

ANGQIAN TONGXUN JIANCHE YU WEIHU SHIWU QUANSH

光缆通信 监测与维护 实务全书

 科学技术文献出版社

光缆通信监测与维护实务全书

(第二卷)

科学技术文献出版社

通信用光器件原理与维护



第四篇

第一章 光 源

第一节 概 述

光源是把电信号变成光信号的器件，在光纤通信中占有重要的地位。性能好、寿命长、使用方便的光源是保证光纤通信可靠工作的关键。

光纤通信对光源的基本要求有如下几个方面：首先，光源发光的峰值波长应在光纤的低损耗窗口之内，要求材料色散较小。其次，光源输出功率必须足够大，入纤功率一般应在 10 微瓦到数毫瓦之间。第三，光源应具有高度可靠性，工作寿命至少在 10 万小时以上才能满足光纤通信工程的需要。第四，光源的输出光谱不能太宽以利于传输高速脉冲。第五，光源应便于调制，调制速率应能适应系统的要求。第六，电—光转换效率不应太低，否则会导致器件严重发热和缩短寿命。第七，光源应省电，光源的体积、重量不应太大。

作为光源，可以采用半导体激光二极管（LD，又称半导体激光器）、半导体发光二极管（LED）、固体激光器和气体激光器等。但对于光纤通信工程来说，除了少数测试设备与工程仪表之外，几乎无例外地采用半导体激光器和半导体发光二极管。

下面针对光纤通信工程的需要介绍半导体中光的发射与激射，半导体光源的原理、结构与使用基本知识。

第二节 半导体中光的发射和激射原理

一、半导体价带、导带、带隙与发光

半导体单晶材料的原子是按一定规律紧密排列的。在各个原子之间保持一定的距离，是由于在各原子之间存在着相互作用力的结果，这些结合力就是共价键。固体物理学告诉我们，单晶中各个原子的最外层轨道是互相重叠的，这样就使分立的能级变成了能带。与原子的最外层轨道的价电子相对应

的能带叫做价带。价带上面的能带称为导带。在温度低至绝对零度的情况下,晶体中的电子均在价带之中,而导带是完全空着的。如果价带中的电子受热或光的激发,则受激发的电子就会跃迁到上面的导带中去。这样一来,晶体材料就可以导电了。把导带底的能量记作 E_c ,把价带顶的能量记作 E_v 。在 E_c 和 E_v 之间是不可能存在电子的,故称为禁带。把 E_c 与 E_v 之差记作 E_g ,称为禁带宽度或带隙。如果 E_g 较大,则需要较大的激励能量把价带中的电子激发到导带中去。对于绝缘体材料,由于禁带宽度 E_g 很大,价带中的电子很难跃迁到导带中去,因而它表现出良好的绝缘性能。导体材料的 $E_g = 0$,因此它表现出良好的导电性能。半导体材料的禁带宽度介于导体和绝缘体之间,因而它的导电能力也介于两者之间。

当价带中一个电子被激发到导带后,在价带中就留下了一个电子的空位。在电场的作用下,价带中邻近的电子就会填补这个空位,而把它自己的位置空出来,这就好像空位本身在电场的作用下产生移动一样。空位的作用好象一个带正电的粒子,在半导体物理学上把它叫作空穴。价带中的一个电子可以吸收外界能量而跃迁到导带中去,在价带中形成一个空穴。反之,导带中的一个电子也可以跃迁到价带中去,在价带中填补一个空穴,把这一过程叫做复合。在复合时,电子把大约等于禁带宽度 E_g 的能量释放出来。在辐射跃迁的情况下,释放出一个频率为

$$\nu = \frac{E_g}{h}$$

的光子,其中 h 是普朗克常数 (6.625×10^{-34} 焦耳·秒)。不同的半导体单晶材料的 E_g 值不同,发光波长也不同,因为电子和空穴都是处于能带之中,不同的电子和空穴的能级有所差别,复合发光的波长有所差别,但其频率接近于 ν 。

二、半导体掺杂、P 型半导体和 N 型半导体

上面说到的都是纯净、完整的理想半导体单晶的情况。在实际的半导体单晶材料中,往往存在着与组成晶体的基质原子不同的其它元素的原子——杂质原子,以及在晶体形成过程中出现的各种缺陷。进行材料提纯,就是为了去除有害杂质。进行各种处理,就是为了消除或减少某些缺陷。但是,在实际应用中,我们还要有意识地在晶体中掺入一定量的有用杂质,这些杂质原子对半导体起着极为重要的作用。我们知道,按照掺杂的不同,可以得到电子型半导体和空穴型半导体材料。

所谓本征半导体，是指含杂质和缺陷极少的纯净、完整的半导体。其特点是，在半导体材料中，导带电子的数目和价带空穴的数目相等。通常把本征半导体叫做 I 型半导体。所谓电子型半导体就是通过故意掺杂使导带的电子数目比价带空穴的数目大得多的半导体。例如，在纯净的 III - V 族化合物 GaAs 中掺入少量的 VI 族元素 Te，Te 原子取代晶体中的 As 原子，这样就得到了电子型半导体。Te 原子的外层有六个价电子，As 原子的外层有五个价电子，在形成共价键时每个 Te 原子向晶体提供一个电子，因而导带内就有许多电子，这种电子型半导体亦称为 N 型半导体。所谓空穴型半导体，就是通过故意掺杂使价带空穴的数目比导带电子数目大得多的半导体。例如，在纯净的 III - V 族化合物 GaAs 中掺入少量的 II 族元素 Zn。Zn 原子取代晶体中的 Ga 原子，这样就得到了空穴型半导体。Zn 原子的外层有两个价电子，Ga 原子的外层有三个价电子，在形成共价键时每个 Zn 原子向晶体索取一个电子，即向晶体提供一个空穴，因而价带内就有许多空穴，这种空穴型半导体也叫做 P 型半导体。

理论分析和实验结果表明，半导体的物理性质在很大程度上取决于所含杂质的种类和数量。更重要的是，把不同类型的半导体结合起来，就可以制作成各种各样的半导体器件，当然也包括这里要讲的激光二极管和发光二极管。请注意，这里所说的“结合”，并不是简单的机械的接触，而是在同一块半导体单晶内形成不同类型的两个或两个以上的区域。

三、半导体 p-n 结和 p-n 结光源

P 型半导体与 N 型半导体结合的界面称为 p-n 结，许多半导体器件（包括半导体激光器）的核心就是这个 p-n 结。前面提到，在 P 型半导体内有多余空穴，在 N 型半导体内有多余电子，当这两种半导体结合在一起时，P 区内的空穴向 N 区扩散，在靠近界面的地方留下了带负电的离子，N 区内的电子向 P 区扩散，在靠近界面的地方留下了带正电的离子。这样一来，在界面两侧就形成了带相反电荷的区域，叫做空间电荷区。由这些相反电荷形成一个自建电场，其方向是由 N 区指向 P 区。由于自建电场的存在，在界面的两侧产生了一个电势差 V_D ，这个电势差阻碍空穴和电子的进一步扩散，使之最后达到平衡状态。因此，我们把 V_D 叫做阻碍空穴和电子扩散的势垒。如图 4-1-1 所示的 p-n 结及能带，显然，P 区的能量比 N 区的提高了 eV_D ，其中 e 是电子的电荷量。如图中所示：对于轻掺杂的 p-n 结， $eV_D < E_g$ ；对于重掺杂的 p-n 结， $eV_D > E_g$ 。理论分析表明，可以利用一

个能级 E_F (称为费米能级) 来描述电子和空穴分布的规律。对于 E_F 以下的能级, 电子占据的可能性大于 $1/2$, 空穴占据的可能性小于 $1/2$; 对于 E_F 以上的能级, 电子占据的可能性小于 $1/2$, 空穴占据的可能性大于 $1/2$ 。在平衡状态下, P 区和 N 区有统一的费米能级。对于 P 区, 因为晶体内有許多空穴, 所以价带顶在费米能级附近。对于 N 区, 因为晶体内有許多电子, 所以导带底在费米能级附近。这样一来就画出了图 4-1-1 (a) 所示的能带图。半导体 p-n 结光源包括半导体发光二极管与半导体激光器, 它们都是正向工作器件。当把正向电压 V 加在 p-n 结上时, 抵销了一部份势垒, 势垒高度只剩下了 $(V_D - V)$ 的数值, 如图 4-1-1 (b) 所示。外加的正向电压破坏了原来的平衡状态, P 区和 N 区的费米能级分离开来。这时, 可以用两个所谓的准费米能级来描述电子和空穴分布的规律。把 N 区的准费米能级记作 $(E_F)_N$, 对于 $(E_F)_N$ 以下的能级, 电子占据的可能性大于 $1/2$ 。把 P 区的准费米能级记作 $(E_F)_P$, 对于 $(E_F)_P$ 以上的能级, 空穴占据的可能性大于 $1/2$ 。当把足够大的正向电压加在 p-n 结上时, P 区内的空穴大量地注入 N 区, N 区内的电子大量地注入 P 区。这样一来, 在 P 区和 N 区靠近界面的地方就产生了复合发光。在激光物理学中, 材料的光子吸收、自发发射和受激发射可以由图 4-1-2 的两能级图来表示。图中 E_1 是基态能量, E_2 是激发态能量。按照普朗克定律, 这两个能态之间的跃迁涉及到发射或吸收一个能量为 $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ 的光子。一般情况下系统处于基态。当能量为 $h\nu_{12}$ 的光子射入, 能态 E_1 中的某个电子能够吸收光子能量, 并激发到能态 E_2 , 如图 4-1-2 所示。由于 E_2 能态是一种不稳定的状态, 电子很快就返回到基态, 从而发射出一个能量为 $h\nu_{12}$ 的光子。这个过程是在无外部激励的情况下发生的, 因此称为自发发射。这种发射是各向同性的, 并且其相位是随机的, 表现为非相干光输出。另外一种情况是, 暂时停留在 E_2 上的电子, 由于外部激励向下跃迁到基态, 如图 4-1-2 (c) 所示。当有一个能量为 $h\nu_{12}$ 的光子入射到系统时, 电子会立即受到激励而往下跃迁到基态, 同时释放一个能量为 $h\nu_{12}$ 的光子。发射出来的这个光子与入射光子是同相位的, 这种情况称为受激发射。在热平衡状态下, 受到激发的电子的密度非常小, 入射于系统的大多数光子都会被吸收, 受激发射可以忽略, 材料对光能量来说是消耗性的。仅当激发态中的电子数大于基态中的电子数时, 受激发射才会超过吸收。这个条件在激光物理学中称为粒子数反转。粒子数反转状态并不是一种平衡状态, 必须利用各种“泵浦”方法来使材料达到这种状态。对于图 4-1-1 所示的 p-n 结, 正向通电注入电子填

满那些较低能态，即能实现粒子数反转，该材料原来对光是吸收的进而变为对光具有放大作用了。半导体激光器中，在电泵浦作用下能够对光有放大作用的区域称为有源区，其实就在图 4-1-1 所示的 $p-n$ 结附近。我们知道，高频电子 LC 振荡器就是利用电子放大器和正反馈结合而产生的。半导体激光器的激光振荡也是由光放大与正反馈结合而产生的。如图 4-1-3 所示，处于粒子反转状态的有源区对某波长光有放大作用。设有微弱的光由左向右传输，在光放大作用下逐渐增强，到达右镜面立刻反射向左传输又再逐渐增强，到达左镜面反射而形成正反馈过程。显然，只有在传播方向与镜面垂直的一部分光才能够在镜面的帮助下实现放大-反馈，当这个放大-反馈环路的光增益足以抵消一切光损耗时，就在谐振腔内建立了等相面与反射镜面平行的驻波，这就是说产生激光振荡了。如图 4-1-1 所示的 $p-n$ 结，当未注入电流时，其材料对光呈现吸收性，当注入电流较小时， $p-n$ 结开始发光，电流继续增加，光放大增强，放大-反馈环路的增益一旦超过损耗，就产生振荡，半导体激光器就由自发发射状态转入激射状态，此时的注入电流称阈值电流。

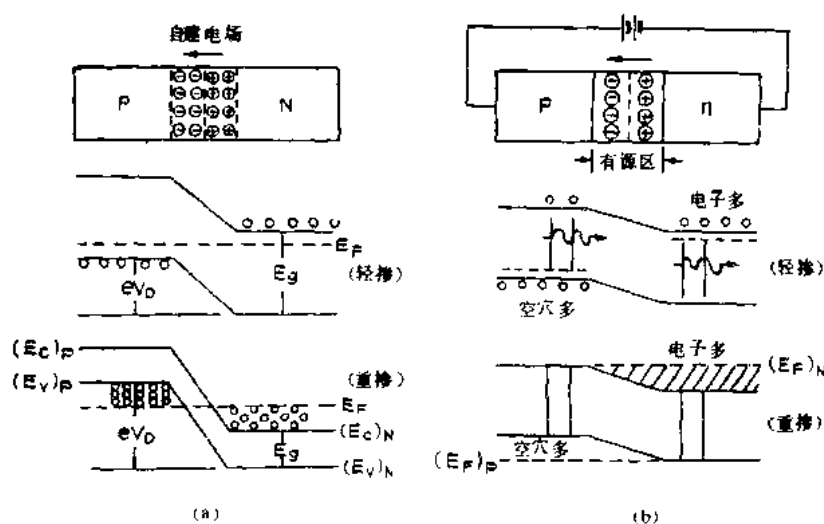


图 4-1-1 $p-n$ 结能带图

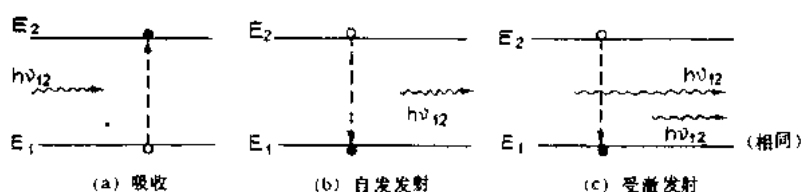


图 4-1-2 光子吸收的三种形式

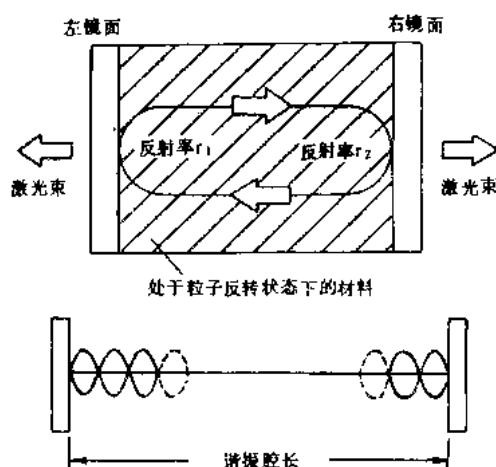


图 4-1-3 平面谐振腔

第三节 半导体发光二极管

半导体光源主要有半导体发光二极管 (LED) 和半导体激光器 (LD) 两种。半导体发光二极管是利用半导体 p-n 结自发发射的器件的统称。商品发光二极管种类很多, 电信仪表与家电产品的半导体指示灯也是半导体发光二极管。光纤通信专用半导体发光二极管的特点是高亮度、高响应速度, 其制造工艺与价格与半导体指示灯有所不同。

发光二极管与半导体激光器相比, 因为它发射的不是激光, 所以输出功率较小, 发射角较大, 与光纤的耦合效率较低。其优点是: 首先是半导体发光二极管的寿命很长, 理论推算可达 10^8 至 10^{10} 小时, 其次是受温度影响较小, 输出光功率与注入电流的线性关系较好, 价格也比较便宜。另外, 驱动电路比较简单, 不存在模式噪声等问题。半导体发光二极管可以作为中短距离、中小容量的光纤通信系统的光源。

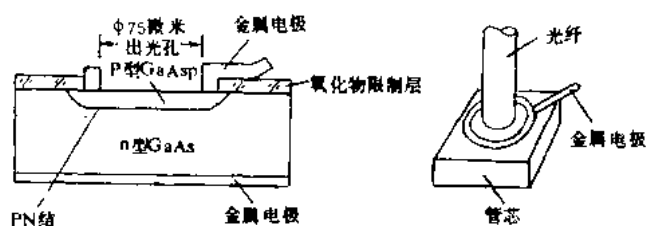


图 4-1-4 GaAs 发光二极管

图 4-1-4 所示是一种适用于短距离光纤通信的半导体发光二极管。由图中看出，P 型 GaAs 与 n 型 GaAs 的界面有一个 p-n 结，当电流由上金属电极流入，由下金属电极流出时，p-n 结产生光发射，由 E_g 决定具有一定波长的光就由 $\Phi 75\mu\text{m}$ 的小孔向外辐射，如果把光纤置于发射小孔上方，光就被耦合到光纤形成传导模。这种由发光面直接输出光功率的半导体发光二极管亦称面发光半导体发光二极管。图 4-1-5 是四种面发光半导体发光二极管示意图。图 4-1-5 (a) 与图 4-1-5 (b) 是一种原始结构，有源区发射的光直接由光纤端面射入。为了提高耦合效率，图 4-1-5 (c) 与图 4-1-5 (d) 的结构包括了聚焦系统，可以提高耦合效率，使光纤获得较大的光功率。

另外一种半导体发光二极管称边发光半导体发光二极管。边发光的发光二极管在结构上与半导体激光器相似。有的半导体激光器，如果注入电流在阈值以下，它就相当于发光二极管。图 4-1-6 所示的是一种窄条结构的边发光二极管，虽然它的结构参数与半导体激光器不同，但是管芯的外型与半导体激光器是很相似的。

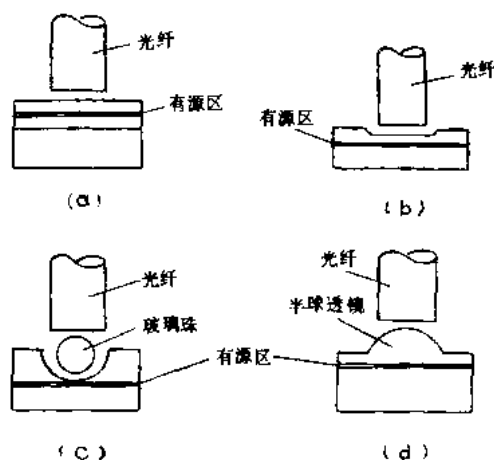


图 4-1-5 面发光二极管

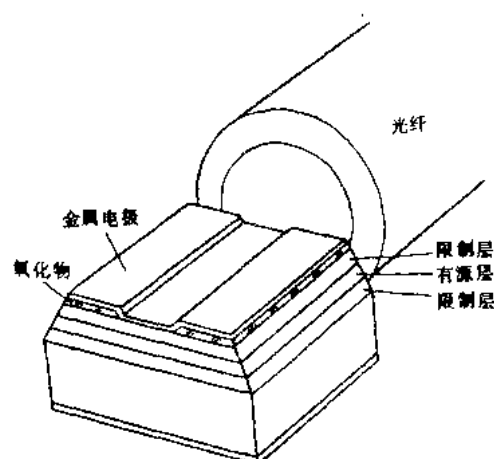


图 4-1-6 窄条结构边发光二极管

下面介绍两种实用发光二极管。

一、短波长发光二极管 (GaAlAs-LED)

它适用于中、短距离光纤计算机信号传输系统、光信息处理和光信号控制等场合。其优点在于使用方便、寿命长和成本较低。表 4-1-1 为两种短波长 LED 的技术参数, 其中出纤功率系指由 LED 耦合到多模光纤中的功率。由于短波长 LED 主要用于短距离、小容量光纤通信系统, 一般只考虑多模尾纤。

表 4-1-1 两种短波长 LED 的技术参数

项 目	类 型 指 标	边发光			面发光
		最小值	典型值	最大值	
发射波长 (μm)		0.8	0.86	0.9	0.86
半高谱宽 (nm)			50		
出纤功率 (μW)		30	50	90	50
上升及下降时间 (ns)			3		
工作电流 (mA)			100		100
可调速率 (MHz)			100		15

二、长波长发光二极管 (InGaAsP-LED)

它适用于长波长中、短距离光纤通信。优点是成本也较低、使用方便、

寿命长。表 4-1-2 和表 4-1-3 分别为 $1.3\mu\text{m}$ 波长面发光 LED (重庆光电技术研究所产品) 和边发光 LED (武汉电信器件公司产品) 的主要技术参数以及 $1.55\mu\text{m}$ 波长边发光 LED (武汉电信器件公司产品) 的技术参数。

表 4-1-2 $1.3\mu\text{m}$ 波长 LED 技术参数

项 目	类 型 指 标	面发光			边发光
			最小值	典型值	最大值
发射波长 (μm)		1.3	1.22	1.30	1.32
出纤功率 (μW)		40		50/6*	80
半高谱宽 (nm)		<85	60		80
工作电流 (mA)				150	
上升及下降时间 (ns)				2.5	
可调速率 (MHz)		70		200	

* : 出纤功率分母指单模光纤

表 4-1-3 $1.55\mu\text{m}$ 波长边发光 LED 技术参数

项 目	指 标	最小值	典型值	最大值
发射波长 (μm)		1.50	1.55	1.60
出纤功率 (μW)			30/10*	
半高谱宽 (nm)		60		80
上升及下降时间 (ns)			2.5	
工作电流		150		
可调速率 (MHz)		200		

* 出纤功率分母为单模光纤

半导体发光二极管价格较低廉, 使用方便, 最近已出现出纤功率达 $20\mu\text{W}$ (单模尾纤) 的产品, 特别受到使用者欢迎。

计算机数据线路和局域网的发展对半导体发光二极管提出了新的要求。我们知道, 局域网的特点通信距离短, 但传输容量大, 如果使用半导体激光器, 一方面是价格贵、使用不便, 另一方面半导体激光器的入纤功率也超过了短距离的需要。因此研究开发能工作于数百 Mb/s 至数 Gb/s 速率的半导体发光二极管和相应的驱动电路, 对短距离电话用户环路和局域网数据光纤系统带来极大的方便性和经济性, 特别是对即将到来的宽带综合业务数字网 (ISDN) 则具有更大的吸引力。因为 ISDN 需要大量的低成本高可靠和高速调制的光源, 半导体发光二极管是理想的候选者。

高速半导体发光二极管的设计和制造准则首先是高的注入电流和小的有源区面积。理论分析和实验证明，半导体发光二极管光脉冲上升时间 (t_r) 和下降时间 (t_f) 与注入电流有关。注入电流越大，半导体发光二极管光输出脉冲前沿越陡。在有源区里重掺杂对减小上升前沿也有好处。降低半导体发光二极管芯片和管壳的寄生参量也是重要的。经过仔细设计的高速半导体发光二极管，其输出光脉冲前后沿只有 350ps，可以用于 2Gbit/s 的数字光纤通信系统中。下面表格中列出了边发光两种高速半导体发光二极管的主要数据。其有源面厚度为 $0.15\mu\text{m}$ ，窄条宽度为 $8\mu\text{m}$ ，重掺 Zn 浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ，峰值波长为 $1300\mu\text{m}$ 。

表 4-1-4 边发光高速半导体发光二极管的主要数据

工作速率 Mb/s	600	2000
LDE 输出功率 dBm	-12.5	-10.7
入纤功率 dBm	-24	-22.2

由此可见半导体发光二极管作为超高速数字光纤通信系统的光源有光明的前途。

第四节 半导体激光器

一、半导体激光器的同质结、异质结结构与窄条结构

在研究和开发半导体激光器的过程中，人们对于只具有一个简单 p-n 结（称为同质结）的半导体激光器的性能总是不满意。具体来说，就是阈值电流密度太大，激光器工作时发热非常严重，因而同质结激光器必须在低温环境下脉冲工作，不可能在室温环境下连续工作。单异质结半导体激光器和双异质结半导体激光器的出现是重大的改进。所谓异质结，就是两种不同材料构成的 p-n 结。利用异质结才可以制成性能良好的半导体激光器。

为什么同质结半导体激光器的阈值电流密度很大呢？可以用图 4-1-7 来说明。图 4-1-7 (a) 是同质结，在同质结激光器的情况下，当加上正向偏压时，N 区内的电子注入 P 区，因为电子的扩散长度较长（几微米），所以复合发光区较厚。要在这样厚的区域内都能达到阈值，就需要非常大的电流密度。图 4-1-7 (b) 所示的是单异质结激光器的情况，在 GaAs 的 p-n 结的 p 区一侧比电子扩散长度短得多的地方 ($1 \sim 2\mu\text{m}$) 加上一个由 P-

GaAs 和 P-AlGaAs 构成的异质结。这个异质结提供了一个势垒，电子由左向右扩散时，受到了这个势垒的阻挡，因而有源区内的厚度就是 P-GaAs 层的厚度，这就有利于在较低的电流密度下获得受激发射。另外，GaAs 的折射率 n_1 大于 AlGaAs 的折射率 n_2 ，光在传播过程中，其能量主要被限制在折射率较大的 GaAs 一侧，也有利于降低激光器的阈值。双异质结是单异质结进一步发展的结果，由于在 p-n 界面的两边都有异质结，它对载流子和光的限制作用更强，即使注入电流较小，也容易达到粒子数反转，使半导体激光器的阈值进一步降低。理论分析和实验结果表明，GaAs 同质结激光器的阈值电流密度约为 10^5 A/cm^2 ，GaAs-AlGaAs 单异质结激光器的阈值电流密度约为 10^4 A/cm^2 ，而 GaAs-AlGaAs 双异质结激光器的阈值电流密度约为 10^3 A/cm^2 。

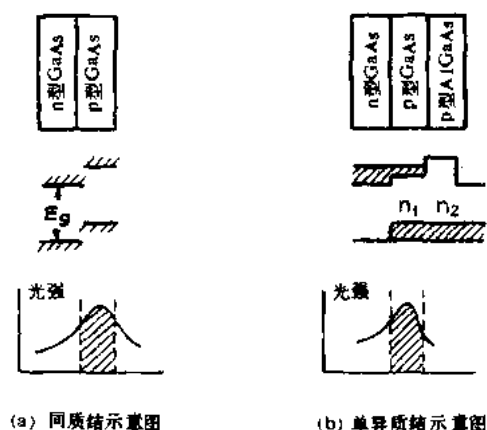


图 4-1-7 同质结、异质结的光强分布

对于双异质结激光器，为了使阈值电流进一步降低，采用窄条结构是很重要的。如图 4-1-8 所示，在管芯的 P 面加上了氧化物绝缘层，使注入电流被限制在窄条区域内。窄条结构的双异质结激光器，可以在室温环境下连续工作，阈值电流仅几十毫安，已达到实用化要求。

半导体激光器管芯有各种各样的窄条条形结构。图 4-1-9 是条形结构截面示意图，说明条形结构可以由不同的形式来实现。图 4-1-9 (a) 是最一般的条形结构，首先在外延片子上淀积二氧化硅 (SiO_2) 膜并腐蚀出条形窗口，然后蒸发金属电极。用这种方法制作条形结构比较容易，而且在制作过程中不损伤片子。但是当条形宽度变窄时，电流的侧向分散较大，电流不易集中到管芯中间的有效区域。图 4-1-9 (b) 所示的结构在特性上与

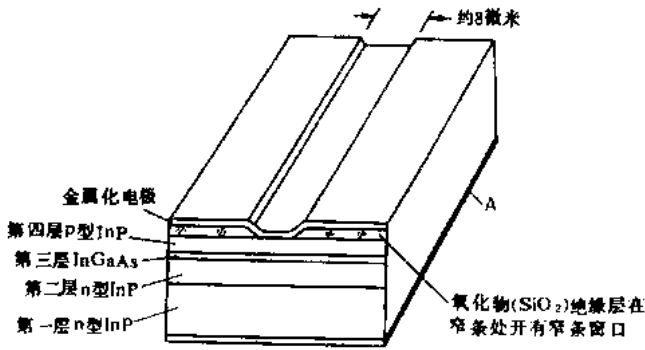


图 4-1-8 窄条双异质结激光二极管

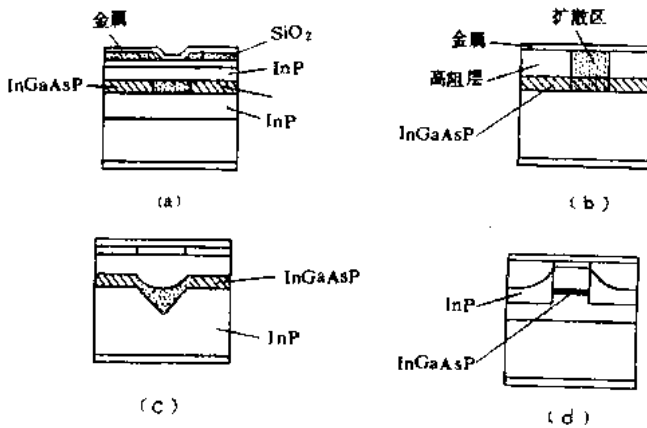


图 4-1-9 条形结构半导体二极管截面示意图

图 4-1-9 (a) 接近，即在片子的最上面生长高阻层或反向 p-n 结，并用扩散法得到条形结构。图 4-1-9 (c) 是在 InP 衬底上先作出条形沟槽，然后上面进行晶体生长，这样做出的 In-GaAsP 窄条隐埋在 InP 材料中，亦称隐埋型窄条结构。另外一种隐埋型窄条结构如图 4-1-9 (d) 所示。隐埋结构的优点是：发光材料被 InP 从四面包围着，发光材料折射率较 InP 为高，光更进一步集中在较小的截面积之内，有利于降低半导体激光器的激射阈值和提高电光转换效率。

二、半导体激光器管芯制作工艺

半导体激光器的制作，就其全过程而言，是从选择半导体单晶材料开始的。除了采用半导体工艺之外，还要采用光电子学工艺。现以 InGaAsP 长波长双异质结激光器的制作为例，作一简单介绍，Al-GaAs 短波长半导体激光器以及半导体发光二极管的制作工艺与此类似。

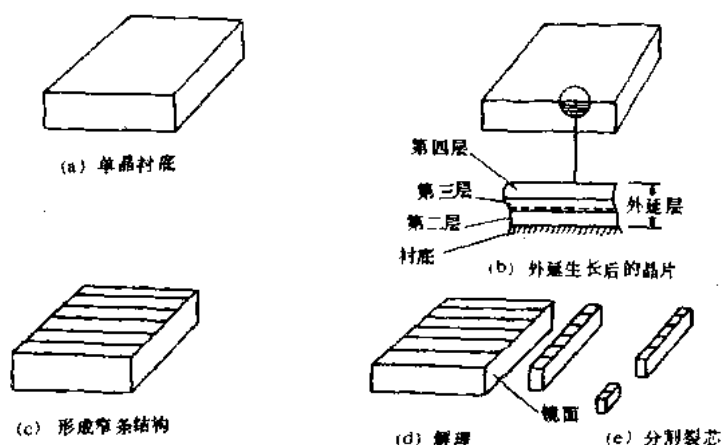


图 4-1-10 双异质结激光二极管管芯结构图

InGaAsP 长波长双异质结激光器管芯的结构如图 4-1-10 所示。选择低位错的 n 型 InP 单晶材料，经定向、切割、减薄和抛光之后，成为图 4-1-10 (a) 所示的衬底片。把衬底片的一面抛光成镜面并经严格清洗，随后以这个面为基础，用外延生长法生长出图 4-1-10 (b) 所示的第二、第三和第四层单晶材料。目前，液相外延仍是制作半导体激光器的关键技术，在不久的将来，可能采用汽相外延、分子束外延等新技术。外延生长后就得到了图 4-1-10 (b) 所示的外延片。各层的组份和厚度是严格控制的，有源区厚度只有十分之几微米，如果太厚就不可能把阈值电流降下来。对于条形结构半导体激光器，一般是用掩膜、光刻、腐蚀等半导体工艺在外延片上形成许多窄条，窄条的方向垂直于容易劈裂的晶面，宽度一般为几微米至十几微米，已经形成窄条结构的外延片，如图 4-1-10 (c) 所示。在把该外延片减薄至 $100\mu\text{m}$ 之后，把上下两个面金属化以形成电极。然后，用锋利的刀具在外延片的垂直于窄条的一个边上刻痕，稍加一点力量就可以把外延片劈裂为 $200\mu\text{m}$ 宽的片条，劈裂面就是接近于理想的镜面。劈裂的操作叫做“解理”，所得到的镜面叫做“解理面”。在每一个片条上有许多窄条结构，再用切割或解理的办法把它们分开，就可以得到许多管芯了。每一个管芯可以制成一个半导体激光器。必须指出，由于外延、解理等工艺条件比较难于掌握，工艺的成败除了依赖于设备的精度之外还与工艺人员的操作技术有关，迄今为止，管芯的成品率还是很低的。把管芯的 p 面键合在热沉上，再在 n 面焊上金丝引线，就成为图 4-1-24 所示的激光器基本单元了。

半导体激光器是正向工作的器件，p 面为正极，n 面为负极。注入电流