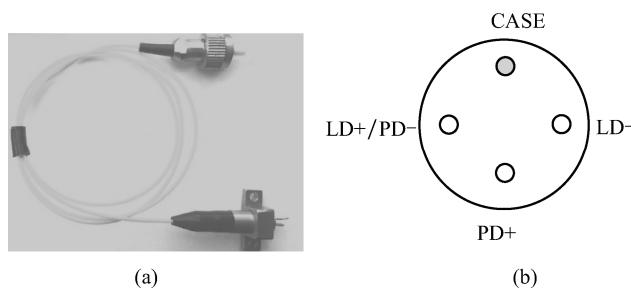


图 3-40 同轴封装的光发射组件（TOSA）

LD 与光纤的耦合可以分为两大类。

一种是分离透镜耦合，即在光源和光纤之间插入光学元件的方法，如插入微透镜耦合、宏透镜耦合等；另一种是光纤直接耦合，即光纤和光源直接耦合，而不经过任何系统。

在许多光纤耦合系统中，常利用柱透镜、球透镜、自聚焦透镜及锥形光纤等相互组合来提高耦合。由于从谐振腔反射镜输出的光，其出光方向一致性好，发散角小，所以 LD 与光纤的耦合效率较高，一般用直接耦合方式就可达 20% 以上。

光源器件与光纤的耦合效率与下列因素有关：光源发出的光的辐射图形、光源出光面积与纤芯面积之比，以及两者之间的对准程度、距离等。



图 3-41 蝶形封装光发射组件 (TOSA)

2. 双列直插式封装和蝶形封装

LD 的双列直插式封装 (DIP) 和传统电子技术中的封装技术一样。蝶形封装则因其外形而得名，如图 3-41 所示。这两种封装都带有耦合尾纤，一直被光纤通信系统所采用。根据应用条件不同，蝶形封装可以带制冷器，也可以不带制冷器。

蝶形和双列直插式封装使用与 TO 封装一样的芯片，不同于 TO 封装的是，蝶形和双列直插式封装内部包括很多其他组件，这个特点使蝶形和双列直插式封装更易“即插即用”。蝶形和双列直插式封装中包括激光器芯片和探测光电二极管，另外还集成了一个制冷器和热敏电阻。因为封装中集成了温度元件，再使用一个合适的 PID 温度控制器，就可以很精确地测量芯片温度，更好地进行温度控制。

在长距离光纤通信系统中，由于对光源的稳定性和可靠性要求较高，因此需要对激光器管芯温度进行控制而加制冷器、热敏电阻。对于一些可靠性要求较低的数据通信或短距离应用的激光器，可以不加制冷器。

3. LC/SC 接口 TOSA

TOSA 还有 LC 或 SC 接口形式的封装，该封装带有 LC 或 SC 接口。LC 接口的 TOSA 如图 3-42 所示。使用时应注意引脚的功能，可查阅产品说明书。

3.4.2 光发射组件举例及其参数

Lumentum 850nm LC 接口光发射组件 (TOSA) 如图 3-42 所示。该组件是为 10Gb/s 高速数据通信应用的光收发模块而设计的，激光器是 VCSEL 芯片，其特性参数如表 3-5 所示。



图 3-42 Lumentum 850nm LC 接口光发射组件 (TOSA)

表 3-5 Lumentum 850nm LC 接口光发射组件的特性参数

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
波长	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$	840	850	860	nm
TOSA 壳工作温度		-10		85	°C
RMS 谱宽	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$, 调制速率 10.3125Gb/s			0.4	nm
λ_T 温度系数		0.06			nm/°C
相对强度噪声 (RIN)	调制速率 10.3125Gb/s			130	dB/Hz
上升时间	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$, 调制速率 10.3125Gb/s		45		ps
下降时间	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$, 调制速率 10.3125Gb/s		50		ps
阈值电流			0.7	1.0	mA
I_{th} 温度变化	$T=-10\sim85^{\circ}\text{C}$		+1.0		mA
LD 正向电压	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$		2.0	2.4	V
结电阻	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$	90	100	110	Ω
耦合效率			75		%
斜率效率	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$	0.105		0.175	mW/mA
斜率效率温度变化			-4000		$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
总电容 (@VCSEL)	偏置电流 6mA			0.6	pF
小信号带宽	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$	7.75			GHz
光回波损耗				-12	dB
监测 PD 光电流	$P_{\text{out}}=0.5\text{mW}$ $V_r=1.5\text{V}$	0.12		0.6	mA
监测 PD 暗电流	$V_r=1.5\text{V}$			500	nA
监测 PD 电容	$V_{\text{rm}}=1.5\text{V}$			50	pF

3.5 光发送机

光发送机的功能是把从电端机送来的电信号转变成光信号，并送入光纤线路进行传输。光发送机的研发和设计中需要综合考虑光、电、热、机械等问题，光纤通信对光发送机的稳定性、可靠性有很高的要求，怎么才能达到这样的要求呢？光发送机通常使用光发射组件（TOSA）、再加上偏置、调制、自动功率控制和自动温度控制等电路制作成模块化产品。

3.5.1 光发送机的组成

在光纤以太网、SDH、DWDM 光通信传输设备中，光信号的发送和接收都是采用标准化的收发一体化数字光模块提供双向光通信的，图 3-43 是计算机网络中光纤以太网交换机和光模块实物图。为了学习方便，我们分开介绍光发送机和光接收机，本节以通用的光模块发送部分为例介绍光发送机的组成和功能。

光模块（Optical Module）包括光发送和光接收两部分，光模块发送部分也称为光发送模块。一个典型的光发送模块主要由输入接口、LD 驱动和调制电路、光发射组件等构成，如图 3-44 所示。



图 3-43 光纤以太网交换机和光模块

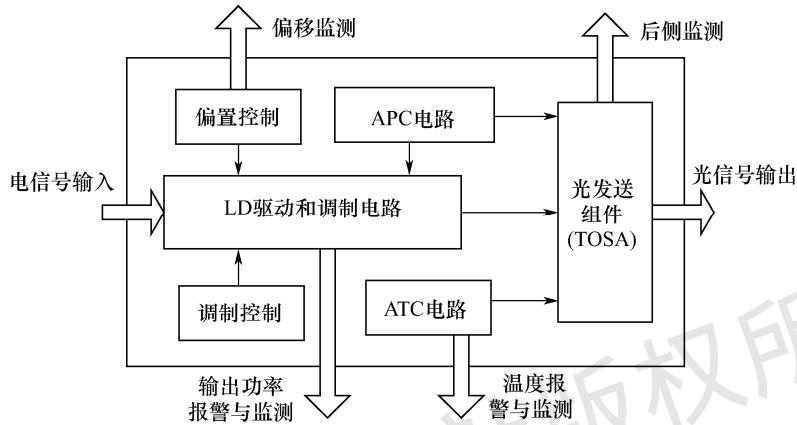


图 3-44 光发送模块

LD 驱动和调制电路也称为 LD 驱动器 (LDD, Laser Diode Driver)，包括调制电路、直流偏置电路、自动功率控制 (APC) 电路等。该部分是光发送机的核心，许多重要技术指标都由该部分决定。根据应用环境的不同，光发送模块内还需要温度自动控制 (ATC) 电路。

1. LD 驱动和调制电路

LD 驱动和调制电路的主要功能是实现 LD 的驱动和调制。LD 驱动电路为 LD 提供合适的偏置和调制电流，使激光器能够正常工作，其中偏置电流是恒定的，它使 LD 始终工作在阈值电流以上的线性区域内。调制电流随输入电信号而变化，实现光信号调制。

常用的调制电路是正发射极耦合逻辑电路 (PECL)，如图 3-45 所示。激光二极管 LD 的偏置电流为 I_{bias} ，阈值电流为 I_{th} ；PECL 由三极管 Q1 和 Q2 组成射极耦合开关，输入的电脉冲信号或电平变换后的信号分别加在两管的基极上，电流源由三极管 Q3 组成，它提供恒定的偏置电流。

PECL 是由 ECL 发展而来的，ECL 有两个供电电压 V_{CC} 和 V_{EE} ，当 V_{CC} 接地、 V_{EE} 接负电压时，即 $V_{CC}=0$, $V_{EE}=-5.2V$ ，这时电路称为负发射极耦合逻辑电路 (NECL)。当 $V_{CC}=+5V$, $V_{EE}=0V$ (V_{EE} 接地) 时，这时的电路称为正发射极耦合逻辑电路 (PECL)，图 3-45 就是 PECL 电路。

LVPECL (Low Voltage PECL) 电路是目前使用更广泛的新一代低电压供电的 PECL 电路，与 PECL 电路不同的是， $V_{CC}=+3.3V$, $V_{EE}=0V$ 。

PECL 电路的输入是一个具有高输入阻抗的差分对，这样允许的输入信号电平动态最大。

有的芯片在内部已经集成了偏置电路，使用时直接连接即可；有的芯片没有集成偏置电路，使用时需要在芯片外部加直流偏置电路。

电信号输入部分包括输入缓冲部分和电信号接口电路，完成LVPECL/PECL/TTL接口的电压变换。低速电信号（数据传输速率100Mb/s以下），一般采用TTL接口，高速电信号采用PECL接口。输入缓冲部分可以产生高电平和低电平，分别对应逻辑的“1”和“0”，而与输入电信号电压的高低无关。有的光发送模块的接口电路还能实现电信号编码和串并变换等功能。

图3-45中，当输入电压 V_1 高于 V_{BB} 时，Q1导通，而Q2截止，LD中没有电流流过，LD不发光。当输入电压 V_1 低于 V_{BB} 时，Q1截止，Q2导通，LD中有电流流过，LD发光。Q1和Q2轮流导通和截止，LD上的电流便随着输入信号的变化而变化，输出光功率也随之变化，即电信号被调制到了光载波上。

由于三极管一直工作在非饱和状态下，因此消除了限制调制速度的主要障碍——三极管的饱和时间，极大程度上改善了电路的开关速度，使之能应用于传输速率较高的数字光纤通信系统中。

为了使激光器输出较好的光信号，首先要对其设置合适的偏置电流，即激光器的最佳静态工作点，保证电信号有足够的线性调制区域，从而输出无失真的光信号，所以激光器的偏置电流(I_{bias})应大于阈值电流(I_{th})。不同类型的激光器，其阈值电流相差很大，VCSEL的阈值电流一般小于5mA，而FP-LD、DFB-LD的阈值电流一般为10~20mA。

2. 自动功率控制(APC) 电路

由于温度变化和工作时间加长，激光器的输出光功率会发生变化，为了使光发送机输出稳定的光功率信号，必须采用相应的负反馈措施来控制光源器件的发光功率。可能引起激光器输出功率变化有两个因素：芯片温度的变化和激光器的老化效应。

激光器的阈值电流一般随温度的变化而发生剧烈变化，所以，在室温下性能良好的激光器在温度过高时，其发光性能随温度变化而产生的变化也有很大的差异。DFB-LD的阈值电流随温度的变化比较大，在85°C时的阈值电流可达50mA，再加上器件老化引起的阈值电流增大，阈值电流高达60~70mA。因此，为了适应不同类型的激光器，要求激光器的偏置电流有比较大的可调范围，一般为10~100mA。

激光器的老化还会使阈值电流变大，降低发光效率。根据光纤通信设备的要求，为了使信号得到有效、可靠及稳定地传输，作为光发送模块性能指标之一的输出光功率必须稳定在一个很窄的范围内，由于以上不利因素，仅靠偏置电路的作用很难满足这种要求。因此，激光器需要一个自动功率控制(APC) 电路，以对偏置电流进行补偿控制，使得偏置电流相对于阈值电流的差值相对稳定，从而可以保持基本稳定的光功率输出。

APC电路利用与LD封装在一起的光电二极管(PD)，监测LD后向输出的光，根据PD输出光电流的大小，采用负反馈电路控制自动改变LD的偏置电流，使LD的输出光功率保持恒定，如图3-46所示。从LD背向输出的光功率，经PD检测、放大器A负反馈放大，送到电流源Q4的基极，调节LD的偏置电流，使LD输出的光功率保持稳定。

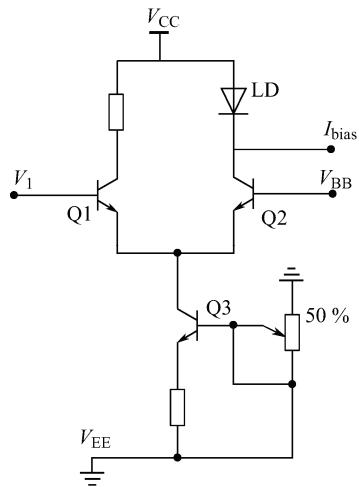


图3-45 LD的调制电路

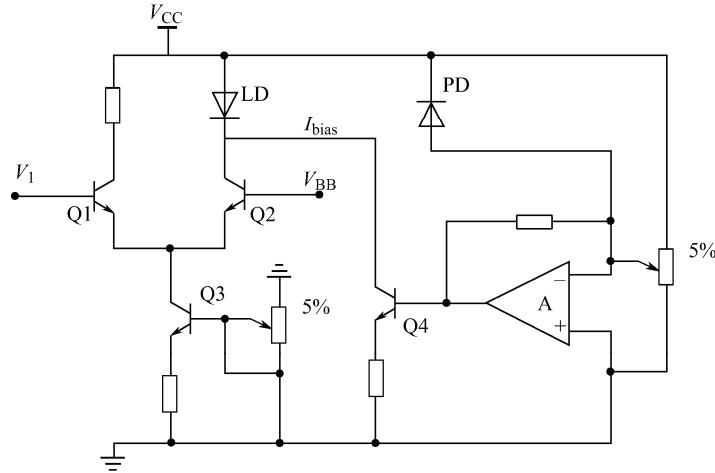


图 3-46 LD 的调制电路和 APC 电路

例如，当 LD 工作温度升高、LD 输出光功率减小时，PD 的输出电流就减小，导致放大器 A 输出电压增加，Q4 的电流增大，叠加在 LD 偏置电流上，使 LD 的偏置电流增加，使得 LD 输出的光功率增大，其变化过程如下：

$$P_{LD} \downarrow \rightarrow I_{PD} \downarrow \rightarrow U_A \uparrow \rightarrow I_{LD} \uparrow \rightarrow P_{LD} \uparrow$$

光发送模块的监测电路包括调制电流、偏置电流、工作温度及输出功率的报警与监测等电路。

3. 温度自动控制（ATC）电路

激光器的阈值电流、偏置电流、输出光功率与激光器的工作温度有密切关系。激光器的阈值电流随温度变化，随着温度的升高，激光器的效率降低，输出光功率及激光器发射波的峰值波长发生变化。为了保证激光器的工作状态，即阈值电流不变，输出功率不变，必须通过温度自动控制（ATC）电路来控制激光器的工作状态，消除温度变化带来的影响。

密集波分复用（DWDM）要求光源峰值波长的间隔尽可能地小，对于采用 0.8nm（100GHz）信道间隔的 DWDM 系统，一个 0.4nm 的波长变化就能把波长从一个信道移到另一个信道上。DWDM 激光器的波长容差典型值为 $\pm 0.1\text{nm}$ ，DFB-LD 波长的温度依赖性典型值约为 $0.08\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。另外，实验表明，温度每升高 30°C ，激光器的寿命会降低一个数量级。对于可靠性要求高的场合，为保证激光器的寿命，也需要对激光器管芯温度加以控制，这样在光发送机中就需要附加一个 ATC 电路来实现对激光器管芯的温度控制。

激光器的温度控制示意图如图 3-47 所示，首先将激光器、热敏电阻等安装在一个热沉上，然后再固定到制冷器上。

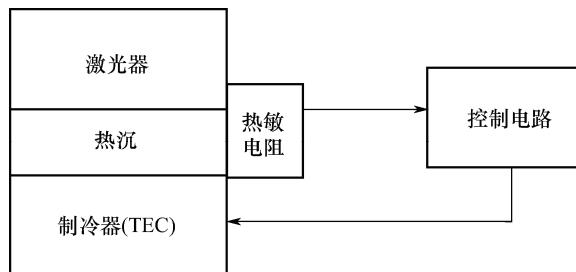


图 3-47 激光器的温度控制示意图

激光二极管的制冷器大多采用半导体制冷器，也称热电制冷器（TEC），它是利用半导体材

料的珀尔帖效应制成的电偶来实现制冷的。当直流电流通过两种半导体组成的电偶时，出现一端吸热另一端放热的现象，这种现象称为珀尔帖效应。微型半导体制冷器的温差可以达到30~40℃。半导体制冷器有两种工作模式——制冷或制热，使用时改变制冷器工作电流的方向，即可改变制冷器的制冷或制热状态。

为提高制冷效率和温度控制精度，把制冷器和热敏电阻封装在激光器管壳内。热敏电阻能够监测激光器芯片的温度变化，均采用负温度系数热敏电阻，25℃时的电阻约为10kΩ，温度升高，电阻值下降，温度控制精度可达±0.5℃。

自动温度控制(ATC)电路如图3-48所示，主要由 R_1 、 R_2 、 R_3 和热敏电阻 R_t 组成电桥。通过电桥把温度的变化转换为电量的变化，放大器A的差动输入端跨接在电桥的对端，用以改变三极管Q的基极电流。在设定的温度，电桥平衡，A、B两点没有电位差，传输到放大器A的信号为零，流过制冷器TEC的电流为零。

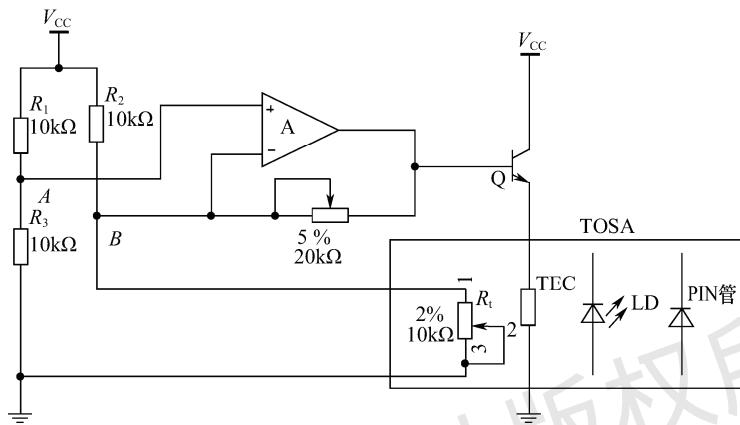


图3-48 ATC电路

当环境温度升高时，LD的管芯和热沉温度也升高，使具有负温度系数的热敏电阻 R_t 的阻值减小，电桥失去平衡。这时B点的电位低于A点的电位，放大器A的输出电压升高，三极管Q的基极电流增大，流过制冷器TEC的电流也增大，制冷效果增强，制冷端温度降低，热沉和管芯的温度也随之降低，从而保持了LD的温度恒定。其变化过程如下：

$$T_{LD} \uparrow \rightarrow R_t \downarrow \rightarrow U_{BA} \downarrow \rightarrow U_A \uparrow \rightarrow I_{TEC} \uparrow \rightarrow T_{LD} \downarrow$$

反之，当环境温度降低时，LD的管芯和热沉温度也降低， R_t 的阻值增大，电路的工作过程和上面过程相反，最终也会保持LD的温度恒定。ATC电路使激光器输出的平均功率和发射波长保持恒定，避免调制失真。

ATC电路仿真时，可用可调电阻代替热敏电阻实现仿真分析。

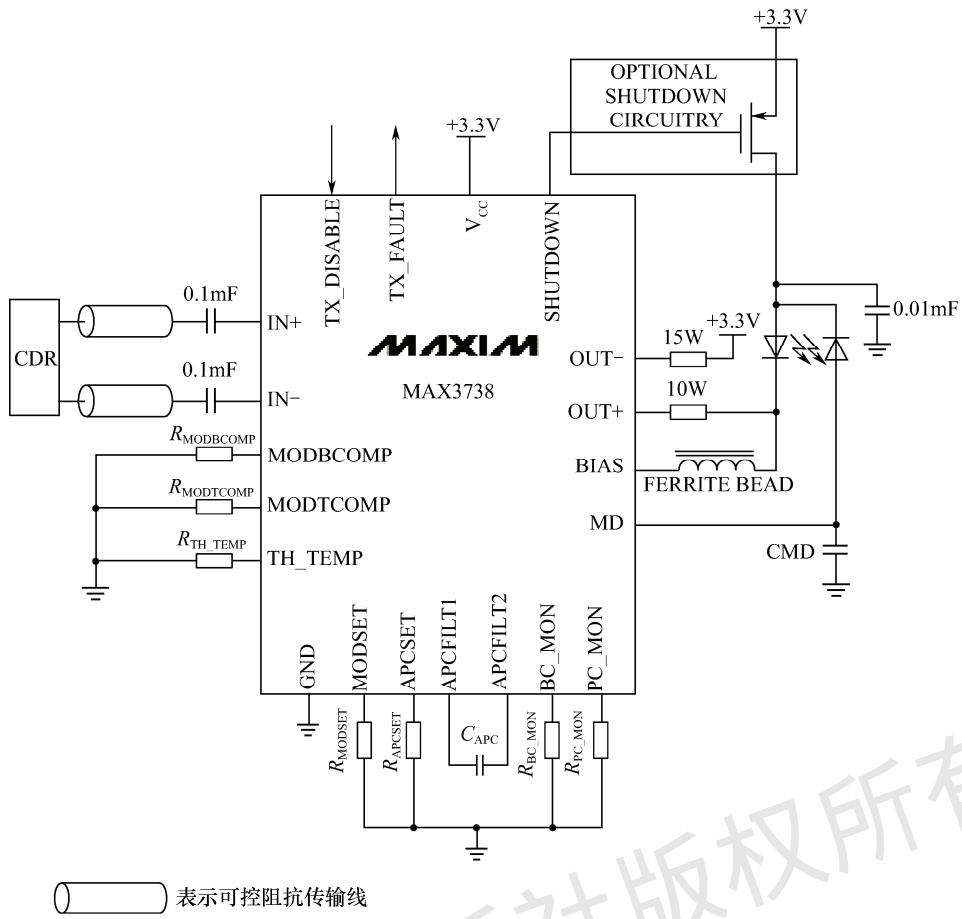
在实际应用要求不高的情况下，光发送模块并不包括ATC功能，可根据需要决定是否在光发送模块中增加ATC电路。

3.5.2 光发送机电路芯片

1. MAX3738 激光驱动器

MAX3738为+3.3V激光驱动器，是专为传输速率从155Mb/s至4.25Gb/s的多速率收发模块而设计的。激光器直流耦合到MAX3738，减少了外部元件数量，易于多速率运行，其应用如图3-49所示。

MAX3738内部电路主要包括高速调制驱动电路、消光比控制电路和安全逻辑控制电路。



() 表示可控阻抗传输线

图 3-49 MAX3738 的应用

高速调制驱动电路包括输入级和输出级两部分，主要由输入缓冲、数据通道和高速差分对组成，其功能是对输入信号进行调制控制，并为外部激光器提供所需的激励信号。

消光比控制电路主要包括两部分：自动功率控制（APC）电路和自动调制控制（AMC）电路。APC 电路保持平均光功率恒定，AMC 电路根据偏置电流调节调制电流。这些控制电路具有温度补偿功能，在整个温度范围和有效使用期限内保持恒定的消光比。

安全逻辑控制电路主要包括传输控制电路、锁存失效输出电路和失效指示电路，主要功能是为驱动器正常工作提供安全保障，对驱动器工作状态进行监控，同时提供驱动器工作状态和失效信息。

MAX3738 接收差分数据输入信号，具有 5~60mA（交流耦合时最大达 85mA）的宽调制电流范围和高达 100mA 的偏置电流范围，尤其适合于驱动 FP/DFB 激光器，通过外部电阻可设置所需的激光器电流值。MAX3738 采用 4mm×4mm、24 引脚薄型 QFN 封装，且工作在 -40~+85°C 的温度范围内。

MAX3738 的应用：1G/2G/4Gb/s 光纤通道 SFF/SFP 和 GBIC 收发器；千兆位以太网 SFF/SFP 与 GBIC 收发器；多速率 OC-24 至 OC-48 FEC 收发器。

下面结合实际应用，分析电路设计时需要注意的一些问题。

(1) 激光器驱动电路外部接口

激光器驱动电路的耦合驱动方式（激光器驱动方式）有两种，即激光器直流耦合驱动方式

(DC 耦合) 和激光器交流耦合驱动方式 (AC 耦合)。激光器驱动方式与激光器调制速率密切相关, 目前 1.25Gb/s 及以下速率激光器一般均采用直流耦合驱动方式, 2.5Gb/s 激光器根据具体情况和实际要求可采用交流耦合驱动方式。这两种驱动方式各具优势, 应用于不同速率激光器的调制输出接口电路。

在设计过程中, 为使电路正常工作, 各种电流有一定的条件限制。若所需调制电流不大于 60mA, 可采用直流耦合驱动方式; 若调制电流大于 60mA, 则应采用交流耦合驱动方式。

(2) 消光比控制

MAX3738 的最大优点是能维持消光比稳定。消光比 (ER) 由最大光功率 P_1 和最小光功率 P_0 的比值所确定。若峰值光功率 $P_{\text{p-p}}$ 和平均光功率 P_{avg} 保持不变, 则消光比保持恒定。

电路通过调节偏置电流 I_{bias} 变化以维持平均光功率 P_{avg} 的稳定, 而通过调节调制电流变化以维持光峰值功率稳定。激光器斜率效率 η 降低时, 通过补偿调制电流, 能够在整个有效使用期限内和温度范围内保持峰值功率恒定。

根据光模块输出光功率及消光比要求, 结合所选用激光器的特性, 可以计算出电阻 R_{APCSET} 和 R_{MODSET} 的范围。

(3) APC 电路中监控光二极管反馈电流的设计

MAX3738 在任何时候都工作在 APC 模式, 偏置电流将自动设置, 平均光功率由 APCSET 引脚的外部电阻 R_{APCSET} 确定。

(4) 调制电流的设计

MAX3738 内部集成了 K 因子调制补偿和片内温度补偿功能, 因此, 调制电流 I_{mod} 由 3 部分组成: 固定调制电流 ($I_{\text{mod}}^{\text{fix}}$)、偏置补偿调制电流 ($K \cdot I_{\text{bias}}$) 和温度补偿调制电流 ($I_{\text{mod}}^{\text{temp}}$), 它们之间的关系为

$$I_{\text{mod}} = I_{\text{mod}}^{\text{fix}} + K \cdot I_{\text{bias}} + I_{\text{mod}}^{\text{temp}} \quad (3-28)$$

固定调制电流 $I_{\text{mod}}^{\text{fix}}$ 是指 MAX3738 没有启用调制补偿和温度补偿时的调制电流, 驱动器所需的调制电流由 MAX3738 内部电路和 MODSET 引脚外接电阻 R_{MODSET} 所确定。用户通常首先根据实际要求, 确定所需要的固定调制电流 $I_{\text{mod}}^{\text{fix}}$, 然后确定 MODSET 引脚的外接电阻 R_{MODSET} 。

偏置补偿调制电流 $K \cdot I_{\text{bias}}$ 是偏置电流变化所引起的, 其作用大小由补偿因子 K 值确定, 而 K 值大小由 MODCOMP 引脚外接电阻 R_{MODCOMP} 所确定。

温度补偿调制电流 $I_{\text{mod}}^{\text{temp}}$ 是指当 MAX3738 的工作温度超过预设的工作温度时, 温度补偿电路就提供一定大小的电流补偿, 作用是补偿温度变化对调制电流的影响, 其大小与工作温度和阈值温度有关, 由 TH-TEMP 引脚外接电阻 $R_{\text{TH-TEMP}}$ 和 MODTCOMP 引脚外接电阻 R_{MODTCOMP} 所确定。

(5) APC 电路滤波电容的设计

在 APC 电路中, 滤波电容 C_{APC} 可以延迟 APC 电路的作用时间, 从而有效降低低频信号的干扰。

2. TEC 驱动器芯片

MAX8521 是光模块业内尺寸最小的 TEC 驱动器之一, 用于 SFF/SFP 模块, 可减少发热 50%。其应用如图 3-50 所示。

MAX8520/8521 设计用于驱动空间受限的光模块中的制冷器 (TEC)。这两款芯片提供 $\pm 1.5\text{A}$ 输出电流, 有一路模拟输出信号监测 TEC 电流, 独特的纹波抵消技术有助于减小噪声, 具有精确的、独立可调的加热电流限制和冷却电流限制, 以及最大 TEC 电压限制, 以提高光模

块的可靠性。MAX8520 采用 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ TQFN 封装，通过外部电阻调节，开关频率可高达 1MHz 。MAX8521 也采用 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ TQFN 封装，具有 500kHz 或 1MHz 可选择的开关频率。

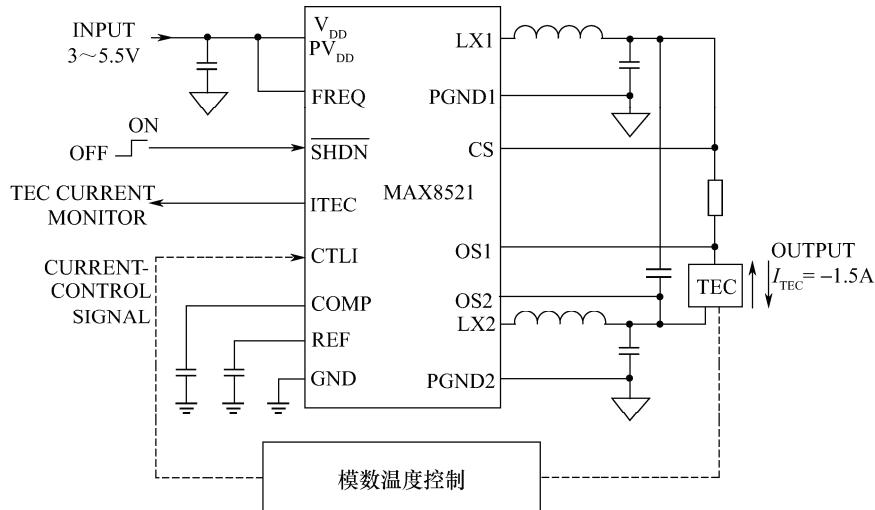


图 3-50 MAX8521 的应用

3.6 习题与设计题

(一) 选择题

1. 已知 LD 光源的功率为 0dBm ，对应下面的那个值？（ ）
 (A) 1mW (B) 10mW (C) 0.1mW (D) 20mW
2. 光模块的发射部分由下面哪几部分组成？（ ）
 (A) 输入接口 (B) 调制驱动电路 (C) 光发射组件 (D) 监控电路
3. 根据发光二极管光辐射方式，LED 有哪两种类型？（ ）
 (A) SLED (B) ELED (C) SLD (D) LED
4. 下面光源中，哪个光源的谱线宽度最小？（ ）
 (A) LED (B) DFB-LD (C) SLD (D) FP-LD
5. 单纵模激光器的光谱宽度是主模的最大峰值功率跌落（ ）时的光谱宽度。
 (A) 3dB (B) 10dB (C) 20dB (D) 30dB

(二) 问答题

1. 光与物质间的相互作用过程有哪些？
2. 为什么 LED 会有很多种颜色？为什么 LED 的谱线比较宽？
3. LED 的调制带宽为什么不高？
4. 什么是粒子数反转？FP-LD 是如何实现激光辐射的？
5. 什么是激光器的阈值条件？
6. 画图并说明光源的谱线宽度是怎样定义的？
7. DFB 激光器的结构是怎样的？有何优点？
8. 量子阱 (QW) 半导体激光器结构是怎样的？有何优点？
9. VCSEL 激光器的结构是怎样的？有何优点？
10. 简述电吸收波导调制器的工作原理。

11. 画出 MZM 调制器的原理图，简述工作原理。
12. 画出 LD 发送模块的框图，说明各部分的功能。

(三) 计算题

1. 激光二极管发射光子的能量近似等于材料的禁带宽度，已知 GaAs 材料的 $E_g=1.43\text{eV}$ ，InGaAsP 材料的 $E_g=0.96\text{eV}$ ，求两种材料的激光器各自发射光子的波长。
2. 有一个 FP-LD，工作波长 $\lambda=850\text{nm}$ ，谐振腔长 $500\mu\text{m}$ ，激活物质的折射率 $n=3.7$ ，激光器的纵横间隔是多少？

(四) 设计题

1. LD 驱动调制电路仿真设计。

本设计综合电子线路、光发送模块知识。学习光模块电路原理，学习 MAX3757、MAX3272 芯片原理，画出 LD 驱动调制电路及 APC 电路原理图，仿真分析电路原理，提交设计报告。

2. 自动温度控制（ATC）电路的仿真设计。

画出 LD 自动温度控制电路，仿真分析电路原理，提交设计报告。

项目实践：光模块特性及眼图测试

【项目目标】

掌握光模块主要参数及测试方法。

【项目构思与设计】

项目实施前，应根据现有的技术和设计规范，分析问题，归纳要求，构思设计项目。

工厂生产的光模块必须经过严格测试才能使用。根据光模块测试指标设计项目，需要学习光模块测试指标，设计光模块测试方案和眼图测试方案。同时需要学习常见光纤通信测量仪器的原理和使用方法，在教师指导下学习和使用实验设备。

在项目实施过程中，采用团队模式，成立项目组，2~4 个同学一组，每个学生在组内有不同的角色，充分发挥学生的积极性，测试时发现问题，相互讨论，分析问题和解决问题。

仿真设计：不具备实验条件的情况下，可使用 OptiSystem 软件仿真设计，观察光脉冲的传输和眼图。

【项目内容与实施】

1. 光发送部分主要参数的测试

(1) 平均光功率

平均光功率即为光模块中激光器输出的光功率。其测量方法是以标准跳线连接光模块发射端口与光功率计，直接由光功率计上读出，单位通常以 dBm 表示。发射部分的平均光功率输出大小直接影响到传输距离的远近，因此是光纤通信系统中一个非常主要的指标。平均光功率要求有良好的稳定性，是指在器件老化或环境温度变化时，平均光功率的输出要保持稳定。光模块发送部分测试框图如图 3-51 所示，工厂里一般采用光模块测试板。

误码仪（Bit Error Ratio Tester）由码型发生器和误码分析仪组成。它通过比较码型发生器产生的数据码和光接收机收到并转换成电信号的数据码来测试待测光接收机在不同输入光功率时的误码率。码型发生器产生的数据码发送伪随机二进制序列（PRBS，Pseudo Random Binary Sequence）。PRBS 序列长度为 $2^n - 1$ ，即每隔 $2^n - 1$ 个比特就重复。PRBS 相当于“随机数据”，因此它的频谱特征（在有限频带内）与白噪声接近，所以它适合用于测试光纤通信系统的性能。

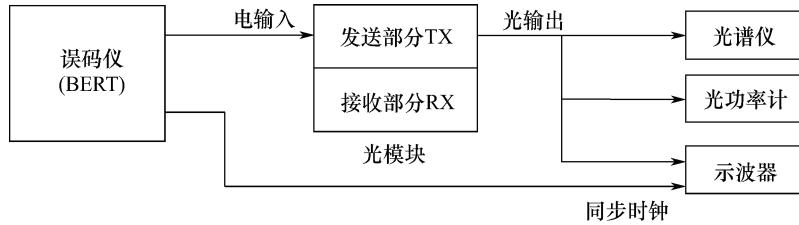


图 3-51 光发送部分测试框图

(2) 消光比

消光比 (ER, Extinction Ratio) 指光发送机的数字驱动电路送全“0”码，测得此时的光功率 P_0 ；给光发送机的数字驱动电路送全“1”码，测得此时的光功率 P_1 。我们常常把消光比进行取对数，将 P_0 、 P_1 代入式 (3-29)，计算如下

$$ER = 10 \lg \frac{P_0}{P_1} \quad (3-29)$$

式中，ER 表示以 dB 为单位的消光比； P_1 和 P_0 分别为“1”和“0”时的光功率大小。

消光比的大小决定了通信信号的品质。消光比越大，代表在光接收机会有越好的逻辑鉴别率；消光比越小，表示信号较易受到干扰，系统误码率会上升。消光比直接影响光接收机的灵敏度，从提高光接收机灵敏度的角度希望消光比尽可能大，有利于减少功率代价。但对于码速率很高的光纤传输系统，太高的消光比会导致啁啾现象的产生，降低系统的传输质量。一般对于 FP/DFB 直调激光器，要求消光比不小于 8.2dB，EML 电吸收激光器的消光比不小于 10dB。一般建议实际消光比与最低要求消光比大 0.5~1.5dB。

消光比的大小一般可以由示波器测试的光模块眼图来得到，通过观察输出眼图的眼睛中心处的 P_1 和 P_0 值，再经过式 (3-29) 计算即可得到消光比。

(3) 波长和光谱特性测试

单纵模激光器的主要能量集中在主模，所以它的光谱宽度定义为最大 - 20dB 带宽，即主模的最大峰值功率跌落到 - 20dB 时的最大带宽。

(4) 光源边模抑制比

边模抑制比 (SMSR) 是指主模的平均光功率 P_1 与最显著的边模的平均光功率 P_2 之比，通常取对数，如式 (3-30)。该技术指标是针对使用单纵模激光器的光发送机而言的，SMSR 应不小于 30dB。

$$SMSR = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (3-30)$$

光模块的光源光谱特性可用光纤光谱仪 (OSA) 直接测量。

2. 光接收部分主要参数的测试

(1) 光接收机灵敏度

灵敏度 (Sensitivity) 指在一定的误码条件下，光接收机所能接收的最低接收光功率，单位通常为 dBm。光接收部分测试框图如图 3-52 所示，工厂里一般采用光模块测试板。

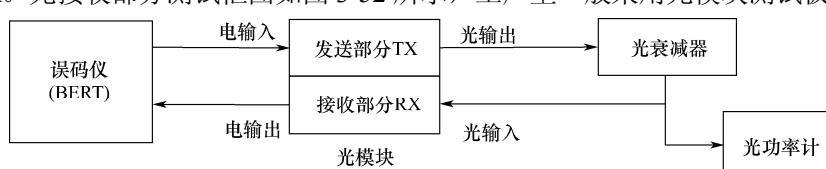


图 3-52 光接收部分测试框图

测量方法：首先用误码仪向光发送机的数字驱动电路发送 $2^{15}-1$ 的伪随机序列作为测试信号，调整光衰减器使其衰减值逐渐增大，从而使输入光接收机的平均光功率逐步减小，使系统处于误码状态，并且使得系统测试得到的误码率达到最高允许值（如 1×10^{-11} ），测得此时的光功率即为此误码率条件下光接收机的最小光功率，这也就是光接收机的灵敏度。

(2) 光接收机的动态范围

光接收机的动态范围 (DR, Dynamic Range) 是指在保证一定误码率的前提下，光接收机所允许接收的最大和最小光功率之比的分贝数，计算公式为

$$DR = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (3-31)$$

它表示了光接收机对输入信号变化时的适应能力。

测试光接收机动态范围的测量方法是：首先用误码仪向光发送机的数字驱动电路发送 $2^{15}-1$ 的伪随机序列作为测试信号，调整光衰减器使其衰减值逐渐减小，从而使输入光接收机的平均光功率逐步增大，使系统处于误码状态，并且使得系统测试得到的误码率为 1×10^{-11} ，测得此时的光功率即为光接收机的最大光功率，这也就是光接收机的动态范围的上限 P_{\max} 。反之，调整光衰减器使其衰减值逐渐增大，测得光接收机的动态范围的下限 P_{\min} 。

光模块在平时使用中，要注意光模块的清洁和保护。使用完后，塞上防尘塞，因为如果光触点不清洁，有可能影响信号质量，从而导致链路问题和误码问题。

3. 光模块眼图的测试

眼图 (Eye Diagram) 是将采集到的周期性信号波形累积叠加而形成的图形，在传输二进制信号波形时，叠加后的图形形状看起来和眼睛很像，故名眼图。

(1) 眼图的形成

对于数字信号，其高电平与低电平的变化可以有多种序列组合。以 3 比特 (bit) 为例，可以有 000~111 共 8 种组合，在时域上将足够多的上述序列按某一个基准点对齐，然后将其波形叠加起来，就形成了眼图。对于测试仪器而言，首先从待测信号中恢复出信号的时钟信号，然后按照时钟基准来叠加出眼图，最终显示出来。

如果信号没有受到干扰，得到归零码 (RZ) 完整的眼图，如图 3-53 (a) 所示；如果这 8 种状态中的信号受到噪声干扰，眼图就会不完整，如图 3-53 (b) 所示。

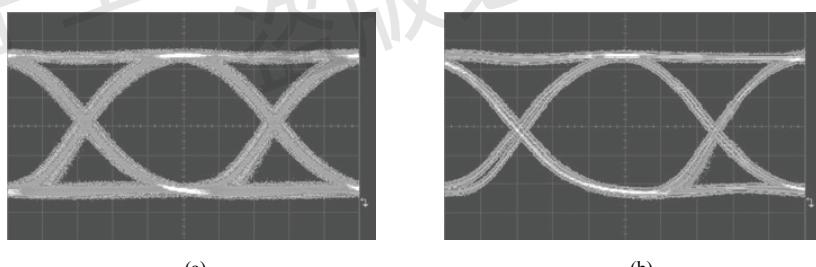


图 3-53 完整眼图和不完整眼图

(2) 眼图包含的信息

从一幅实际测量眼图可以看出数字波形的平均上升时间 (Rise Time)、下降时间 (Fall Time)、上冲 (Overshoot)、下冲 (Undershoot)、门限电平 (Threshold) 等参数。眼图参数有很多，如眼高、眼宽、眼幅度、眼交叉比、“1”电平、“0”电平、消光比、 Q 因子、平均功率等。

在眼图上叠加的数据足够多时，眼宽很好地反映了传输线上信号的稳定时间；眼高很好地反映了传输线上信号的噪声容限，同时，眼图中眼高最大的地方，即为最佳判决时刻。

在实际测试时，为了提高测试效率，经常使用到的方法是模板测试（Mask Test）。即根据信号传输的需求，在眼图上规定一个区域，要求左右的信号全部出现在这个区域之外，一旦菱形区域内有出现信号，则测试未通过。

通过眼图的形状特点可以快速判断信号的质量，这是观测系统性能最直观、最简单的方法。眼图可用于分析形成误码的原因。在无码间串扰和噪声的理想情况下，波形无失真，每个码元将重叠在一起，最终在示波器上看到的是迹线又细又清晰的“眼睛”。最佳采样时刻应是“眼睛”张开最大的时刻，采样失真反映了信号受噪声干扰的程度，水平中线对应判决门限电平。

由于眼图是用一张图形就完整地表征了串行信号的比特位信息，所以成为衡量信号质量的最重要工具，眼图测量有时就叫“信号质量测试”。此外，眼图测量的结果是合格还是不合格，其判断依据通常是相对于“模板（Mask）”而言的。模板规定了串行信号“1”电平的容限，“0”电平的容限，上升时间、下降时间的容限，所以眼图测量有时又被称为“模板测试”。不同信号编码的模板的形状是各种各样的，信号的眼图也就是各种各样的。

眼图的参数较多，充分理解眼图参数的含义并熟练地进行眼图测试，是一个工程师必须掌握的基本技能。

（3）光模块眼图的测试

若加上噪声，则使眼图的线条变得模糊，“眼睛”开启得小了，因此，“眼睛”张开的大小表示了失真的程度，反映了码间串扰的强弱。由此可知，眼图能直观地表明码间串扰和噪声的影响，可评价一个传输系统性能的优劣。

光发送机眼图测试框图如图 3-51 所示，误码仪向光发送机的数字驱动电路发送 $2^{15}-1$ 的伪随机序列作为测试信号，具有眼图功能的示波器可以直接观察到眼图。

（4）信号抖动测试

信号抖动指的是数字信号中短暂的时序偏移现象。一般的测量方法是取眼图中上升沿与下降沿的交叉点在时间上的分布。最常见的有表示最大时间偏移范围的峰-峰抖动（peak-to-peak jitter）及定义为分布标准差的均方根抖动（RMS jitter）。抖动以时间（ps/ns）为计量单位。

这里仅测试了光模块几个重要的参数，实际上光模块的技术指标很多，工厂生产的光模块制成品，为保证产品的质量，要经过多个步骤的测试方可出货，读者可参考专门的书籍。

【项目总结】

项目结束后，所有团队完成光模块特性和眼图测试过程，提交光模块特性和眼图测试报告。

【讨论与创新】

- (1) 为什么要采用伪随机序列作为测试信号？
- (2) 如何改善光模块的眼图性能？
- (3) 使用光模块时有哪些注意事项？