

《光纤通信》第3、4章

---

# 《数据通信技术》

## —第9章光源、光发射机与光检测器、光接收机

---

主讲：郑秋匀

系部：数据科学与工程系

办公室：逸夫楼413

E-mail:109345@qq.com

# 本章教学内容

1

激光二级管

2

发光二极管

3

光检测器的工作原理

4

光发射机和光接收机

5

课后巩固提升

- 光纤通信系统的基本单元是由光发射机、光纤和光接收机三部分构成的。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。
- 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。LED基于光的**自发辐射**机理。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。
- 光检测器工作基于半导体材料对光的**吸收**原理，它是将光信号转换成电流信号的器件，分成PIN光电二极管和APD雪崩光电二极管两类。
- 本章重点**掌握**光与物质的三种作用形式；**了解**半导体发光二极管(LED)和半导体激光二极管(LD)这两种光源的工作原理；**了解**光检测器PIN光电二极管和APD雪崩二极管的原理，**了解**光发射机和光接收机的组成等。
- 共**2**课时。

# 概述

- 光通信用**光器件**可分为有源器件和无源器件两种类型。
- **有源器件**：包括光源、光检测器和光放大器，分别是光发射机、光接收机和光中继器的关键器件，和光纤一起决定光纤系统的水平。
- **光无源器件**主要有连接器、耦合器、波分复用器、调制器、光开关和隔离器等对光纤通信系统的构成、功能的扩展和性能的提高都是不可缺少的。
- **光源**实现从电信号到光信号的转换，是光发射机及光纤通信系统的核心器件。
- **光接收机**是光纤通信系统的重要组成部分，它的作用是把光发射机发送并经光纤传输的携带有信息的光信号转化成相应的电信号，然后放大并再生恢复为原始电信号。

# 光子

## □ 光具有波粒二象性

(1) 光波，本质上是电磁波  $c = \lambda f$ ;

(2) 粒子性，我们称为光子，光子是具有能量的，每个光子的能量

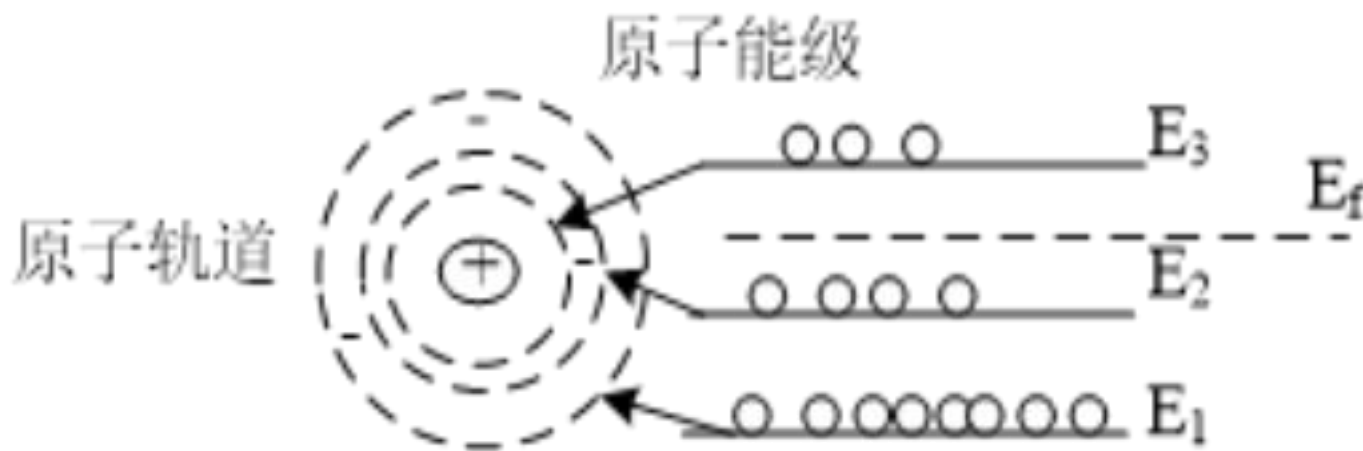
$$E = h\nu = \hbar\omega \quad h = 6.6260693 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (\text{焦耳} \cdot \text{秒}), \quad \omega \text{ 光波频率Hz}$$

➤ 从光子的角度来考量光源是如何发出光子出来，光子的能量和频率相关：

1. 不同频率的光子具有不同能量，而携带信息的光波具有的能量只能是  $h\nu$  的整数倍；
2. 当光与物质相互作用时，光子能量作为一个整体被吸收或发射；
3. 光粒子是不可再分解。

# 能级及费米能级

- 物质是由**原子**组成的，原子是由**原子核**和核外**电子**构成的。
- 电子在原子中围绕原子核按一定轨迹运动，这些分立的能量值，称为原子的不同**能级**。
- **能级**理论（英语：Energy level）是一种解释原子核外**电子**运动轨道的一种理论。它认为电子只能在特定的、分立的轨道上运动，各个轨道上的电子具有分立的能量，这些能量值即为**能级**。

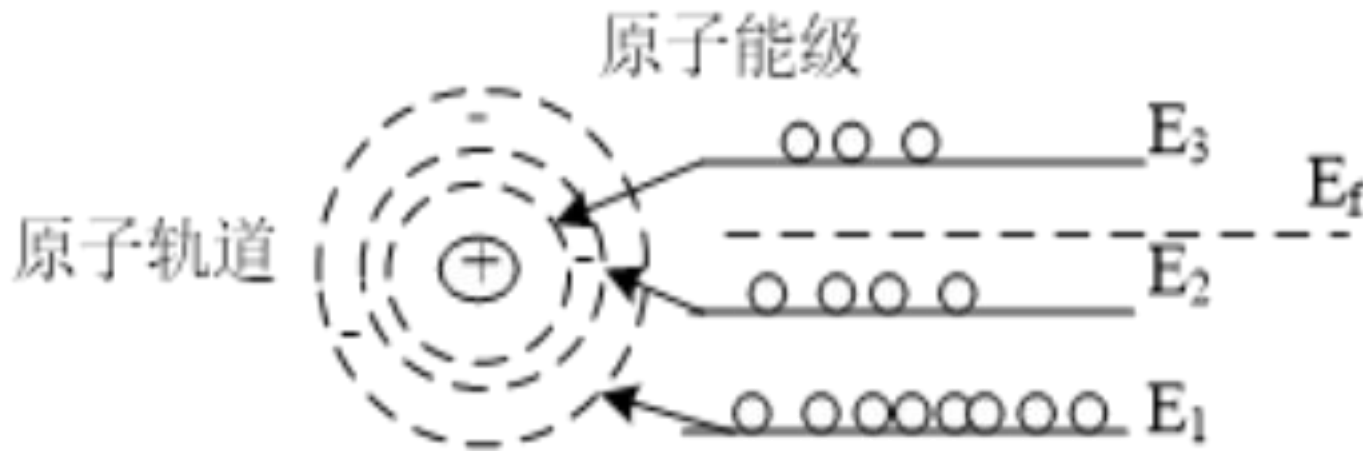


# 能级及费米能级

- 原子中的电子在一定大小、彼此分隔的一系列轨道上运动
- 原子中能够实现的电子轨道是量子化的
- 由于能级的简并，同一能级存在多个量子态
- 同一量子态不能有两个电子
- 处于高能级的电子有向低能级跃迁的趋势，处于低能级的电子有吸收能量向高能级跃迁的可能

# 能级及费米能级

- **分布规律**：高能级上的粒子少而低能级上的粒子多，少和多的区分参量就是费米 $E_f$ 参量，不是一个真实存在的能级， $E_f$ 只是反映电子在各能级中**分布**情况的一个参量。
- 电子可以在不同的轨道间发生**跃迁**，电子吸收能量可以从低能级跃迁到高能级（受激吸收，光检测，光能到电能转换）或者从高能级跃迁到低能级（受激辐射，光发射，电能到光能）从而辐射出**光子**。



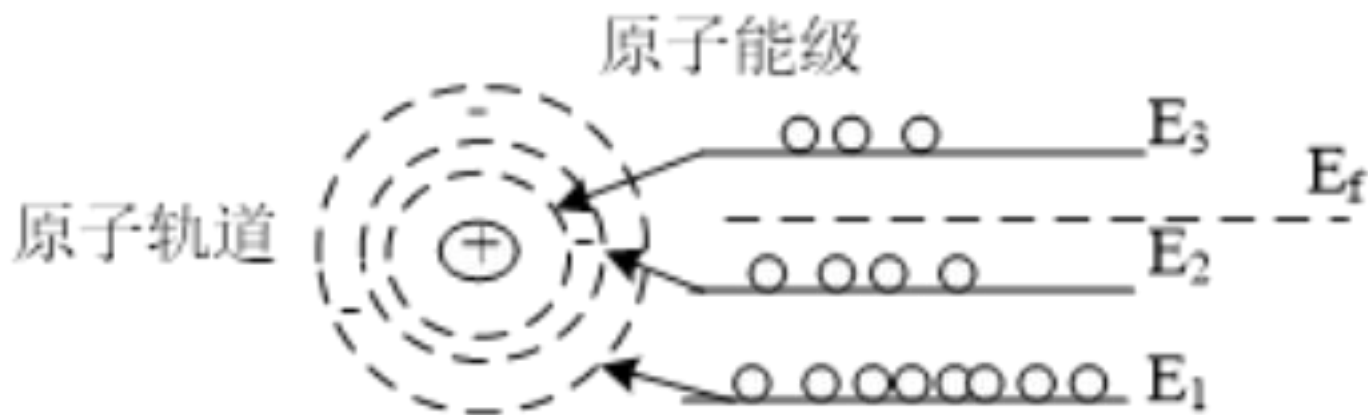
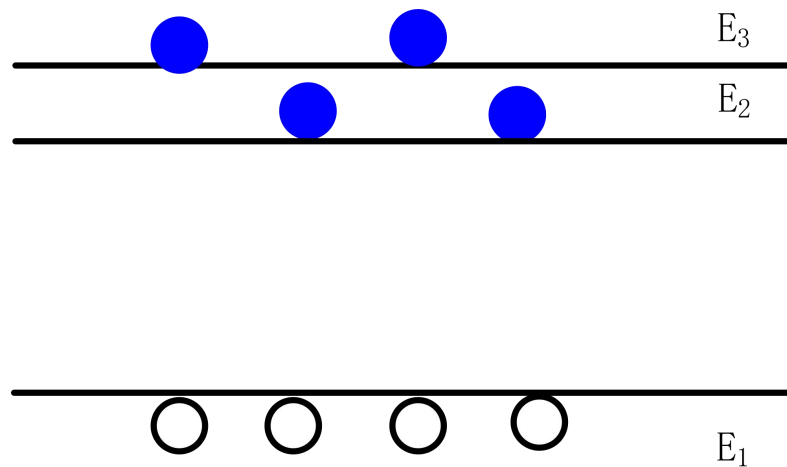


# 能级及费米能级

各能级上的原子数服从玻尔兹曼统计分布：

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

$N_2 > N_1$  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



**费米统计规律：**在热平衡条件下，能量为E的能级被一个电子占据的概率

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) + 1}$$

□  $f(E)$ —电子的费米发布函数，为能级E被电子占据的概率；

$k$ —玻尔兹曼常数， $k=1.3806505 \times 10^{-23} \text{J/K}$

$T$ —热力学温度；

$E_f$ —费米能级，反映电子在各能级中分布情况的一个参量。

□  $E=E_f$ ， $f(E)=0.5$ 。E能级有一半的概率是空着的

□  $E<E_f$ ， $f(E)>0.5$ 。E能级被占据的概率大

□  $E>E_f$ ， $f(E)<0.5$ 。E能级被占据的概率小

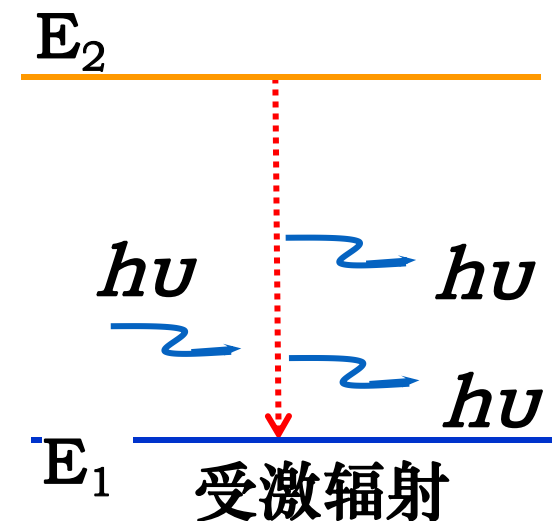
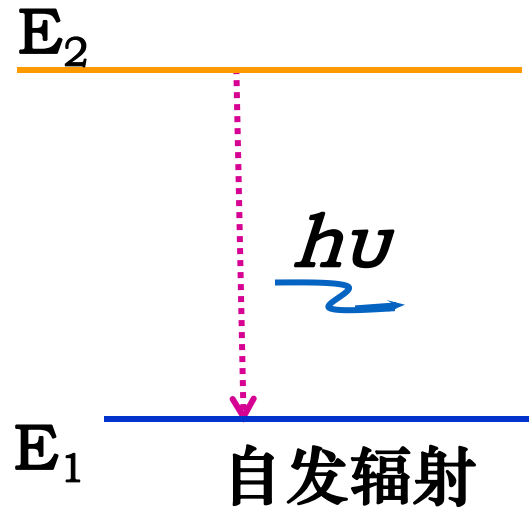
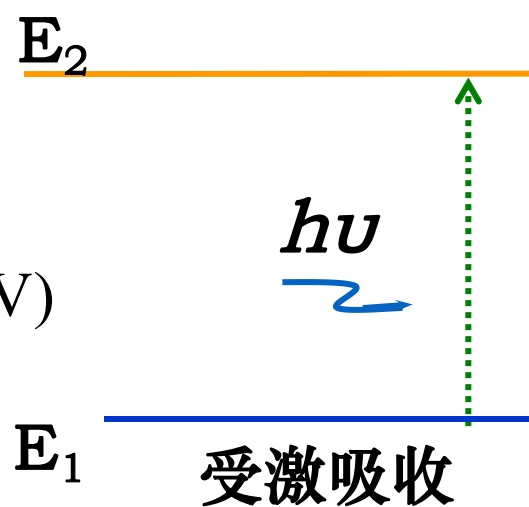
□ 费米统计规律是物质粒子能级分布的基本规律，它反映物质中电子按一定规律占据能级。

# 光与物质的三种作用形式

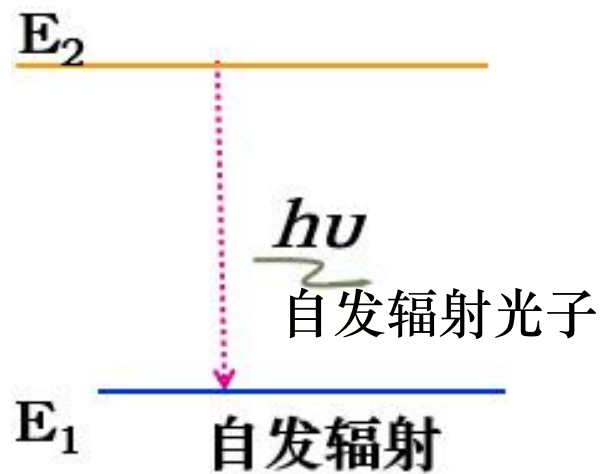
- 介质材料中，存在着三种电子的跃迁过程，对应着三种光与物质的相互作用过程
  - 受激吸收（光检测器）
  - 自发辐射（发光二极管LED（Light Emission Diode））
  - 受激辐射（激光二极管LD（Laser Diode））

$$\lambda = hc / (E_2 - E_1)$$

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



# (1) 自发辐射 (发光二极管LED (Light Emission Diode) )



- 光可以被物质吸收，也可以从物质发射。
- 由于处于高能级的电子是不稳定的，未受到外界激发，自发的跃迁到低能级，根据能量守恒原理，此时发射一个光子，其能量  $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$  (或  $hf_{21}$ )。  $E_2$  是高能级， $E_1$  是低能级，减少的能量以光子的形式发射出来  $hf_{21}$  ( $f_{21}$  是光子对应从  $E_2$  跃迁到  $E_1$  的频率)

## 自发辐射的特点：

- ① 无外界作用，自发产生；
- ② 发生自发辐射的高能级不只一个，而可以是一系列高能级，因此，辐射光子的频率亦不同，频率范围很宽；
- ③ 即使辐射出的光子频率相同，由于是自发、独立的辐射，它们发射的反向和相位也不同，是非相干光。而非相干光是非常弱的。

## 【例】

□ 已知激光二极管发射红光，波长  $\lambda = 650\text{nm}$ ，单个光子的能量等于多少呢？，假设光源的功率是  $1\text{mW}$ ，光源每秒中发射的光子数是多少呢？

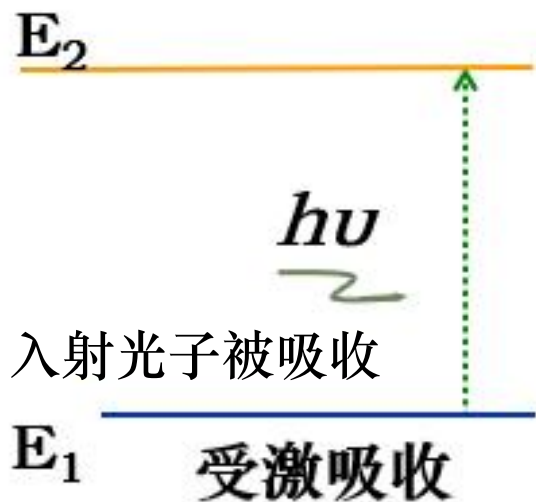
□ 解：根据公式，  $E_p = hf = hc / \lambda = 3.04 \times 10^{-19} \text{ J}$

□ 光子功率，  $P=1\text{mW}$        $E = P \times 1s$

□ 1秒钟内光子的总能量       $E = E_p \times N$

□ 计算得光源每秒中发射的光子数目，  $N = E / E_p = 3.3 \times 10^{15}$

## (2) 受激吸收 (光检测器)



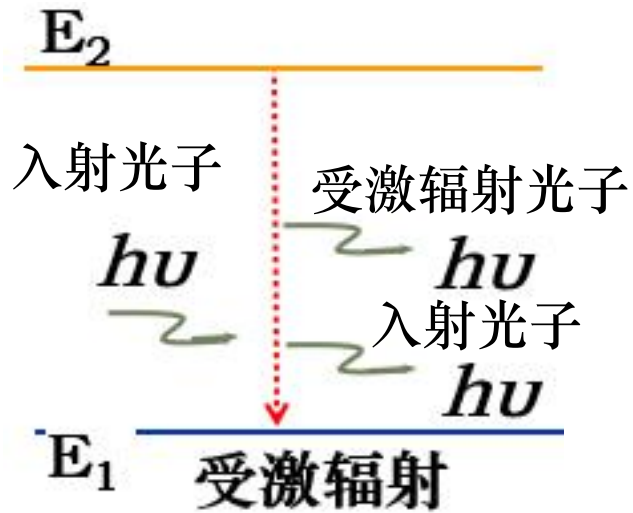
□ 物质在外来光子的激发下，**低**能级上的电子吸收了外来光子的能量而跃迁到**高**能级上，这个过程叫做受激吸收。

□ 受激吸收的**特点**：

- ① 在外来光子激发下产生，为受激跃迁；
- ② 外来光子能量应为电子跃迁的能级之差，即外来光子能量为  $E = E_2 - E_1 = h\nu_{21}$ （或  $hf_{21}$ ）；
- ③ 不发光，而是消耗外来光能。

□ 受激吸收是**光检测器**的一个重要的基本概念。

### (3) 受激辐射 (激光二极管LD (Laser Diode) )



□ 处于高能级 $E_2$ 的电子，当受到外来光子的激发而跃迁到低能级 $E_1$ 时，放出一个能量为 $h\nu_{21}$ （或 $hf_{21}$ ）的光子。由于这个过程是在外来光子的激发下产生的，因此叫受激辐射。

□ 受激辐射的特点：

- ① 受激产生，且外来光子的能量等于跃迁的能级之差；
- ② 受激辐射的光子与外来光子不仅频率相同，而且相关、偏振方向、传播方向都相同，称为全同光子；
- ③ 全同光子的叠加使光增加，使入射光得到放大。
- 受激辐射是产生激光的一个重要的基本概念。

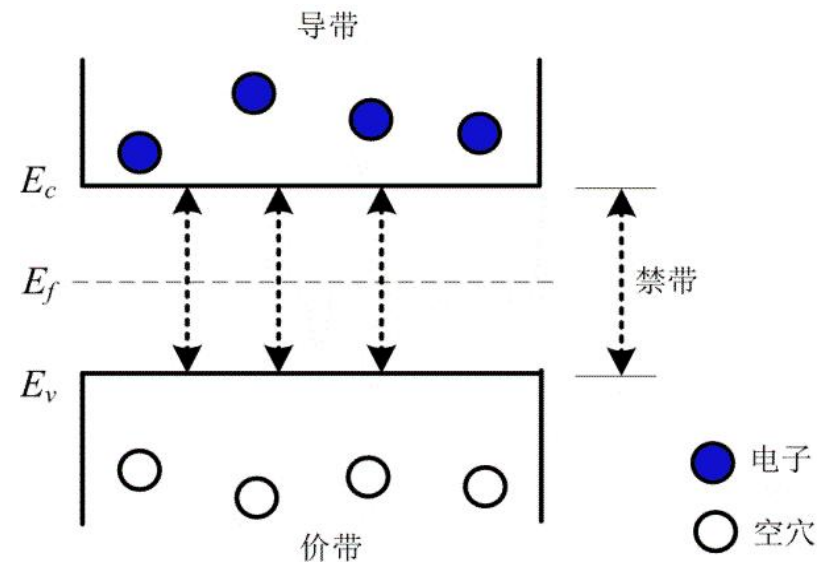
# 半导体的工作原理

- **能级**：电子只能在特定的、分立的轨道上运动，各个轨道上的**电子**具有分立的能量，这些能量值即为能级；
- **能带**：能带理论（英语：Energy band theory）是用量子力学的方法研究**固体**内部电子运动的理论；
- 固体材料的能带结构由**多条**能带组成，类似于原子中的电子能级。电子先占据低能量的能带，逐步占据高能级的能带。根据电子填充的情况，能带分为**传导带**（简称导带，少量电子填充）和**价电带**（简称价带，大量电子填充）。导带和价带间的空隙称为**禁带**（电子无法填充），大小为能隙。
- **半导体**（semiconductor），指常温下导电性能介于导体（conductor）与绝缘体（insulator）之间的材料。



# 半导体能带

- 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。
- 导带**是半导体能量最高的一个能带；
- 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**。
- 电子占据能带（导带）中某个能级 $E$ 的几率为费米分布
$$f(E) = \left( 1 + \exp \left( \frac{E - E_f}{k_B T} \right) \right)^{-1}$$
- 在热平衡状态下，费米能级被**电子**和**空穴**占据的概率相同。



# 半导体的能带

- 根据固体的能带理论，半导体材料中电子的能级形成能带。高能量的为导带，低能量的为价带，两带被禁带分开。
- 由于半导体本身是固体，（任何物质是由原子组成的，原子是由中间带正电的原子核和外面围绕它旋转的带负电的电子组成）原子排列紧密，使得电子轨道相互重叠，从而使半导体的分立能级形成了能带。（能级是电子对应的电子轨道，而半导体的电子轨道是相互重叠的，因此形成能带）
- 半导体的能带：完全被电子占据的能带称“满带”，完全未被占据的称“空带”，部分被占据的称“导带”。导带中的电子能够导电；在绝缘体是满带所以它们不能导电。半导体的导带能级几乎是空的，电子具有导电作用。（电子可以活动的自由空间大，移动起来就可以形成电流，所以电子具有导电作用）。

# 半导体的类型

- ❑ **本征半导体**：就是指没有任何外来杂质的理想半导体。又称I型半导体。I型半导体是完全纯净或结构完整的半导体，是完全由基质原子组成的晶体。
- ❑ **P型半导体**：在纯净的硅晶体中掺入（如第III族硼，镓，价电子带三个电子）提供空穴的杂质元素而形成的半导体材料称为P型半导体，属于**空穴导电**型，P型中，可移动的空穴多。
- ❑ **N型半导体**：在纯净的硅晶体中掺入电子的杂质元素（如第VI族砷，锑，价电子带五个电子）而形成的半导体材料称为N型半导体，属于**电子导电**型，N型中，可移动的电子多。
- ❑ 不受外界影响的情况下，导带没有电子，价带也没有空穴，因此不能导电。在热运动或外界的影响下，价电子跃迁到导带，产生自由电子和空穴，构成导电载流子。

## 3.1 激光二极管

- ❑ **光发射机**由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成，而光源是光发射机的核心部件。
- ❑ 目前光纤通信系统中常用的**光源**有发光二极管LED和激光器LD两种，这两种器件都是用半导体材料制成。

- ❑ **激光二极管LD (Laser Diode)**

激光，其英文LASER就是Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation(**受激**辐射的光**放大**)的缩写。

- ❑ **发光二极管LED (Light Emission Diode)**

## 3.1 激光二极管

- 激光二极管LD (Laser Diode)
- 激光器的发展
  - 1960年，梅曼制成第一个实用的红宝石激光器
  - 1962年后期，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。
  - 1970年，贝尔实验室和Leningrad Ioffe研究所分别实现了双异质结构的在室温下连续工作的半导体激光器。
- 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。

## 3.1 激光二极管

### □ 发光与光的放大

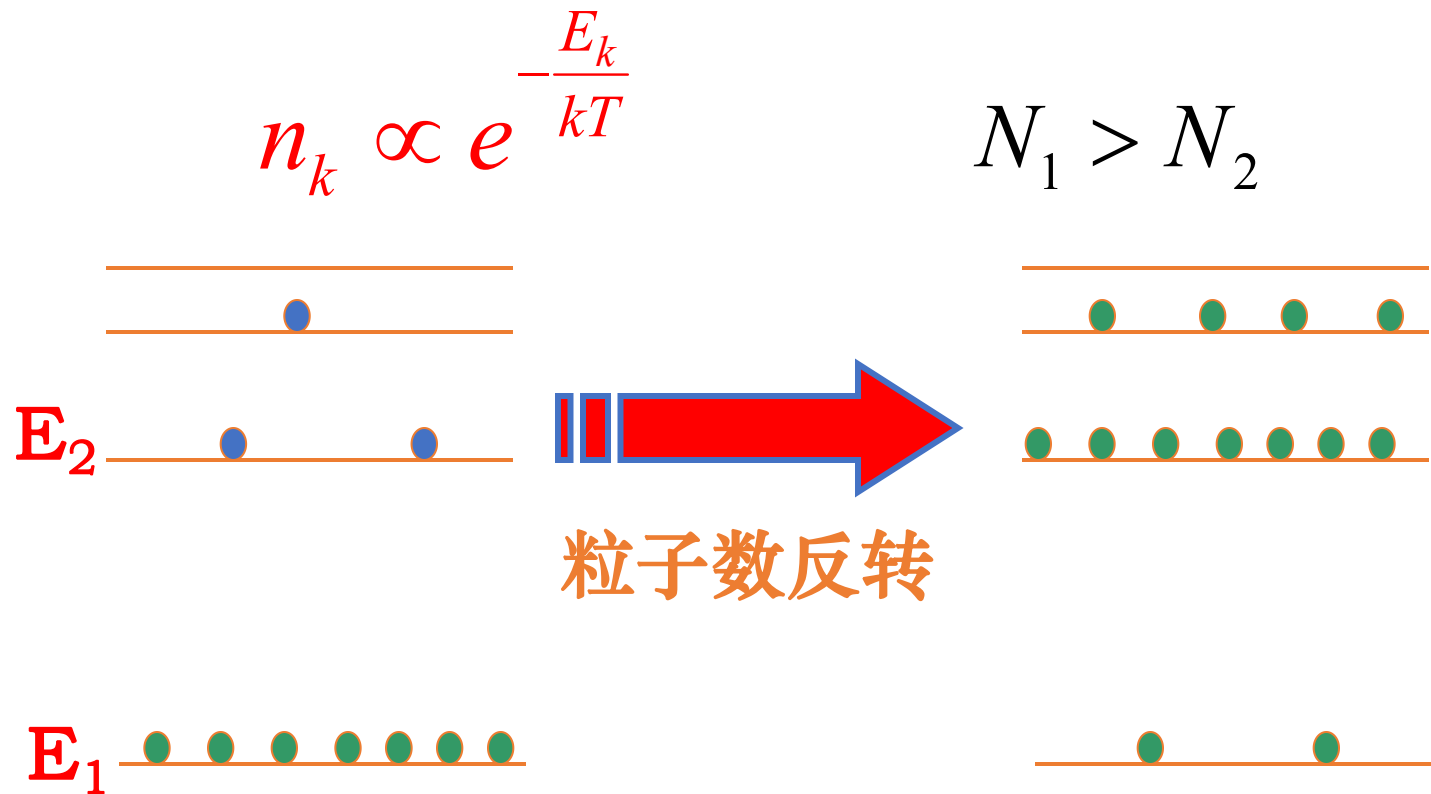
- 在**热平衡**状态下，低能级粒子占绝对多数，光子的受激**吸收**是占绝对优势；
- **非热平衡**状态下，可能出现高能级粒子数占多数的情况，称之为粒子数反转；
- 粒子数**反转**的情况下，自发辐射和受激辐射占一定优势，物质表现出发光特性；

### □ 受激发射的特点：

- 产生的新光子与原光子**严格**同频、同相、同极化
- 外部合适频率的光信号进入粒子数反转区，在受激辐射的作用下，该光信号被放大、光子数**倍增**，原有光波特点保留。

### 3.1 激光二极管

激光产生的**必要条件**：粒子数反转。激发态的粒子数多于基态的粒子数



产生激光的**必要条件**：实现粒子数反转。

## 3.1 激光二极管

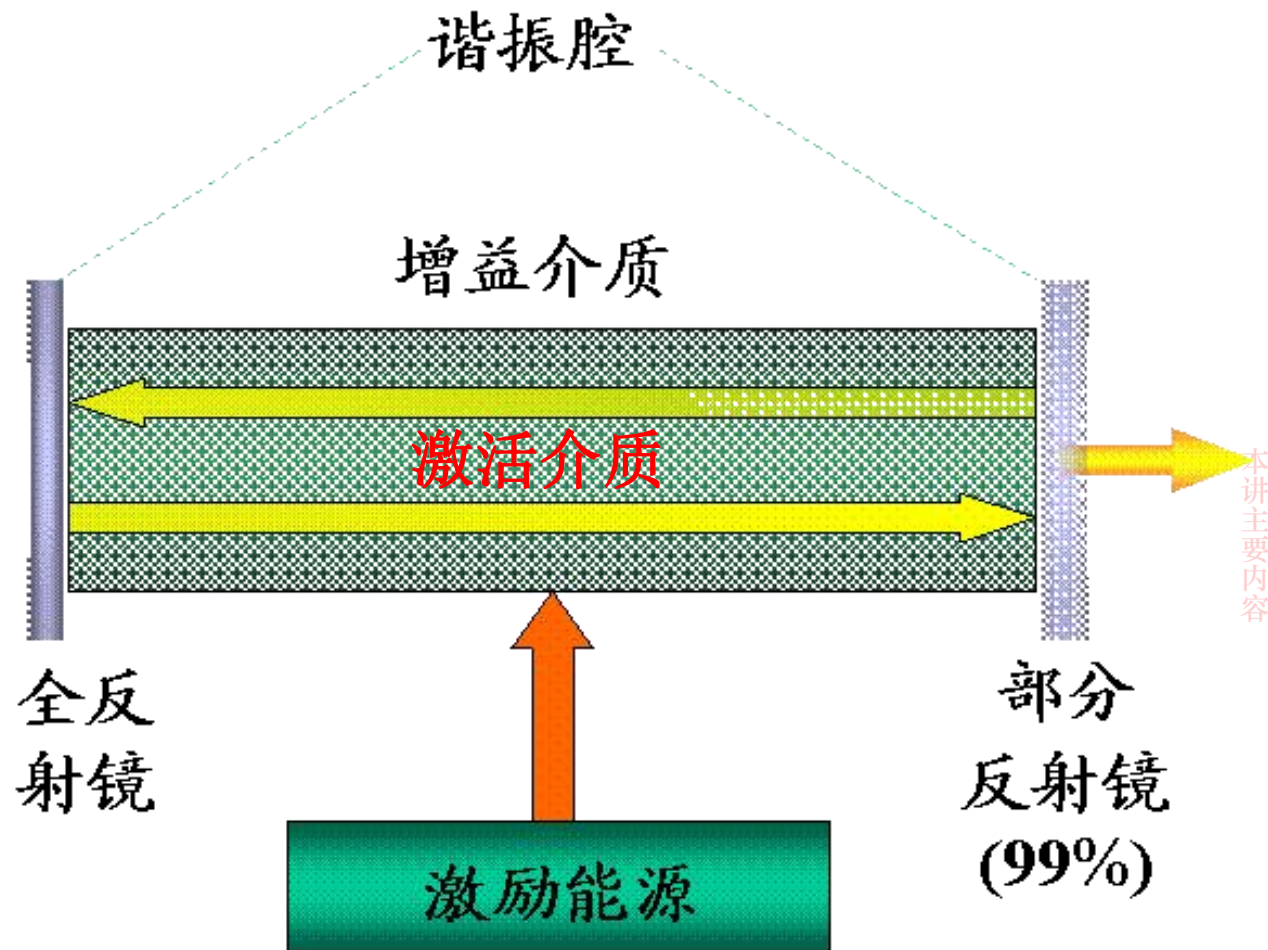
- 形成粒子数反转的条件：  
要有激活介质或增益介质。  
要有激励(泵浦)

- 光学谐振腔,谐振腔长度

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

- 谐振腔的作用:

- 1) 维持光**振荡**, 起到光**放大**作用;
- 2) 使激光产生极好的方向性;
- 3) 使激光的**单色**性好。





## 3.1 激光二极管

### □ 3.1.1 工作原理

#### □ 1. 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，电子已经不属于某个原子所有，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**。

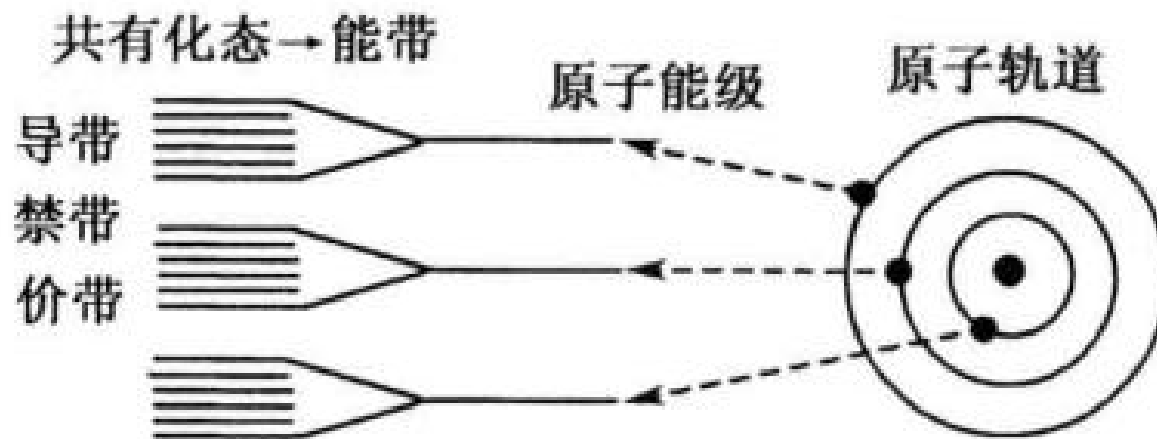


图3.1.1 晶体中的能级

## 3.1 激光二极管

### □2. LD结构

- 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。
- **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，我们把这类由异种半导体相接的结构称为**双异**质结。

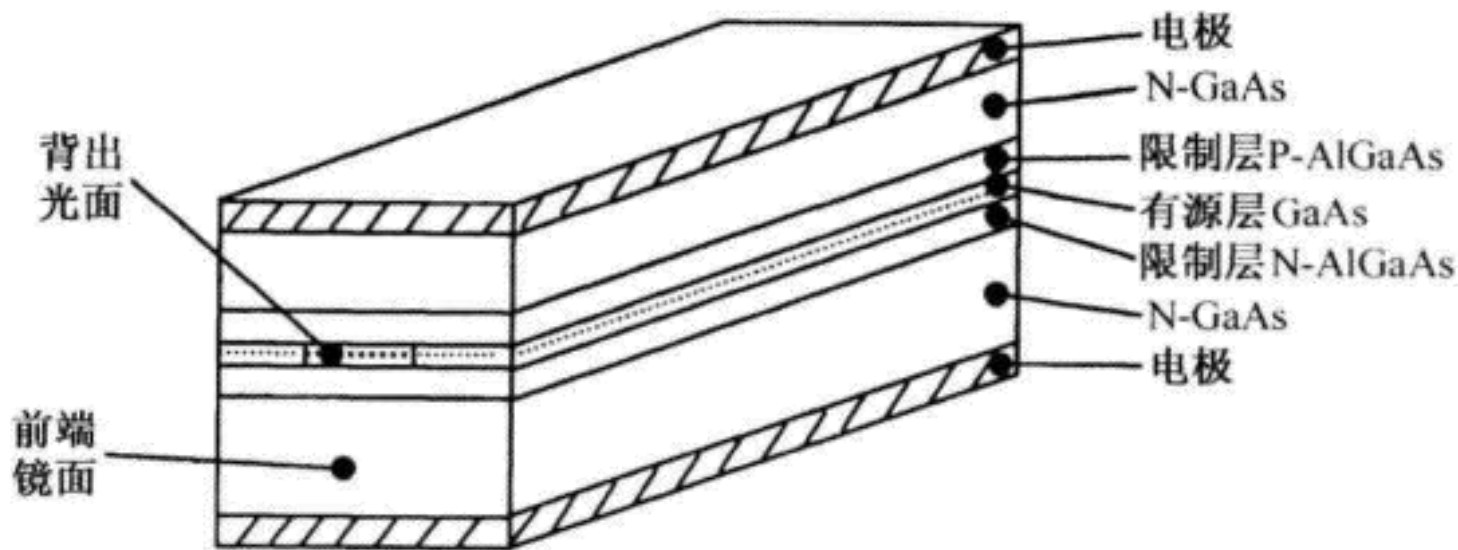


图3.1.3 激光二极管结构

## 3.1 激光二极管

### □ (1) 有源层和限制层

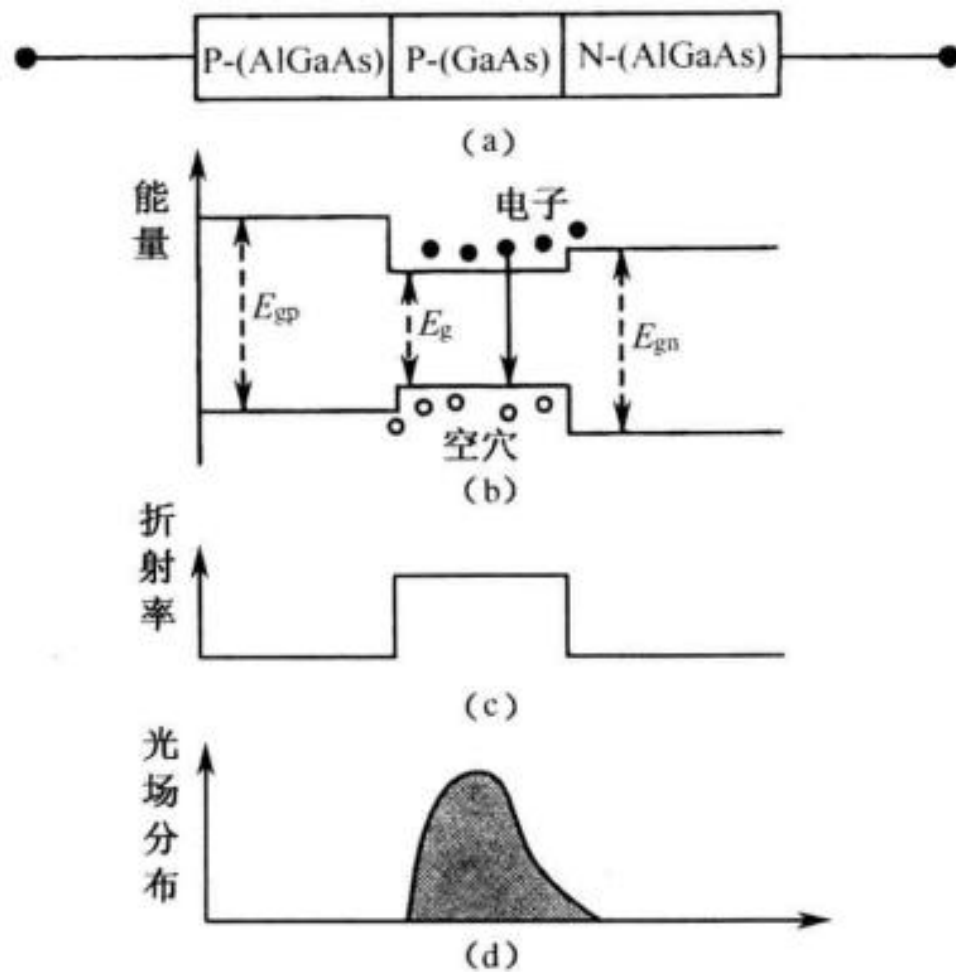
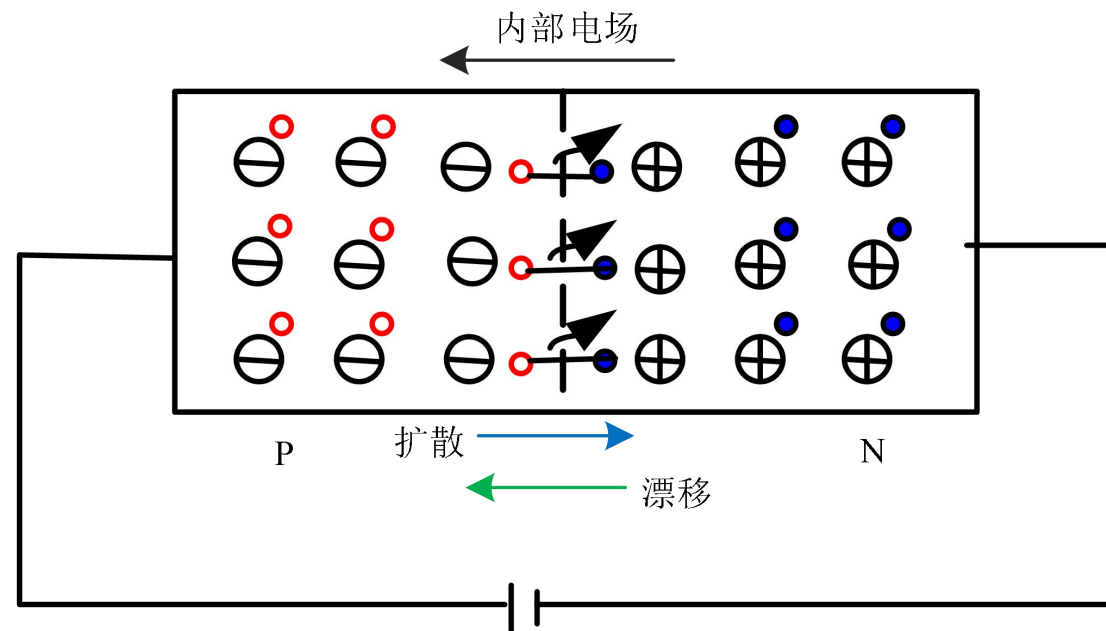


图3.1.4 双异质结的结构

- (a) P型和N型砷化镓铝AlGaAs材料结构
- (b) 能带
- (e) 折射率
- (d) 光场分布



## 3.1 激光二极管

### □ (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光部分逸出，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。
- 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。

## 3.1 激光二极管

### □3. 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。
- 激光器工作过程中，光在谐振腔内传播，除增益介质的光放大作用外，还存在工作物质的吸收、介质不均匀引起的散射、反射镜的非理想性引起的透射及散射等损耗情况，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。

## 3.1 激光二极管

- 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：
$$\frac{ds}{dt} = Dns + R_{sp} - \frac{s}{\tau_{ph}} \quad (3.1.5)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau_{sp}} - Dns \quad (3.1.6)$$

$$s = \frac{\tau_{ph}}{qd} (J - J_{th}) \quad (3.1.8)$$

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

- (3.1.5) 式物理意义：**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；
- (3.1.6) 式物理意义：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。
- (3.1.8) 式**稳定状态**下，粒子数不再变化，辐射的光子数目与实际电流密度与阈值电流密度之差成正比。

## 3.1 激光二极管

### □4. LD模式

- 在两平面反射镜之间形成了一稳定的振荡，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，只有平面镜间距离是半波长的整数倍时，光波才能得到彼此加强。

$$L = m \frac{\lambda}{2n}$$

(3.1.9)

式中，L为半导体激光器腔长，λ为光波的波长，f为光波的频率，c为光速，n为增益介质的折射率，

$$f = m \frac{c}{2nL}$$

(3.1.10)

m=1,2……一系列取值对应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。

- 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。
- 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。

### 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，还配置其他元件和实现LD工作必要的少量电路块的集成器件，其他元件和电路应**包括**：**光隔离器**，监视光电二极管PD，尾纤和连接器，LD的驱动电路，热敏电阻，热电致冷器，自动温控电路ATC自动功率控制电路APC等。
  - **光隔离器**的作用：防止LD输出的激光回射，避免引起激光器RIN的增加，它位于LD输出边；
  - 热电致冷器是一种半导体监视光电二极管PD的作用是监视LD的输出功率变化，它位于LD背出光面；
  - 热敏电阻其作用是测量组件内的温度；
  - 热电元件，通过改变热电元件的极性达到加热或冷却的目的；
  - ATC和热敏电阻相接，其作用是保持LD组件内恒定的温度（如250C），以保证激光器参数的稳定性。



## 3.2 发光二极管

- **发光二极管LED (Light Emission Diode) :**
- **光谱特性：** 发光二极管发射的是自发辐射光，没有谐振腔对波长进行选择，谱线较宽。
- 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（30-60nm），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的结构

□ 发光二极管常分为三种类型，分面发光型LED，侧面（边）发光型LED，超辐射发光二极管。

### □ 1. 面发光二极管

□ 由N—P—P双异质结构成。LED发射面积限定在一个小区域内，区域的横向尺寸与光纤尺寸相近。面发光二极管输出的功率较大，一般注入100mA电流时，就可达几个毫瓦，但光发散角大，水平和垂直发散角都可达到 $120^\circ$ ，与光纤的耦合效率低。

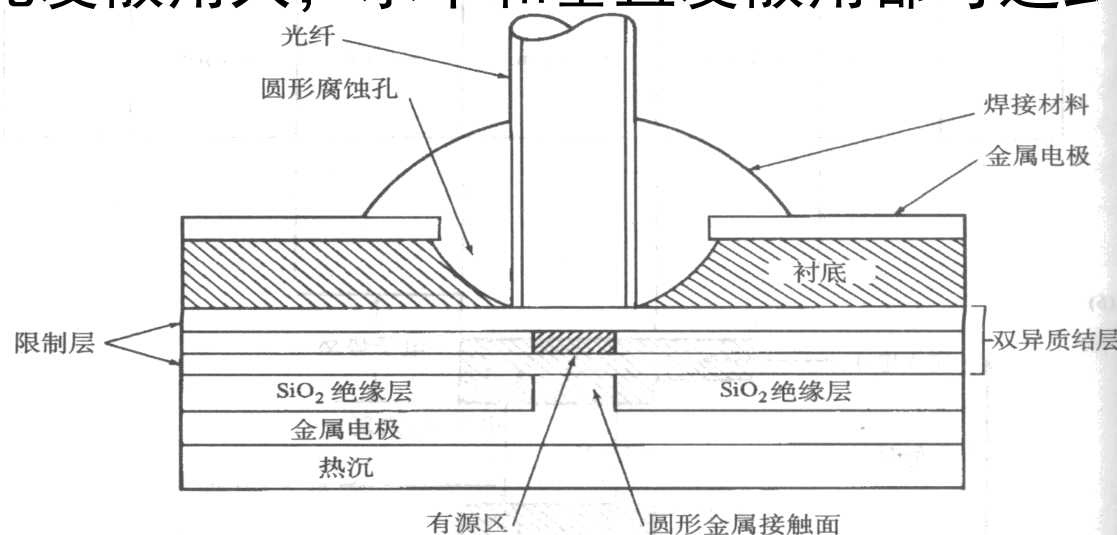


图3.2.1 面发光二极管的结构

## 3.2.1 LED的结构

□ **2. 边发光二极管**，也采用了双异质结结构。利用SiO<sub>2</sub>掩模技术，在P面形成垂直于端面的条形接触电极(约40~50 μm)，从而限定了有源层的宽度；同时，增加光波导层，进一步提高光的限定能力，把有源区产生的光辐射导向发光面，以提高与光纤的耦合效率。其有源层一端镀高反射膜，另一端镀增透膜，以实现单向出光。在垂直于结平面方向，发散角约为30°，具有比面发光二极管高的输出耦合效率。

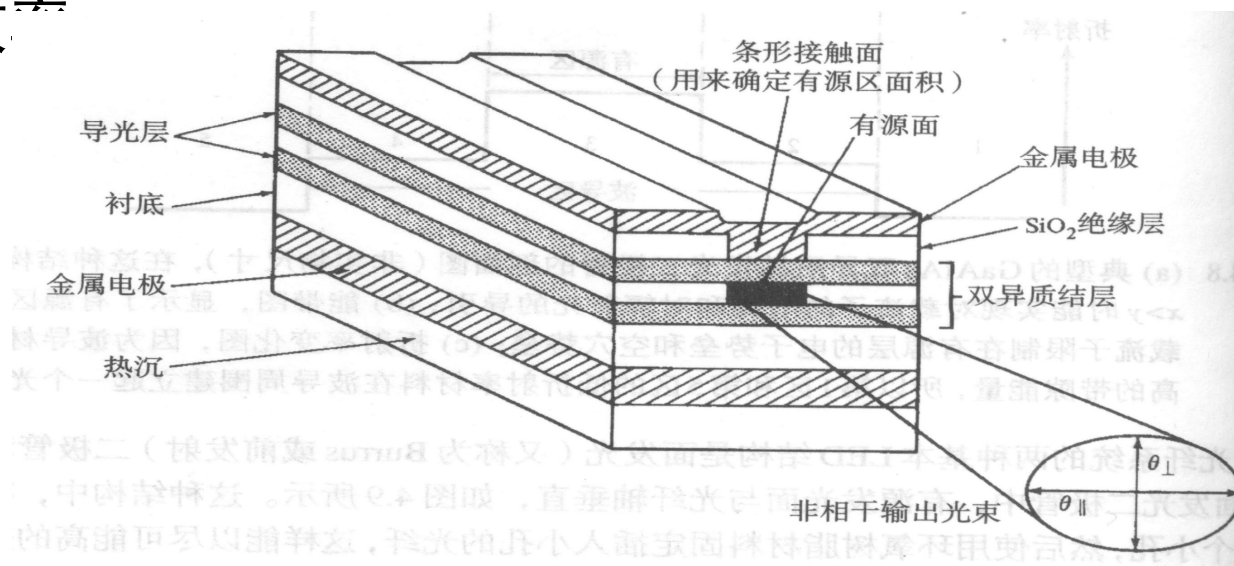


图3.2.2 边发光二极管的结构

## 3.2.1 LED的结构

### 3. 超辐射发光二极管

- 超辐射发光二极管SLD (Superluminescent Diodes) 是一种介于激光二极管LD和发光二极管LED之间的半导体光源，它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。结构大体上与激光器的结构相似。

目前，超辐射发光二极管在光纤通信中的应用还比较少。

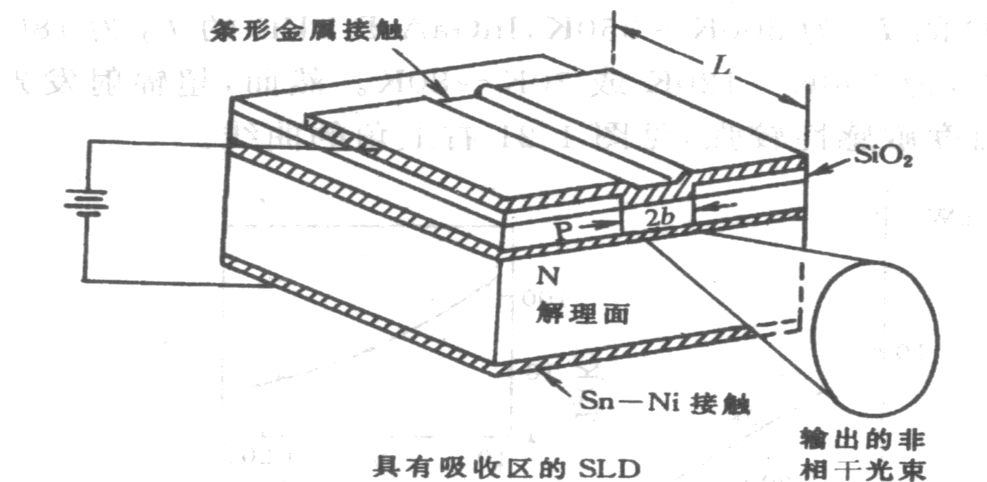


图3.2.3 超辐射发光二极管的结构

## 3.2.1 LED的结构

- 对于诸如局域网(LAN)和类似短距离网络系统(如计算机数据线路)应用而言,系统设计者总是希望使用LED,而不愿使用激光二极管LD,其**原因**是LED除有**低成本**外,还具有高的**温度稳定性**、高的**可靠性**、宽的**工作温度范围**、低的**噪声**和简单的控制**电路**等优点。
- 但是,LED的窄带宽和进入光纤的光功率又限制它在上述短**距离**、大**容量**系统中的应用。研究、开发出工作于数百兆比特每秒到数吉比特每秒速率的LED和相应的驱动电路,将会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络具有更大的吸引力。目前已有直接调制速率可达到300Mb/s以上的高速LED产品问世。

## 3. 2. 2 LED特性

### □1. 光谱特性

- (1) **波长**：光谱是以自发发射为主的光谱，发光谱线较宽。发光二极管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，也无法改变他们的禁带，因此为了得到一个**特定**的波长，我们必须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）的禁带是1.42eV，但是半导体化合物砷化镓铝（GaAlAs）就可以得到1.42eV到1.92eV不等的禁带。

$$\lambda_c (nm) = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1240}{E_g (eV)}$$

## 例

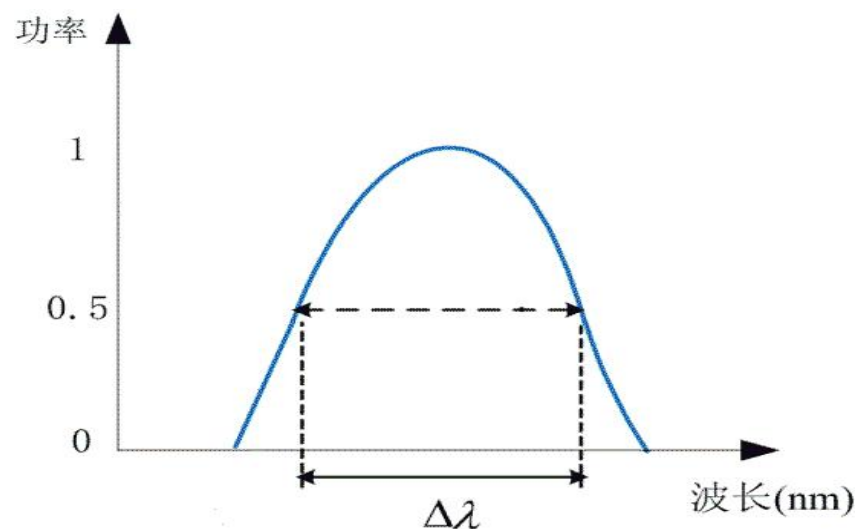
- 一个光电二极管，P型和N型区域均采用InP，本征层采用InGaAs。其中InP在300K时，其带隙能量为1.35eV，计算InP的截止波长是多少？

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.35 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 920 \text{ nm}$$

## 3. 2. 2 LED特性

### □ (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，即半峰值全带宽（FWHM, Full width at half maxima），简称谱宽，或者线宽。





## 3. 2. 2 LED特性

### □2. P-I特性

- 输出的光功率随注入电流的变化关系。

### □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两端压降和电流。
- (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。

## 3. 2. 2 LED特性

---

### □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”。

### 3.2.3 LED与光纤的耦合

- LED与光纤的耦合是发光二极管应用中的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。一般说来，LD与单模光纤的耦合效率可以达到30%~50%，多模光纤可达70%~90%；而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**：**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到耦合效率。

### 3. 2. 3 LED与光纤的耦合

- 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**。
- 光源发光面积**大于**纤芯面积时，将光纤端面直接对准光源发光面进行耦合，这种直接耦合的方法结构简单，但耦合效率低。
- 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。

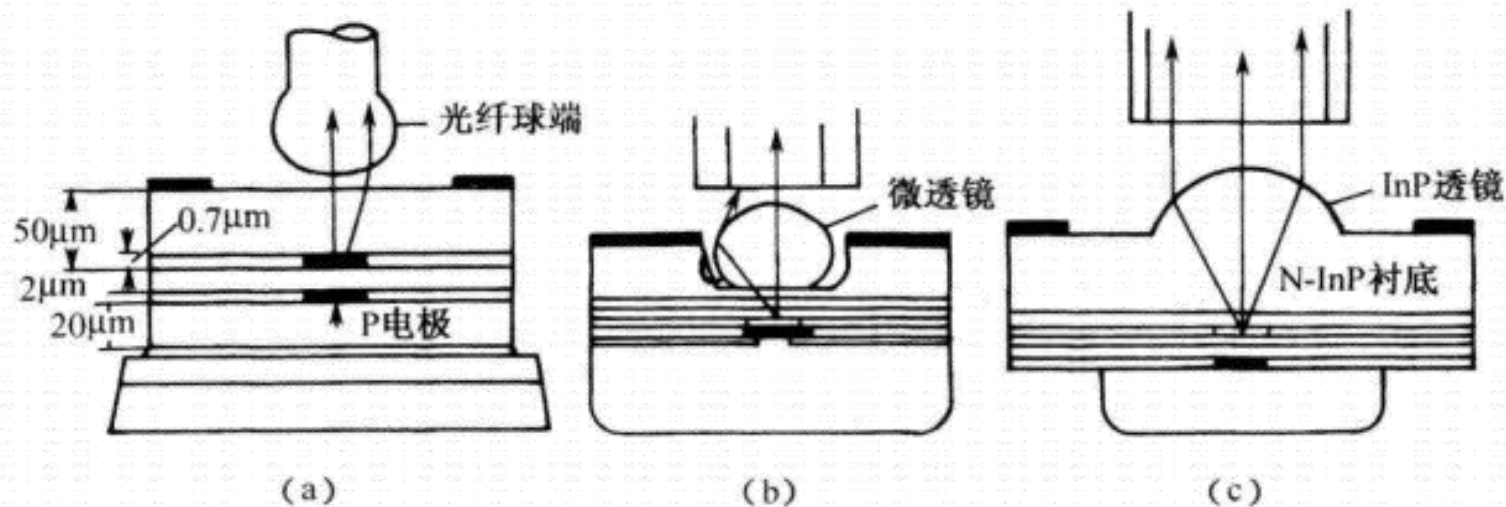


图3. 2. 7所示为**面**发光二极管与光纤的透镜耦合

图3. 2. 7 (a) 光纤端部做成**球**透镜，图3. 2. 7 (b) 采用**截头**透镜，图3. 2. 7 (c) **集成**微透镜

- 采用这种透镜耦合后，其耦合效率可以达到10%左右。

### 3. 2. 3 LED与光纤的耦合

- 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

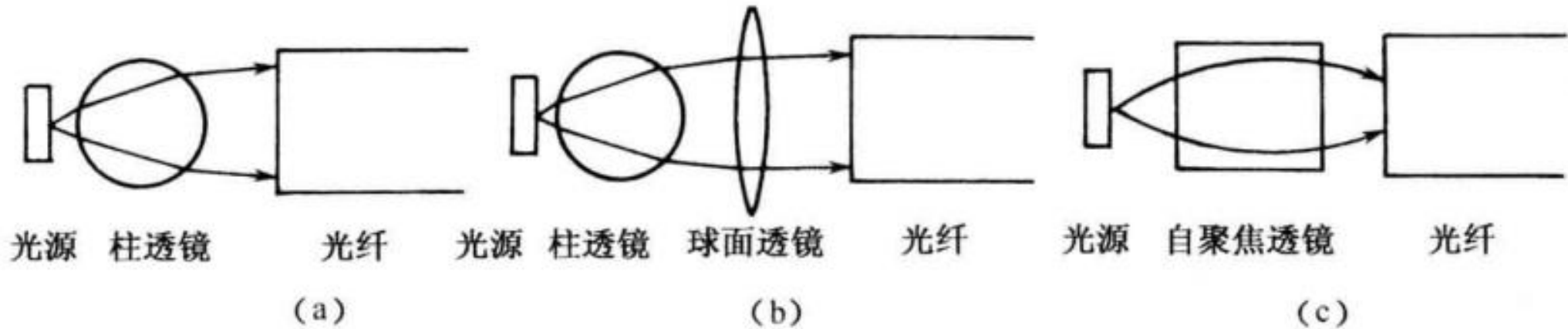


图3. 2. 8 光源与光纤的透镜耦合

- 如图3. 2. 8 (a)、(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. 2. 8 (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。

## 思考：比较半导体激光器（LD）和发光二极管（LED）的异同？

### □不同：

- 工作**原理**不同，LD发射的是受激辐射光，LED发射的是自发辐射光。LED不需要光学谐振腔，而LD需要。
- 和LD相比，LED**输出光功率**较小，光谱较宽，调制频率较低。但发光二极管性能稳定，**寿命**长，输出功率线性范围宽，而且制造工艺简单，**价格**低廉。所以，LED的主要**应用场合**是小容量（窄带）短距离通信系统；而LD主要应用于长**距离**大容量（宽带）通信系统。

## 思考：比较半导体激光器（LD）和发光二极管（LED）的异同？

### □ LD和LED的相同之处：

- 使用的半导体材料相同、结构相似，LED和LD大多采用双异质结（DH）结构，把有源层夹在P型和N型限制层之间。

### □ ★各种光源的性能对比与应用分析

- LED通常与多模光纤耦合，用于小容量短距离系统；
- LD通常与G. 652和G. 653单模光纤耦合，用于大容量长距离系统；
- 分布反馈激光器主要与G. 653或G. 654单模光纤或特殊设计的单模光纤耦合，用于超大容量超长距离的新型光纤系统。

## 4.1 光检测器的工作原理

- **光接收机**的主要作用是将接收到的微弱光信号转变为电信号，放大并处理，恢复为原来的形式。
- 光接收机由光电检测器、放大器和相关电路组成。
- 光接收机又分为模拟光接收机和数字光接收机。
  - **光电检测器**PD(photodiode)是光接收机的核心，工作机理基于半导体材料的光电效应，光电检测器可以将光信号转变为电流信号。
  - 目前使用的光电检测器：本征型光电二极管（简称PIN管）和雪崩型光电二极管（简称APD）。
  - **PIN光电二极管**无放大能力，用于简单，性能不高短距离通信系统，价格较为便宜。
  - **APD**具有内部增益高、响应速度快、光电转换效率高、光生电流大等特点，因此主要用于要求性能好、有高灵敏度的中长距离光纤通信系统中。



## 4.1 光检测器的工作原理

- 光检测器的作用是将接收到的光信号转换成电流信号。其工作过程的基本机理是光的吸收。
- 功能： 光信号→电信号
- 类型：
  - **热检测器**：通过吸收光子使器件升温而达到探测光能大小的器件
  - **光电导型检测器**：通过吸收光子使材料产生附加的光生载流子从而使材料的电导率发生变化
  - **光伏检测器**：利用光生伏特效效应制成的光检测器

## 4.1 光检测器的工作原理

- 当能量超过禁带宽度 $E_g$ 的光子入射到半导体材料上时，每一个光子若被半导体材料吸收将会产生一个电子-空穴对，如果此时在半导体材料上加上电场，电子-空穴对就会在半导体材料中渡越，形成光电流。

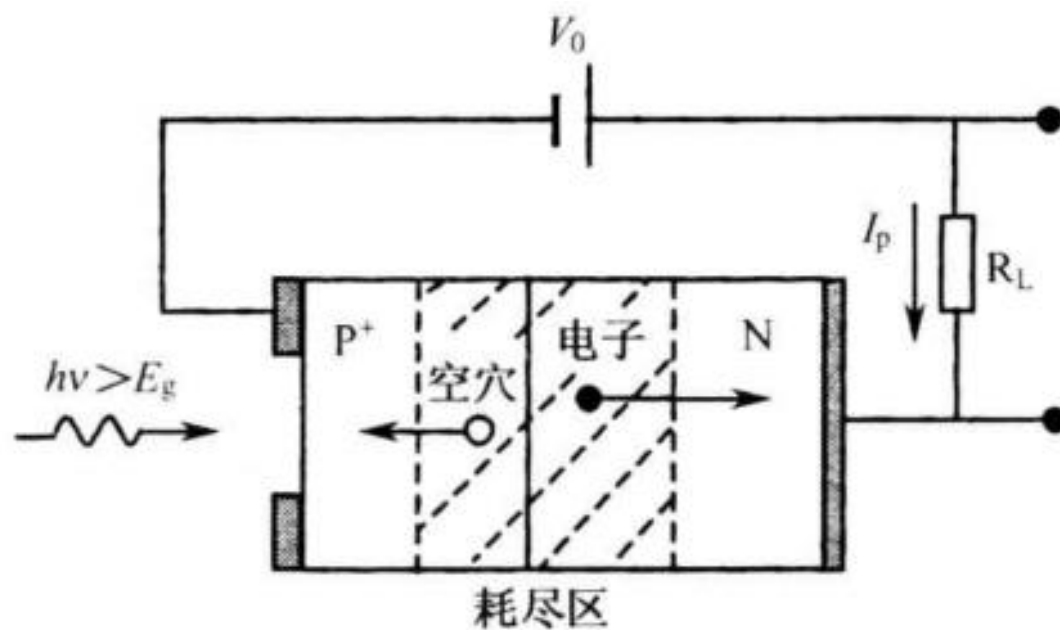


图4.1.1 光检测器的工作原理

## 4.1 光检测器的工作原理

### 4.1.1 PIN光检测器

- PIN光检测器也称为PIN光电二极管，在此，PIN的意义是表明半导体材料的结构，P<sup>+</sup>和N型半导体材料之间插入了一层掺杂浓度很低的半导体材料（如Si），记为I，称为本征区。

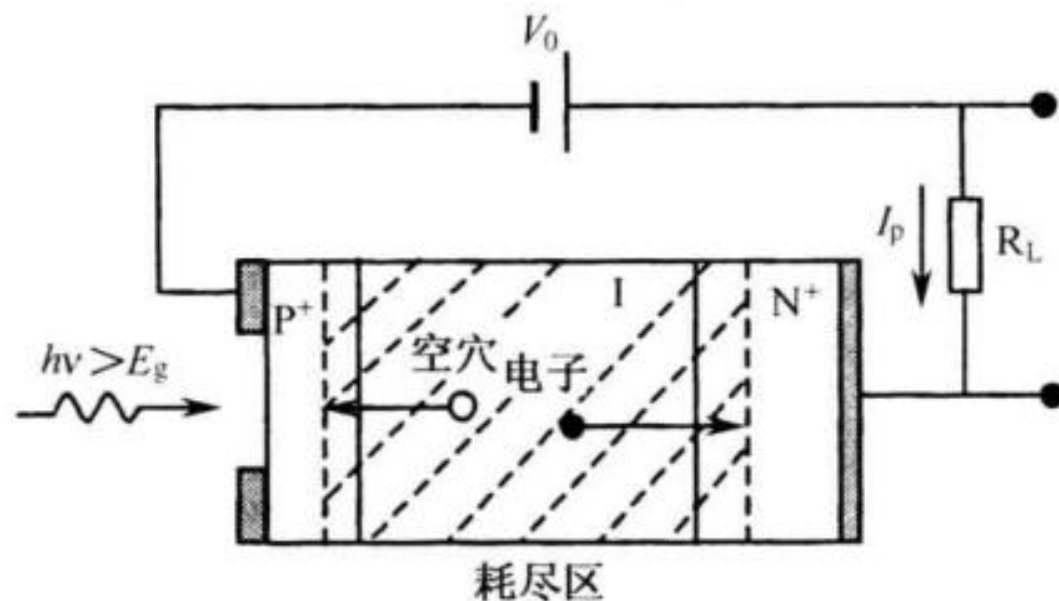


图4.1.2 PIN光电二极管

## 4.1 光检测器的工作原理

### 4.1.2 APD光检测器

- APD光检测器也称为雪崩光电二极管（Avalanche Photodiode）。
- 特点：增加了一个附加层P，在反向偏置时，夹在I层与N+层间的PN+结中存在着强电场，一旦入射信号光从左侧P+区进入I区后，在I区被吸收产生电子-空穴对，其中的电子**迅速**漂移到PN+结区，PN+结中的强电场便使得电子产生雪崩效应。

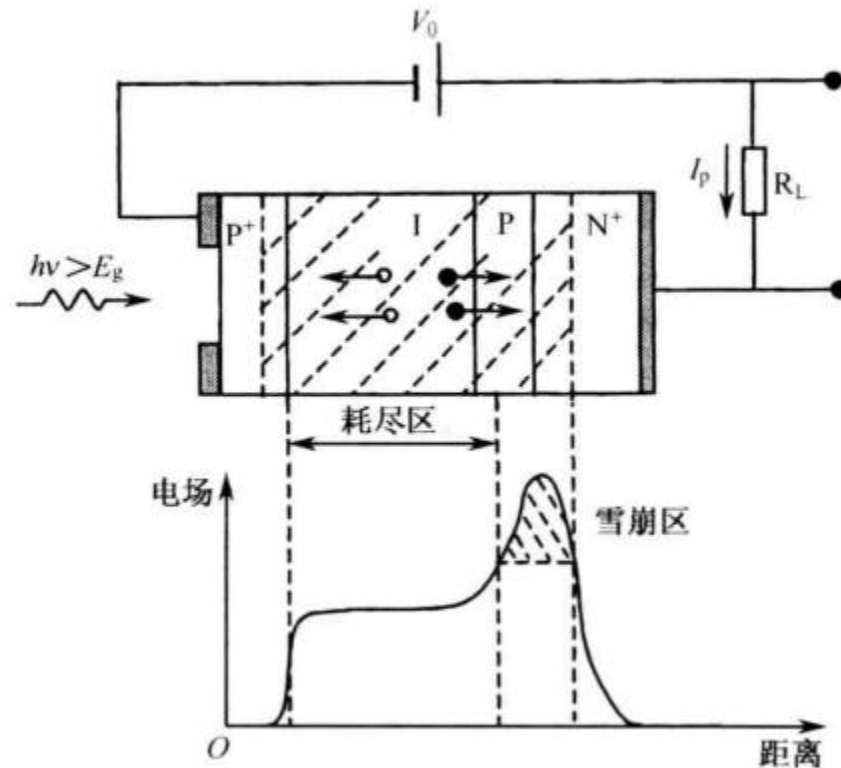


图4.1.3 APD光电二极管

### 3.3 光发射机

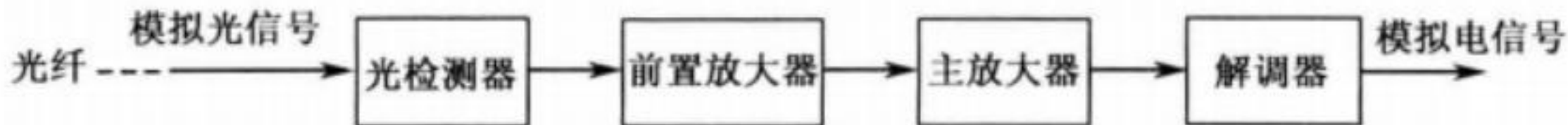
- 按照光纤通信系统传输的是模拟信号还是数字信号，可以将它分为模拟传输系统和数字传输系统，采用的光发射机分别称为模拟光发射机和数字光发射机。
- 从对激光器的调制来看，两者采取的调制方式分别是模拟调制和数字调制。
- **模拟系统**对其中光源的线性度要求较高，所以非线性补偿电路是模拟光发射机中的重
- **数字系统**中，光发射机的主要功能部件有驱动电路、自动功率控制电路、温度控制电路等，对于数字光发射机，电形式的数字信号通过输入接口后，必须经过**码型变换**，将普通二进制双极性信号转换成适合在光纤中传输的码型信号。
- 目前，数字光发射机的产品常以**光发射模块**的形式出现，线路编码单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**。

## 3.4 外调制器

- **调制**分为直接调制和外调制两种方式。
- 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的变化。由于激光器工作在直流状态，所以消除了光源啁啾。常用的类型是M-Z型电光强度调制器；多量子阱电吸收MQW-EA调制器。

## 4.3 光接收机

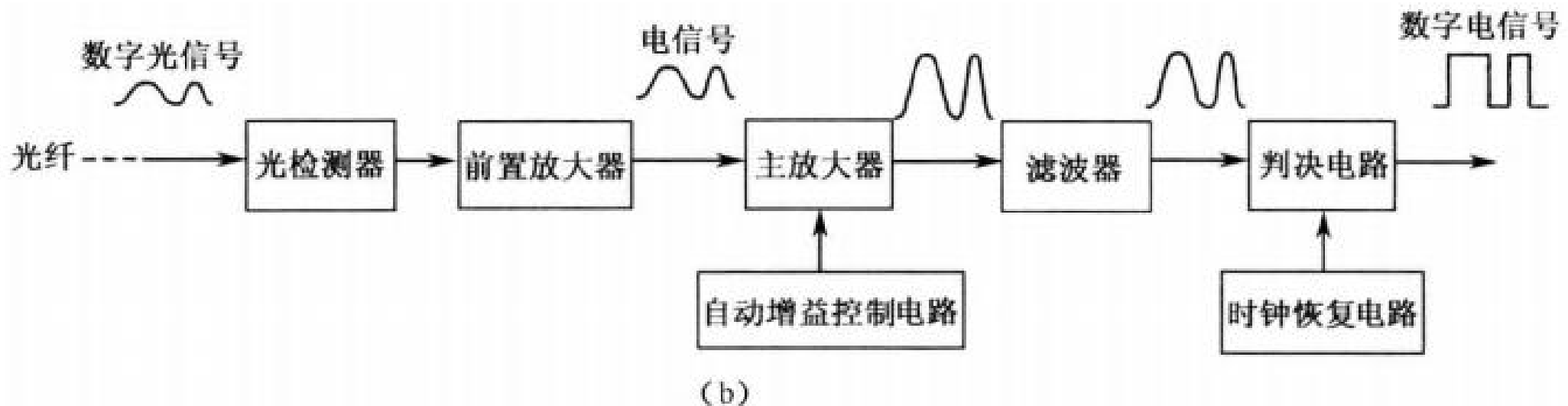
- 光接收机的**作用**是将光纤终端的光信号转换为电信号，然后进行放大、处理，最后还原成原始的电信号形式。
  - 光纤通信系统分模拟和数字两种传输系统。采用的光接收机分别称为模拟光接收机和数字光接收机。
  - 模拟光接收机比较简单，光检测器的输出信号经低噪声**前置放大器**放大后，送入**主放大器**做进一步放大处理，然后根据模拟信号的**调制**方式，选择相应的解调器，解调后的信号即为所需的模拟电信号。



4.3.1 (a) 模拟光接收机方框图

## 4.3 光接收机

- 数字系统具有普及性，数字光接收机光接收机主要由**光检测器**、**前置放大器**、**主放大器**、滤波器、判决电路、时钟恢复电路、自动增益控制电路等电路组成。



4.3.1 (b) 数字光接收机方框图



## 4.3 光接收机

### □ 各部分的作用

- 光电检测器
  - 光信号 → 光电流
- 前置放大器
  - 低噪声放大
- 均衡器和主放大器
  - 消除码间串扰并将信号放大到合适判决的幅度
- 定时提取
  - 恢复采样所需的时钟
- AGC放大
  - 控制APD偏压和放大器增益

} 接收机前端

## 4.3 光接收机

### □1. 前置放大器

- 从光检测器输出的电流信号十分微弱，必须经过前置放大器放大，前置放大器在光接收机中起关键作用，要求它有足够小的噪声、适当的带宽和一定的增益。
- 前置放大器有多种类型，如双极型晶体管前置放大器、场效应晶体管互阻抗前置放大器、PIN-FET（PIN管与场效应管）前置放大器组件等。

## 4.3 光接收机

### □2. 增益可调节的主放大器

- 前置放大器输出信号的幅度对于信号的判决是不够的，因此还需主放大器做进一步的放大。
- 主放大器除了将前置放大器输出的信号放大到判决电路**所需要**的信号电平外，还起着**调节增益**的作用。
- 当光电检测器输出的信号出现**起伏**时，通过光接收机的自动增益控制电路对主放大器的增益进行调整，即输入信号越大，增益越小，反之，对于小的信号呈现较大的增益，这样主放大器的输出信号幅度在一定范围**不受**输入信号的**影响**。一般主放大器的峰-峰值输出大约是几伏。

## 4.3 光接收机

### □ 3. 滤波器

- 光脉冲从光发射机输出，经过光纤长距离传输，由于光纤**色散**的影响，波形将出现拖尾，系统中其他的器件，如光放大器、光检测器等，因其带宽的限制和非理想的传输特性，会使光脉冲发生**畸变**，同时加剧码元间的串扰，造成判决电路误判，产生误码。
- 所以在判决电路前必须加滤波器对已发生畸变和有严重码间干扰的信号进行**均衡**，使其尽可能地恢复原来的状况，以利于定时判决。

## 4.3 光接收机

### □4. 时钟恢复和判决电路

- 为了能从滤波器的输出信号判决出是“0”码还是“1”码，首先要设法知道应在什么时刻进行判决，亦即应将混合在信号中的**时钟信号**（又称定时信号）**提取**出来，这是时钟恢复电路应该完成的功能。
- 接着再根据给定的**判决门限电平**，按照时钟信号所“指定”的瞬间来判决由滤波器送过来的信号，若信号电平超过判决门限电平，则判为“1”码；低于判决门限电平，则被判为“0”码。

## 4.4 光收发合一模块

- 光收发合一模块是将传统分离的发射、接收组件合二为一的一种光电器件。
- 在数字光纤通信中，光信号的**发送**部分和**接收**部分做成**标准化**的模块，即光收发一体化模块，简称“光模块”（Optical module）。
  - 应用的领域包括千兆以太网、同步数字传输系统（SDH /SONET）、CWDM、CDMA光纤直放站、光纤通道、城域网等，传输速率分为155Mb/s、622Mb/s、1.25Gb/s、2.5Gb/s、10Gb/s等，采用的波长为850nm、1310nm、1550nm，传输距离从几百米到一百多千米。
- **光收发合一模块**常由插拔式光电器件、电子功能线路和光接口几个部分组成。
- 光模块接口部分的电信号接触片，俗称“**金手指**”。
- 金手指的长度不一样，最长的是信号地，其次是电源，最短的是信号，这样在**插拔**的时候就保证了地→电源→信号的顺序。

## 课后巩固提升

- 1. 光与物质间的相互作用过程有哪些？
- 2. 能级和能带的关系？
- 3. 什么是导带, 价带, 禁带？
- 4. 什么是满带, 空带？从能带结构来看导体, 绝缘体, 半导体有什么差异？
- 5. 本征半导体, P型半导体, N型半导体特性。
- 6. 本征半导体与杂质半导体导电机构有何不同？
- 7. 激光器的工作原理。
- 8. 什么是雪崩倍增效应？
- 9. 光接收机中有哪些噪声？

# 1：光与物质间的相互作用过程有哪些？

- 答：光与物质之间的三种相互作用包括受激吸收、自发辐射和受激辐射。
- (1) 受激吸收。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。
- (2) 自发辐射。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。
- (3) 受激辐射。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。



## 2. 能级和能带的关系？

- 分子轨道理论中，单个原子的能级是分立的， $N$ 个相距无限远的原子能级也是分立的，当固体中 $N$ 个原子紧密排列时，由于原子间的相互作用，原来同一大小的能级这时彼此数值上就有小的差异。
- 同一能级就分裂成为一系列和原来能级很接近的仍包含 $N$ 个能量的新能级。这些新能级基本上连成一片形成能带。

### 3. 什么是导带, 价带, 禁带?

- **导带**: 最外层能级所组成的能带称导带。**半导体**的导带能级几乎是空的, 其中的电子具有导电作用。(电子可以活动的自由空间大, 移动起来就可以形成电流, 所以电子具有导电作用)
- **价带**: 次外层的能带称价带。价电子所占据能带称“价带”, 可能被电子占满, 也可能被占据一部分。
- 在导带和价带中间区域有**禁带**, 表示这个区域中**禁止**电子停留, 但可以上下跃迁。本征半导体在较低温下, 费米能级 ( $E_f$ 表示衡量电子在各能级的一种分布情况的一个参量, 比费米能级高的粒子数少, 比费米能级低的粒子数多) 处于禁带的中间位置。

## 4. 什么是满带, 空带? 从能带结构来看导体, 绝缘体, 半导体有什么差异?

- 完全被电子占据的能带称“满带”，完全未被占据的称“空带”。
- **满带**：电子填充能带时，总是从能量最低的能带向上填充，满带被电子占满，满带中的电子**不会**导电。（因为不能移动，就没法形成电流，就不起导电作用）
- **导体**一般都有未被价电子填满的导带。还有满带与空带重叠或导带与空带重叠的情形。
- **绝缘体**和半导体在满带和空带之间都有一个无能级存在的禁带。绝缘体的**禁带**宽度一般很**宽**， $\Delta E_g$  约为3 ~ 6eV，半导体的禁带宽度较窄， $\Delta E_g$ 约为 0.1 ~ 2eV。
- 在绝缘体中和半导体中是满带所以它们不能导电。但**半导体**很容易因其中有杂质或受外界影响（如光照，升温等），使价带中的电子数目减少，或使空带中出现一些电子而成为导带，因而也能**导电**。

## 5. 本征半导体，P型半导体，N型半导体特性。

- ❑ **本征半导体**：就是指没有任何外来杂质的理想半导体。又称**I型**半导体。I型半导体是完全纯净或结构完整的半导体，是完全由基质原子组成的晶体。在绝对零度时，不受外界影响的情况下，导带没有电子，价带也没有空穴，因此不能导电。在热运动或外界的影响下，价电子跃迁到导带，产生自由电子和空穴，构成导电载流子。
- ❑ 如果向本征半导体掺入不同杂质元素，则相当于给半导体材料提供导电的电子或空穴。在半导体中掺入受主杂质就得**P型半导体**（多余空穴），掺入施主杂质，得N型半导体。
- ❑ 如在纯净的硅晶体中掺入三价元素（如硼），使之取代晶格中硅原子的位置，形成P型半导体。
- ❑ 在纯净的硅晶体中掺入电子的杂质元素而形成的半导体材料称为**N型半导体**，它属于电子导电型，N型中，可移动的电子多。如掺入五价元素（如磷），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了N型半导体。

## 6. 本征半导体与杂质半导体导电机构有何不同？

- 本征半导体中导带中的电子与满带中的空穴数**相等**。本征半导体的导电机构是电子与空穴并存，所以它有电子导电性同时具有空穴导电性。
- 掺施主杂质的半导体主要靠**电子导电**，称为电子型半导体或 N 型半导体，N 型半导体中导带中的电子数远大于满带中的空穴数。
- 掺受主杂质的半导体主要靠**空穴导电**，称为空穴型半导体或 P 型半导体，P 型半导体中导带中的空穴数远大于满带中的电子数。

## 7. 激光器的基本组成。

(激励(泵浦) 和能产生激光的激活介质或增益介质是形成粒子数反转的条件)

### (1) 泵浦源

使工作物质产生粒子数反转分布的外界激励源，称泵浦源，类似水泵。物质在泵浦源的作用下，能把低能级上的粒子激活到高能，以便实现粒子数反转 $N_2 > N_1$ 。

### (2) 能够产生激光的工作物质

我们将处于粒子数反转分布状态的物质称增益物质或激活物质（光的放大又称增益），需需求激活物质作为激光器。

### (3) 光学谐振腔

维持光振荡，起到光放大作用；使激光产生极好的方向性；使激光的单色性好。为了形成激光震荡，提供必要的反馈以及进行频率选择，是特定的频率。

## 8.什么是雪崩倍增效应?

- ❑ 雪崩光电二极管工作时**外加高反向偏压** (约100~150 V)，在**PN**结内部形成一高电场区，入射光功率产生的电子空穴对经过高场区时不断被加速而获得很高的能量，这些高能量的电子或空穴在运动过程中与价带中的束缚电子碰撞，使晶格中的原子电离，产生新的电子空穴对。
- ❑ 新的电子空穴对受到同样加速运动，又与原子碰撞电离，产生电子空穴对，称为**二次**电子空穴对。如此**重复**，使**载流子**和**反向光生电流**迅速增大，这个物理过程称为雪崩倍增效应。

## 9. 光接收机中有哪些噪声？

□ 光接收机中主要有两种噪声：

第一种**光检测器**的噪声，包括量子噪声、暗电流噪声及由APD的雪崩效应产生的附加噪声。这是一种散弹（粒）噪声，由光子产生光生电流过程的随机性所引起，即使输入信号光功率恒定时也存在。散弹噪声不同于热噪声，它不是叠加在光电流上，是产生光电流过程随机产生。

第二种**热噪声**及**前置放大器**的噪声，热噪声是在特定温度下由电子的热运动产生，任何工作于绝对零度以上的器件都是存在的，在光接收机中主要包括光检测器负载电阻、前置放大器输入电阻的热噪声。前置放大器的噪声，严格说来，也是一种散粒噪声，但因这是由电域的载流子的随机运动引起的，可以通过噪声系数或噪声等效温度与热噪声一并进行计算，所以在本书中就将前置放大器的噪声和电阻热噪声合称为前置放大器的噪声。