
高等光电系统与信号处理

光电器件与检测技术

第六章 光电检测技术基础

-
- 光的基本性质
 - 辐射与光度学量
 - 半导体基础知识
 - 光电效应
-

光的基本性质

■ 牛顿——微粒说

- 根据光直线传播现象，对反射和折射做了解释
- 不能解释较为复杂的光现象：干涉、衍射和偏振

■ 波动理论

- 惠更斯、杨氏和费涅耳等
- 解释光的干涉和衍射现象
- 麦克斯韦电磁理论：光是一种电磁波

光的基本性质

■ 光量子说

- 1900年普朗克在研究黑体辐射时，提出辐射的量子论
- 1905年，爱因斯坦在解释光电发射现象时提出光量子的概念
- 光子的能量与光的频率成正比
- 光具有波粒二象性

辐射度的基本物理量

- 辐射能 Q_e ：一种以电磁波的形式发射、传播或接受的能量。单位：焦耳[J]
- 辐射通量 Φ_e ：单位时间内通过一定面积发射、传播或接受的能量，又称辐射功率 P_e ，是辐射能的时间变化率。单位：瓦 [W]
- 辐射强度 I_e ：点辐射源在给定方向上通过单位立体角内的辐射通量。单位： [W/Sr]

辐射度的基本物理量

- 辐射照度 E_e ：投射在单位面积上的辐射通量。单位： $[W/m^2]$
- 辐射出射度 M_e ：扩展辐射源单位面积所辐射的通量（也称辐射本领）。单位： $[W/m^2]$
- 辐射亮度 L_e ：辐射表面定向发射的辐射强度。单位： $[W/m^2 \cdot Sr]$
- 光谱辐射通量 $\Phi_e(\lambda)$ ：辐射通量的光谱密度，即单位波长间隔内的辐射通量。

基本辐射度量的名称、符号和定义方程

名称	符号	定义方程	单位	符号
辐射能	Q,		焦耳	J
辐射能密度	w	$w = dQ / dv$	焦耳 / 立方米	Jm^{-3}
辐射通量, 辐射功率	Φ P	$\Phi = dQ / dt$	瓦特	W
辐射强度	I	$I = d\Phi / d\Omega$	瓦特 / 球面度	Wsr^{-1}
辐射亮度	L	$L = d^2\Phi / d\Omega dA \cos\theta$ $= dI / dA \cos\theta$	瓦特 / 球面度 平方米	Wm^{-2} sr^{-1}
辐射出射度	M	$M = d\Phi / dA$	瓦特 / 平方米	Wm^{-2}
辐射照度	E	$E = d\Phi / dA$	瓦特 / 平方米	Wm^{-2}

光度量的最基本单位

- 发光强度 I_v ：发出波长为555nm的单色辐射，在给定方向上的发光强度规定为1cd。单位：坎德拉（Candela）[cd]，它是国际单位制中七个基本单位之一。
- 光通量 Φ_v ：光强度为1cd的均匀点光源在1sr内发出的光通量。单位：流明 [lm]。
- 光照度 E_v ：单位面积所接受的入射光的量，单位：勒克斯 [lx]，相当于 1平方米面积上接受到1个流明的光通量。

光度的基本物理量

- 光度量和辐射度量的定义、定义方程是一一对应的。辐射度量下标为 e ，例如 Q_e ， Φ_e ， I_e ， M_e ， E_e ，光度量下标为 v ， Q_v ， Φ_v ， I_v ， L_v ， M_v ， E_v 。
- 光度量只在可见光区（380 — 780 nm）才有意义。
- 辐射度量和光度量都是波长的函数。

晴天阳光直射地面照度约为**100000lx**

晴天背阴处照度约为**10000lx**

晴天室内北窗附近照度约为**2000lx**

晴天室内中央照度约为**200lx**

晴天室内角落照度约为**20lx**

阴天室外**50—500lx**

阴天室内**5—50lx**

月光（满月）**2500lx**

日光灯**5000lx**

电视机荧光屏**100lx**

阅读书刊时所需的照度**50~60lx**

在**40W**白炽灯下**1m**远处的照度约为**30lx**

晴朗月夜照度约为**0.2lx**

黑夜**0.001lx**

半导体基础知识

- 导体、半导体和绝缘体
 - 半导体的特性
 - 半导体的能带结构
 - 本征半导体与杂质半导体
 - 平衡和非平衡载流子
 - 载流子的输运过程
 - 半导体的光吸收
 - PN结
-

导体、半导体和绝缘体

- 自然存在的各种物质，分为气体、液体、固体。
- 固体按导电能力可分为：导体、绝缘体和介于两者之间的半导体。
- 电阻率 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧姆·厘米范围内——导体
- 电阻率 10^{12} 欧姆·厘米以上——绝缘体
- 电阻率介于导体和绝缘体之间——半导体

半导体的特性

- 半导体电阻温度系数一般是负的，而且对温度变化非常敏感。根据这一特性，热电探测器件。
- 导电性受极微量杂质的影响而发生十分显著的变化。（纯净Si在室温下电导率为 5×10^{-6} /(欧姆·厘米)。掺入硅原子数百万分之一的杂质时，电导率为 2 /(欧姆·厘米))
- 半导体导电能力及性质受光、电、磁等作用的影响。

本征和杂质半导体

- 本征半导体就是没有杂质和缺陷的半导体。
- 在绝对零度时，价带中的全部量子态都被电子占据，而导带中的量子态全部空着。
- 在纯净的半导体中掺入一定的杂质，可以显著地控制半导体的导电性质。
- 掺入的杂质可以分为施主杂质和受主杂质。
- 施主杂质电离后成为不可移动的带正电的施主离子，同时向导带提供电子，使半导体成为电子导电的n型半导体。
- 受主杂质电离后成为不可移动的带负电的受主离子，同时向价带提供空穴，使半导体成为空穴导电的p型半导体。

平衡和非平衡载流子

- 处于热平衡状态的半导体，在一定温度下，载流子浓度一定。这种处于热平衡状态下的载流子浓度，称为平衡载流子浓度。
- 半导体的热平衡状态是相对的，有条件的。如果对半导体施加外界作用，破坏了热平衡的条件，这就迫使它处于与热平衡状态相偏离的状态，称为非平衡状态。
- 处于非平衡状态的半导体，其载流子浓度也不再是平衡载流子浓度，比它们多出一部分。比平衡状态多出来的这部分载流子称为非平衡载流子。

非平衡载流子的产生

- 光注入：用光照使得半导体内部产生非平衡载流子。
- 当光子的能量大于半导体的禁带宽度时，光子就能把价带电子激发到导带上去，产生电子—空穴对，使导带比平衡时多出一部分电子，价带比平衡时多出一部分空穴。
- 产生的非平衡电子浓度等于价带非平衡空穴浓度。
- 光注入产生非平衡载流子，导致半导体电导率增加。
- 其它方法：电注入、高能粒子辐照等。

载流子的运输过程

- 扩散
 - 漂移
 - 复合
-

半导体对光的吸收

- 物体受光照射，一部分光被物体反射，一部分光被物体吸收，其余的光透过物体。
- 吸收包括：本征吸收、杂质吸收、自由载流子吸收、激子吸收、晶体吸收
- 本征吸收——由于光子作用使电子由价带跃迁到导带
- 只有在入射光子能量大于材料的禁带宽度时，才能发生本征激发

$$h\nu \geq E_g$$

$$\nu \geq E_g / h$$

$$\nu = c / \lambda$$

$$\lambda \leq hc / E_g = \frac{1.24}{E_g} (\mu m)$$

$$\lambda_0 = hc / E_g = \frac{1.24}{E_g} \quad \text{本征吸收的长波限}$$

杂质吸收和自由载流子吸收

- 引起杂质吸收的光子的最小能量应等于杂质的电离能 ∇E^q (∇E^a)
- 由于杂质电离能比禁带宽度小，所以这种吸收在本征吸收限以外的长波区

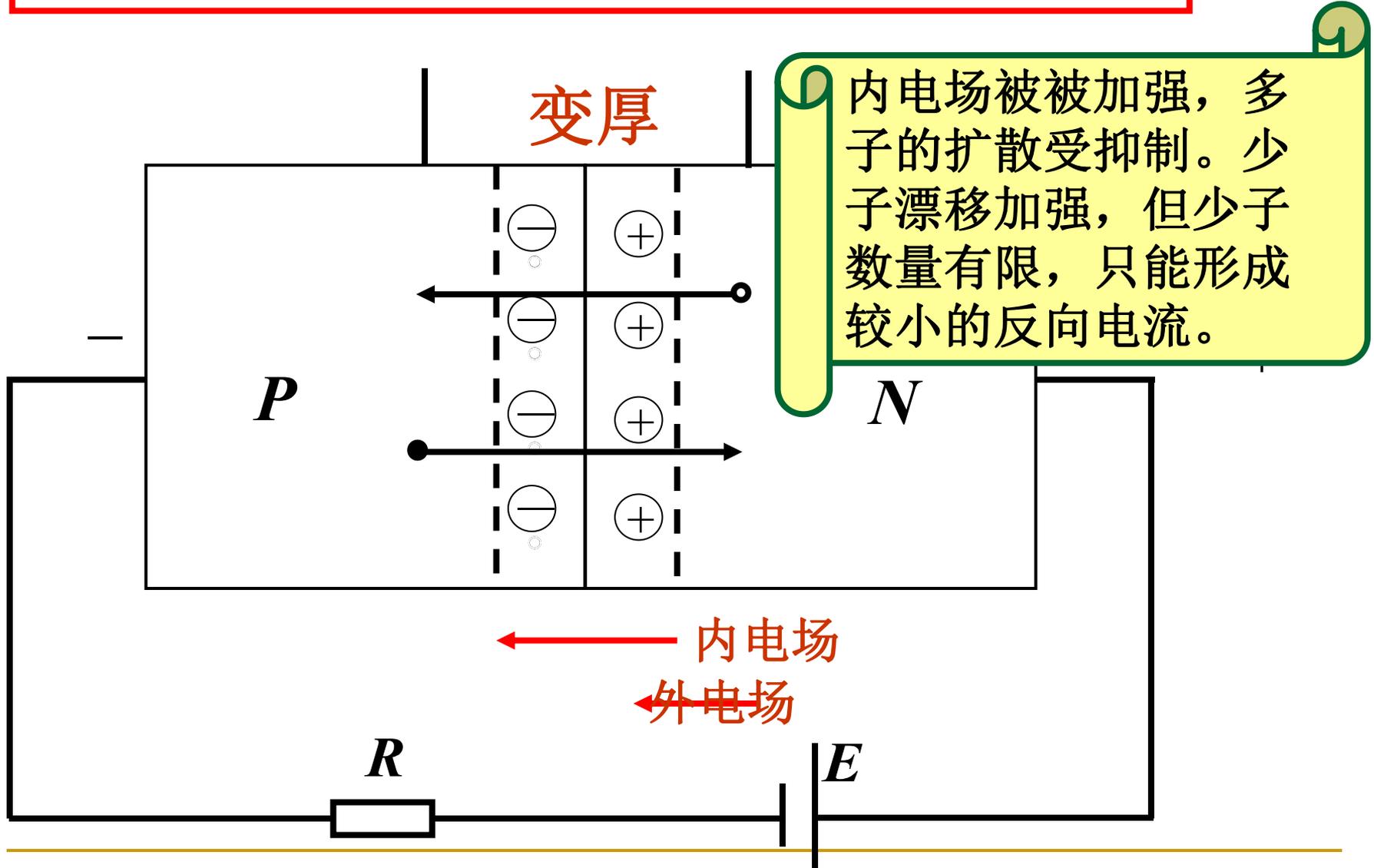
$$\lambda = \frac{1.24}{\Delta E_d (\Delta E_a)}$$

- 自由载流子吸收是由同一能带内不同能级之间的跃迁引起的。

PN结

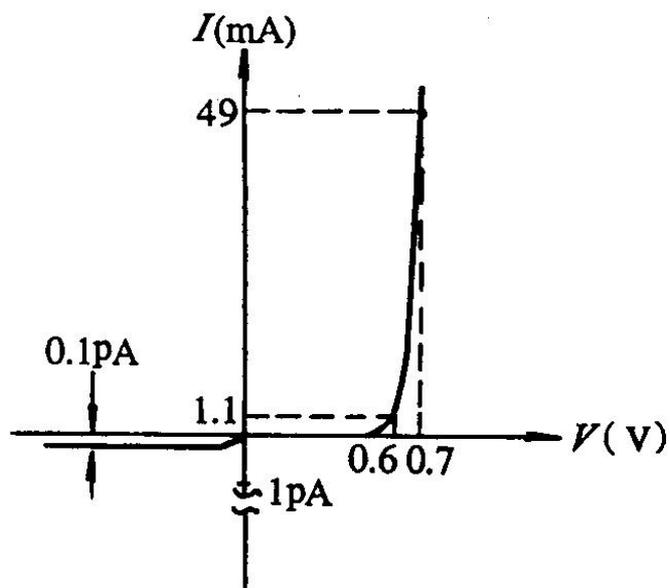
- 将P型和N型半导体采用特殊工艺制造成半导体半导体内有一物理界面，界面附近形成一个极薄的特殊区域，称为PN结。
- 是二极管、三极管、集成电路和其它结型光电器件最基本的结构单元。

PN 结反向偏置



PN结的伏安特性曲线

对应表:



V/V	I	V/V	I/pA
0	0	-0.01	-0.032
0.01	0.02pA	-0.05	-0.086
0.05	0.16pA	-0.1	-0.098
0.1	0.58pA	-0.2	-0.1
0.2	4.58pA	-0.3	-0.1
0.3	31.9pA	-0.4	-0.1
0.4	219pA	-0.5	-0.1
0.5	22 μ A	-0.6	-0.1
0.6	1.1mA	-0.7	-0.1
0.7	49mA		

光电效应

- 光照射到物体表面上使物体发射电子、或导电率发生变化、或产生光电动势等，这种因光照而引起物体电学特性发生改变统称为光电效应
- 光电效应包括外光电效应和内光电效应

- 外光电效应：物体受光照后向外发射电子——多发生于金属和金属氧化物
- 内光电效应：物体受到光照后所产生的光电子只在物质内部而不会逸出物体外部——多发生在半导体
- 内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应
- 光电导效应：半导体受光照后，内部产生光生载流子，使半导体中载流子数显著增加而电阻减少的现象

- 光生伏特效应：光照在半导体PN结或金属—半导体接触上时，会在PN结或金属—半导体接触的两侧产生光生电动势。
- **PN结的光生伏特效应**：当用适当波长的光照射PN结时，由于内建场的作用（不加外电场），光生电子拉向n区，光生空穴拉向p区，相当于PN结上加一个正电压。
- 半导体内部产生电动势（光生电压）；如将PN结短路，则会出现电流（光生电流）。

光热效应

- **光热效应**：材料受光照射后，光子能量与晶格相互作用，振动加剧，温度升高，材料的性质发生变化。
 - **热释电效应**：介质的极化强度随温度变化而变化，引起电荷表面电荷变化的现象。
 - **辐射热计效应**：入射光的照射使材料由于受热而造成电阻率变化的现象。
 - **温差电效应**：由两种材料制成的结点出现温差而在两结点间产生电动势，回路中产生电流。

第七章 光电检测器件

- 光电器件的类型与特点
- 光电器件的基本特性参数
- 半导体光电器件
 - 光电导器件—光敏电阻
 - 光伏器件
 - 光电池
 - 光电二极管/三极管
- 真空光电器件
 - 光电管
 - 光电倍增管
- 热电检测器件
 - 热敏电阻
 - 热电偶和热电堆
 - 热释电探测器件

7.1 光电器件的类型与特点

- 光电效应：光照射到物体表面上使物体的电学特性发生变化。
- 光电子发射：物体受光照后向外发射电子——多发生于金属和金属氧化物。
- 光电导效应：半导体受光照后，内部产生光生载流子，使半导体中载流子数显著增加而电阻减少。
- 光生伏特效应：光照在半导体PN结或金属—半导体接触上时，会在PN结或金属—半导体接触的两侧产生光生电动势。

光电检测器件的类型

- 光电检测器件是利用物质的光电效应把光信号转换成电信号的器件.
- 光电检测器件分为两大类:
 - 光子(光电子)检测器件
 - 热电检测器件

光电检测器件

光子器件

热电器件

真空器件

固体器件

光电管
光电倍增管
真空摄像管
变像管
像增强管

光敏电阻
光电池
光电二极管
光电三极管
光纤传感器
电荷耦合器件
CCD

热电偶/热电堆
热辐射计/热敏电阻
热释电探测器

光电检测器件的特点

光子器件	热电器件
响应波长有选择性，一般有截止波长，超过该波长，器件无响应。	响应波长无选择性，对可见光到远红外的各种波长的辐射同样敏感
响应快，吸收辐射产生信号需要的时间短，一般为纳秒到几百微秒	响应慢，一般为几毫秒

7.2 器件的基本特性参数

- 响应特性
- 噪声特性
- 量子效率
- 线性度
- 工作温度

一、响应特性

1. 响应度（或称灵敏度）：是光电探测器输出信号与输入光功率之间关系的度量。描述的是光电探测器件的光电转换效率。
 - 响应度是随入射光波长变化而变化的
 - 响应度分电压响应率和电流响应率

- 电压响应率

光电探测器件输出电压与入射光功率之比

- 电流响应率

$$S_v = \frac{V_o}{P_i}$$

光电探测器件输出电流与入射光功率之比

$$S_i = \frac{I_o}{P_i}$$

2. 光谱响应度: 探测器在波长为 λ 的单色光照射下, 输出电压或电流与入射的单色光功率之比.

$$S_V(\lambda) = \frac{V_o(\lambda)}{P_i(\lambda)}$$

$$S_I(\lambda) = \frac{I_o(\lambda)}{P_i(\lambda)}$$

3. 积分响应度: 检测器对各种波长光连续辐射量的反应程度.

4. 响应时间：响应时间 τ 是描述光电探测器对入射光响应快慢的一个参数（如图）。

- 上升时间：入射光照射到光电探测器后，光电探测器输出上升到稳定值所需要的时间。
- 下降时间：入射光遮断后，光电探测器输出下降到稳定值所需要的时间。

5. 频率响应: 光电探测器的响应随入射光的调制频率而变化的特性称为频率响应.

- 由于光电探测器信号产生和消失存在着一个滞后过程, 所以入射光的调制频率对光电探测器的响应会有较大的影响。

■ 光电探测器响应率与入射调制频率的关系

$$S(f) = \frac{S_0}{[1 + (2\pi f\tau)^2]^{1/2}}$$

$S(f)$ 为调制频率为 f 时的响应率

S_0 为调制频率为零时的响应率

τ 为时间常数 (等于RC)

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$S(f) = \frac{S_0}{[1 + (1)^2]^{1/2}} = \frac{S_0}{\sqrt{2}} = 0.707 S_0$$

f_c : 上限截止频率

时间常数决定了光电探测器频率响应的带宽

二、噪声特性

- 在一定波长的光照下光电探测器输出的电信号并不是平直的，而是在平均值上下随机地起伏，它实质上就是物理量围绕其平均值的涨落现象。

$$I = \bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

- 用均方噪声来表示噪声值大小

$$\overline{\Delta i(t)^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - \bar{i}(t)]^2 dt$$

- 噪声在实际的光电探测系统中是极其有害的。
- 由于噪声总是与有用信号混在一起，因而影响对信号特别是微弱信号的正确探测。
- 一个光电探测系统的极限探测能力往往受探测系统的噪声所限制。
- 所以在精密测量、通信、自动控制等领域，减小和消除噪声是十分重要的问题。

光电探测器常见的噪声

- 热噪声
- 散粒噪声
- 产生-复合噪声
- $1/f$ 噪声

1、热噪声

- 或称约翰逊噪声，即载流子无规则的热运动造成的噪声。
- 导体或半导体中每一电子都携带着电子电量作随机运动(相当于微电脉冲)，尽管其平均值为零，但瞬时电流扰动在导体两端会产生一个均方根电压，称为热噪声电压。
- 热噪声存在于任何电阻中，热噪声与温度成正比，与频率无关，热噪声又称为白噪声

2、散粒噪声

- 散粒噪声：入射到光探测器表面的光子是随机的，光电子从光电阴极表面逸出是随机的，PN结中通过结区的载流子数也是随机的。
- 散粒噪声也是白噪声，与频率无关。
- 散粒噪声是光电探测器的固有特性，对大多数光电探测器的研究表明：散粒噪声具有支配地位。
- 例如光伏器件的PN结势垒是产生散粒噪声的主要原因。

3、产生-复合噪声

- 半导体受光照，载流子不断产生-复合。
- 在平衡状态时，在载流子产生和复合的平均数是一定的
- 但在某一瞬间载流子的产生数和复合数是有起伏的。
- 载流子浓度的起伏引起半导体电导率的起伏。

4、 $1/f$ 噪声

- 或称闪烁噪声或低频噪声。
- 噪声的功率近似与频率成反比
- 多数器件的 $1/f$ 噪声在200~300Hz以上已衰减到可忽略不计。

5、信噪比

- 信噪比是判定噪声大小的参数。
- 是负载电阻上信号功率与噪声功率之比

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{I_S^2 R_L}{I_N^2 R_L} = \frac{I_S^2}{I_N^2}$$

- 若用分贝（dB）表示，为

$$\left(\frac{S}{N} \right) = 10 \lg \frac{I_S^2}{I_N^2} = 20 \lg \frac{I_S}{I_N}$$

6、噪声等效功率(NEP)

- 定义：信号功率与噪声功率比为1（**SNR=1**）时，入射到探测器件上的辐射通量(单位为瓦)。
- 这时，投射到探测器上的辐射功率所产生的输出电压（或电流）等于探测器本身的噪声电压（或电流）

$$NEP = \frac{\Phi_e}{SNR} (W)$$

- 一般一个良好的探测器件的**NEP**约为 $10^{-11}W$ 。
- **NEP**越小，噪声越小，器件的性能越好。

- 噪声等效功率是一个可测量的量。
- 设入射辐射的功率为 P ，测得的输出电压为 U_0
- 然后除去辐射源，测得探测器的噪声电压为 U_N
- 则按比例计算，要使 $U_0 = U_N$ ，的辐射功率为

$$NEP = \frac{P}{\left(\frac{U_0}{U_N}\right)^2} (W)$$

7、探测率与归一化探测率

- 探测率**D**定义为噪声等效功率的倒数

$$D = \frac{1}{NEP}$$

- 经过分析，发现**NEP**与检测元件的面积**A_d**和放大器带宽**Δf**乘积的平方根成正比
- 归一化探测率**D***，即

$$D^* = \frac{1}{NEP^*} = D \cdot (A_d \Delta f)^{1/2}$$

- **D***与探测器的敏感面积、放大器的带宽无关。

三、量子效率 η (λ)

- 量子效率：在某一特定波长上，每秒钟内产生的光电子数与入射光量子数之比。
- 对理想的探测器，入射一个光量子发射一个电子， $\eta=1$
- 实际上， $\eta < 1$
- 量子效率是一个微观参数，量子效率愈高愈好。

量子效率与响应度的关系

$$\eta(\lambda) = \frac{I / q}{P / h\nu} = \frac{S(\lambda)}{q} h\nu$$

I/q : 每秒产生的光子数

$P/h\nu$: 每秒入射的光子数

四、线性度

- 线性度是描述光电探测器输出信号与输入信号保持线性关系的程度。
- 在某一范围内探测器的响应度是常数，称这个范围为线性区。
- 非线性误差：

$$\delta = \Delta_{\max} / (I_2 - I_1)$$

Δ_{\max} ：实际响应曲线与拟合曲线之间的最大偏差； I_2 和 I_1 ：分别为线性区中最小和最大响应值。

五、工作温度

- 工作温度就是指光电探测器最佳工作状态时的温度。
- 光电探测器在不同温度下，性能有变化。
例如，半导体光电器件的长波限和峰值波长会随温度而变化；热电器件的响应度和热噪声会随温度而变化。

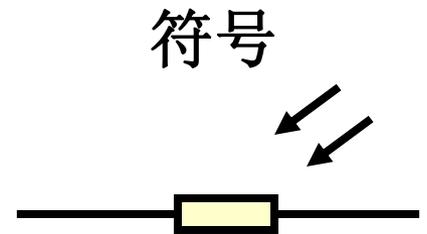
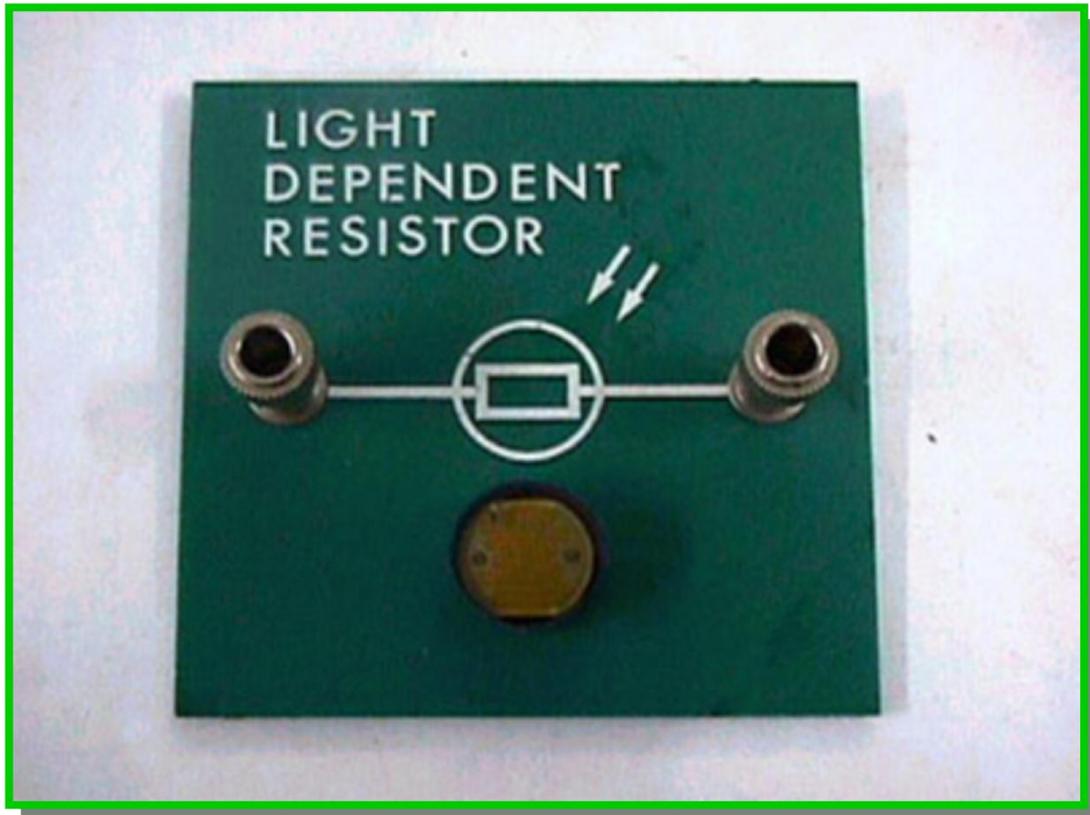
7.3 半导体光电器件

- 光敏电阻
- 光电池
- 光电二极管
- 光电三极管

一、光敏电阻

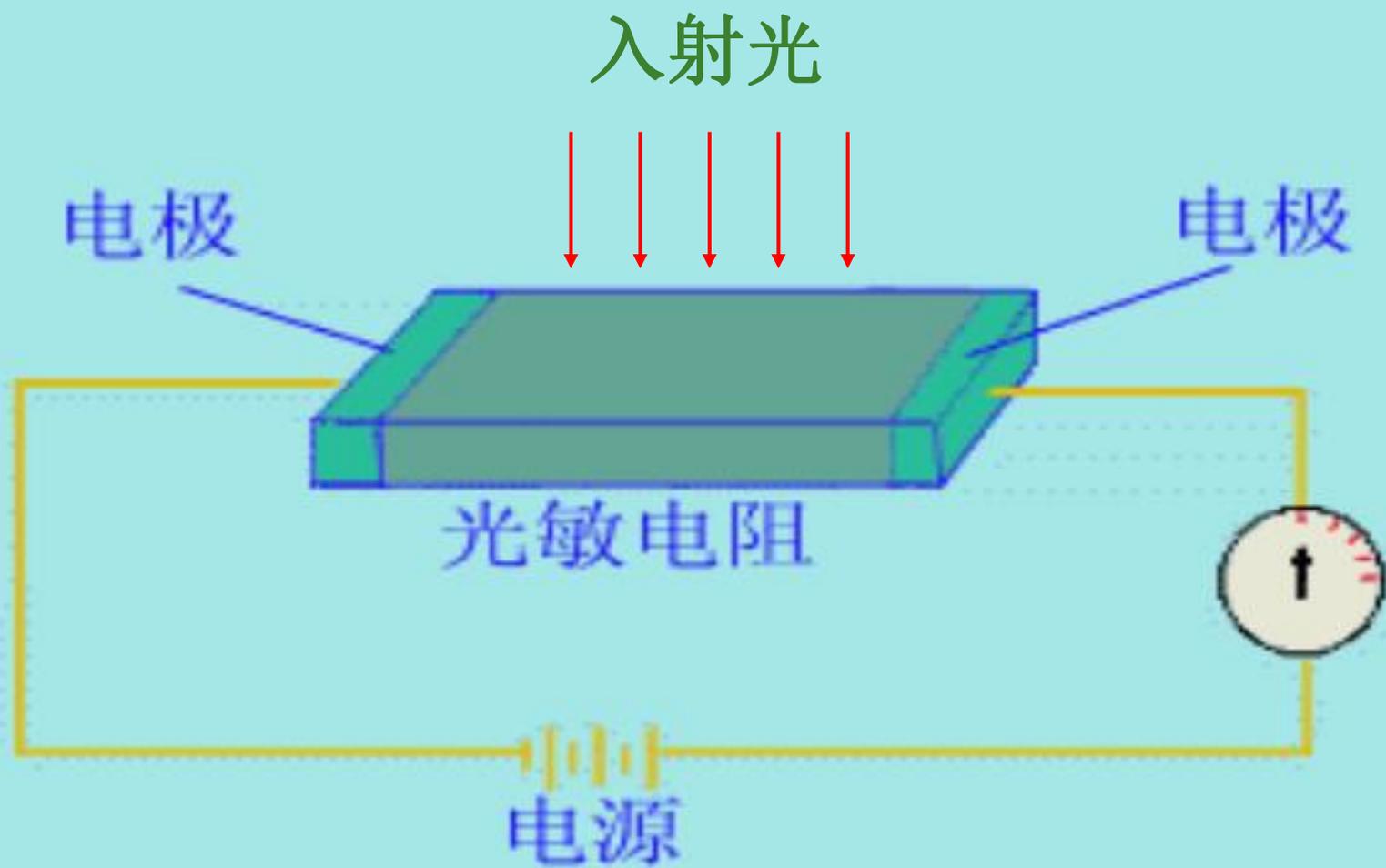
- 光敏电阻是光电导型器件。
- 光敏电阻材料：主要是硅、锗和化合物半导体，例如：硫化镉（CdS），锑化铟（InSb）等。
- 特点：
 - 光谱响应范围宽（特别是对于红光和红外辐射）；
 - 偏置电压低，工作电流大；
 - 动态范围宽，既可测强光，也可测弱光；
 - 光电导增益大，灵敏度高；
 - 无极性，使用方便；
 - 在强光照射下，光电线性度较差
 - 光电驰豫时间较长，频率特性较差。

- 光敏电阻 (LDR) 和它的符号:



1. 光敏电阻的工作原理

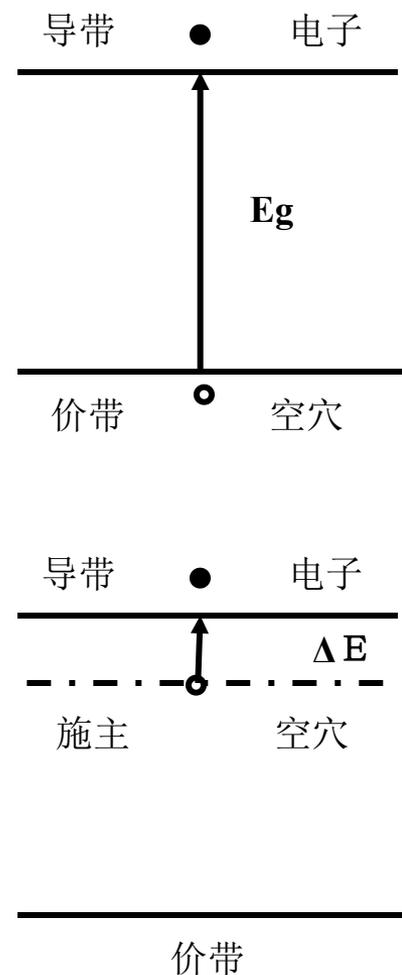
- **光敏电阻结构**：在一块均匀光电导体两端加上电极，贴在硬质玻璃、云母、高频瓷或其他绝缘材料基板上，两端接有电极引线，封装在带有窗口的金属或塑料外壳内。（[如图](#)）
- **工作机理**：当入射光子使半导体中的电子由价带跃迁到导带时，导带中的电子和价带中的空穴均参与导电，其阻值急剧减小，电导增加。



光敏电阻工作原理图

本征型和杂质型光敏电阻

- **本征型光敏电阻**：当入射光子的能量等于或大于半导体材料的禁带宽度 E_g 时，激发一个电子-空穴对，在外电场的作用下，形成光电流。
- **杂质型光敏电阻**：对于N型半导体，当入射光子的能量等于或大于杂质电离能 ΔE 时，将施主能级上的电子激发到导带而成为导电电子，在外电场的作用下，形成光电流。
- 本征型用于可见光长波段,杂质型用于红外波段。



光电导与光电流

- 光敏电阻两端加电压（直流或交流）。无光照时，阻值（暗电阻）很大，电流（暗电流）很小；光照时，光生载流子迅速增加，阻值（亮电阻）急剧减少。在外场作用下，光生载流子沿一定方向运动，形成光电流（亮电流）。

- 光电流：亮电流和暗电流之差；

$$I_{\text{光}} = I_{\text{L}} - I_{\text{d}}$$

- 光电导：亮电流和暗电流之差；

$$g = g_{\text{L}} - g_{\text{d}}$$

- 光敏电阻的暗阻越大越好，而亮阻越小越好，也就是说暗电流要小，亮电流要大，这样光敏电阻的灵敏度就高。
- 光电流与光照强度 / 电阻结构的关系。

- 无光照，暗电导率

$$\sigma_0 = n_0 q \mu_n + p_0 q \mu_p$$

- 光照下电导率

$$\sigma = n q \mu_n + p q \mu_p$$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

- 附加光电导率,简称光电导

$$\Delta\sigma = \Delta nq\mu_n + \Delta pq\mu_p$$

- 光电导相对值

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p}{n_0\mu_n + p_0\mu_p} = \frac{\Delta n(\mu_n + \mu_p)}{n_0\mu_n + p_0\mu_p}$$

- 要制成附加光电导相对值高的光敏电阻应使 p_0 和 n_0 小,因此光敏电阻一般采用禁带宽度大的材料或在低温下使用。

- 当光照稳定时，光生载流子的浓度为

$$\Delta n_0 = \Delta p_0 = g\tau$$

- 无光照时，光敏电阻的暗电流为

$$I_d = \frac{U\sigma_0 A}{L} = \frac{qUA(n_0\mu_n + p_0\mu_p)}{L}$$

- 光照时，光敏电阻的光电流为

$$I_p = \frac{U\Delta\sigma A}{L} = \frac{qUA(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)}{L}$$

2. 光敏电阻的工作特性

- 光电特性
- 伏安特性
- 时间响应和频率特性
- 温度特性

光敏电阻的光电特性

- 光电特性：光电流与入射光照度的关系：

$$I_{\text{光}} = S_g E^\gamma U^\alpha$$

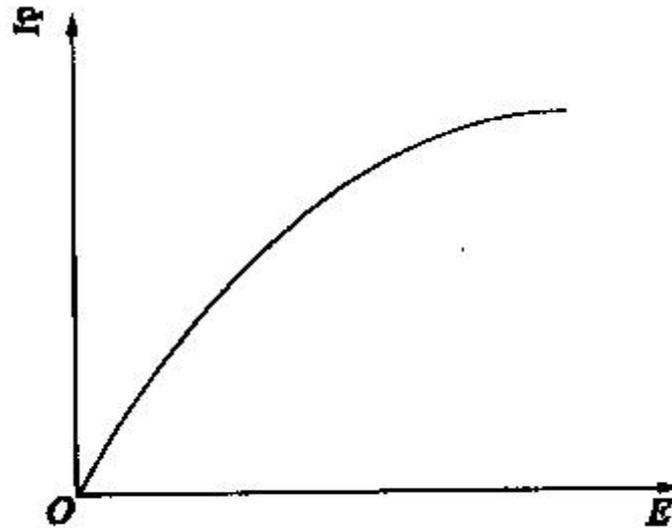
γ :照度指数(0.5-1), S_g :光电导,

α :电压指数(欧姆接触为1), U :外加电压

(1)弱光时, $\gamma=1$, 光电流与照度成线性关系

(2)强光时, $\gamma=0.5$, 光电流与照度成抛物线

光照增强的同时, 载流子浓度不断的增加, 同时光敏电阻的温度也在升高, 从而导致载流子运动加剧, 因此复合几率也增大, 光电流呈饱和趋势。(冷却可以改善)



硫化镉光敏电阻的光电特性曲线

在弱光照下，光电流与 E 具有良好的线性关系

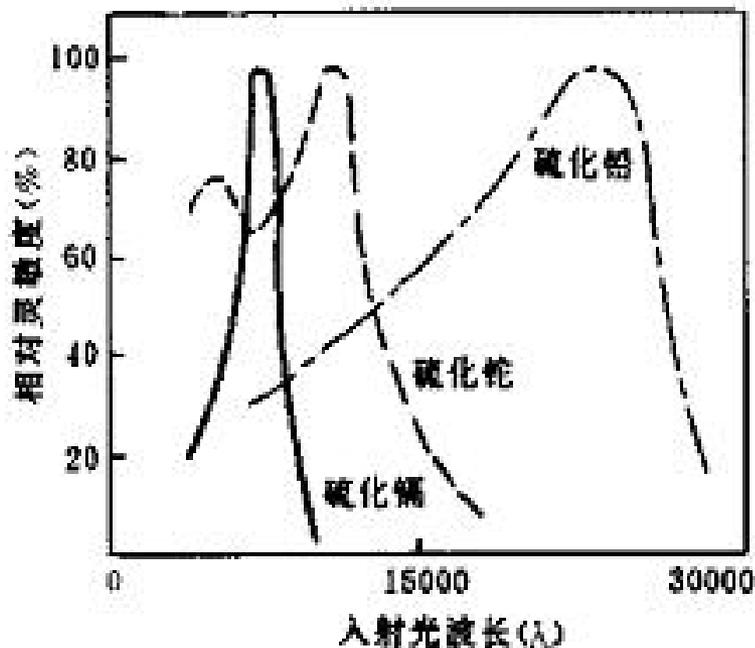
在强光照下则为非线性关系

其他光敏电阻也有类似的性质。

- 光电导灵敏度: 光电导 g 与照度 E 之比.

$$S_g = \frac{g}{E} = \frac{g \cdot A}{\Phi}$$

A : 光敏面积, Φ : 入射通量



不同波长的光, 光敏电阻的灵敏度是不同的。在选用光电器件时必须充分考虑到这种特性。

光敏电阻的光谱特性

- 光电导增益

$$G = \beta\tau\mu \frac{U}{l^2}$$

β : 量子产额, τ : 载流子寿命,

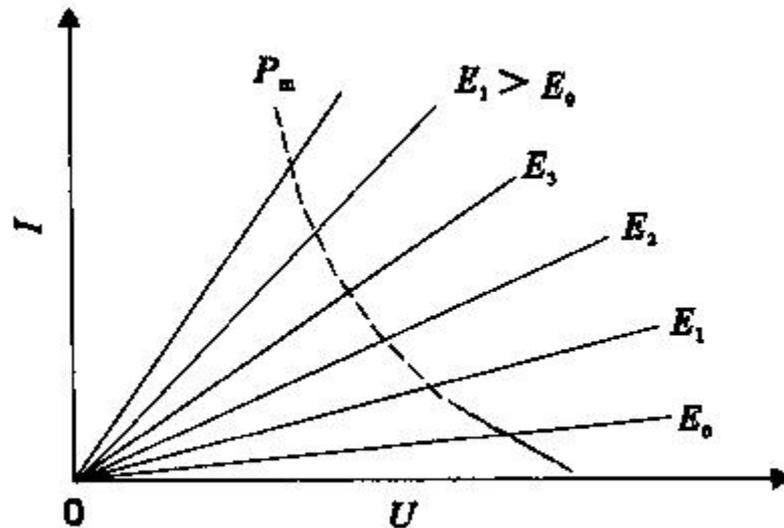
μ : 迁移率, U : 外加电压,

l : 电极间距
光电导增益反比于电极间距的平方。

- 量子效率: 光电流与入射光子流之比。

伏安特性

- 在一定的光照下，光敏电阻的光电流与所加的电压关系
- 光敏电阻是一个纯电阻，因此符合欧姆定律，其伏安特性曲线为直线。
- 不同光照度对应不同直线



光敏电阻的伏安特性曲线

➤受耗散功率的限制，在使用时，光敏电阻两端的电压不能

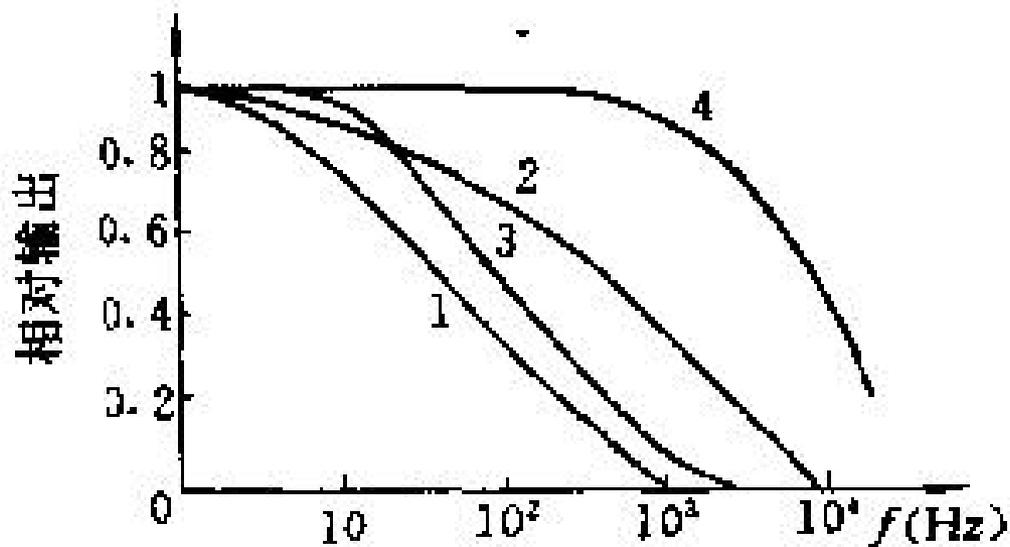
超过最高工作电压，

➤图中虚线为允许功耗曲线

➤由此可确定光敏电阻正常工作电压。

频率特性

- 光敏电阻时间常数比较大，其上限截止频率低。只有PbS光敏电阻的频率特性稍好些，可工作到几千赫。



响应时间

- 光敏电阻的时间响应特性较差
- 材料受光照到稳定状态，光生载流子浓度的变化规律：

$$\Delta p = \Delta p_0 (1 - \exp(-\frac{t}{\tau}))$$

Δp_0 为稳态光生载流子浓度

- 停止光照，光生载流子浓度的变化为

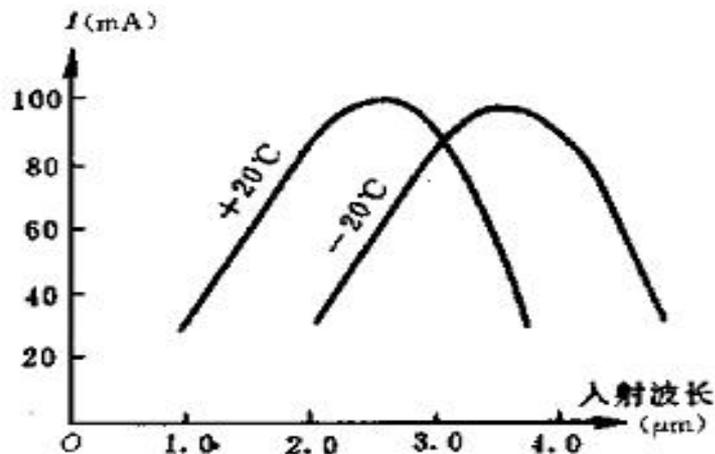
$$\Delta p = \Delta p_0 \exp(-\frac{t}{\tau})$$

温度特性

光敏电阻是多数载流子导电，温度特性复杂。随着温度的升高，光敏电阻的暗电阻和灵敏度都要下降，温度的变化也会影响光谱特性曲线。

例如：硫化铅光敏电阻，随着温度的升高光谱响应的峰值将向短波方向移动。

尤其是红外探测器要采取制冷措施



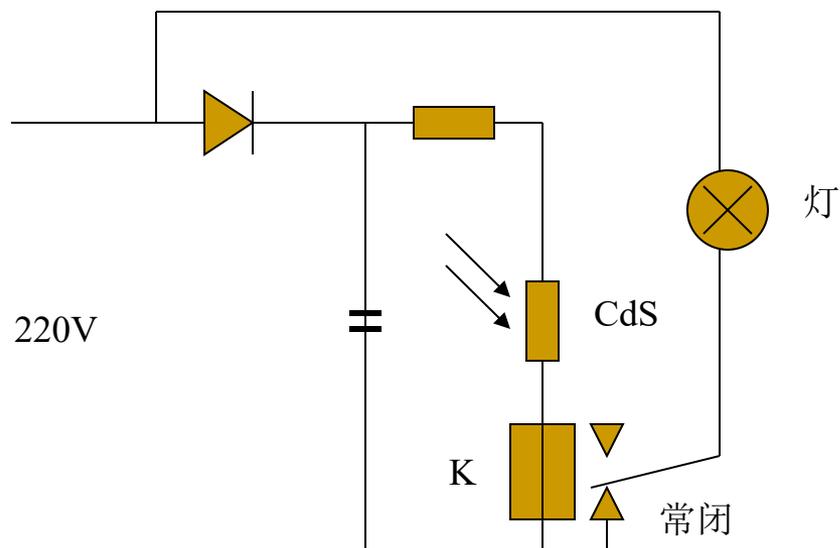
硫化铅光敏电阻的光谱温度特性

光敏电阻参数

- 使用材料: 硫化镉 (CdS), 硫化铅 (PbS), 铟化铟 (InSb), 碲镉汞 (HgCdTe), 碲锡铅 (PbSnTe) .
- 光敏面: 1-3 mm
- 工作温度: -40 – 80 °C
- 温度系数: 1
- 极限电压: 10[±]– 300V
- 耗散功率: < 100 W
- 时间常数: 5 – 50 ms
- 光谱峰值波长: 因材料而不同, 在可见/红外远红外
- 暗电阻: 10⁸ 欧姆
- 亮电阻: 10⁴ 欧姆

光敏电阻的应用

- 基本功能：根据自然光的情况决定是否开灯。
- 基本结构：整流滤波电路；光敏电阻及继电器控制；触电开关执行电路
- 基本原理：光暗时，光敏电阻阻值很高，继电器关，灯亮；光亮时，光敏电阻阻值降低，继电器工作，灯关。



照明灯自动控制电路

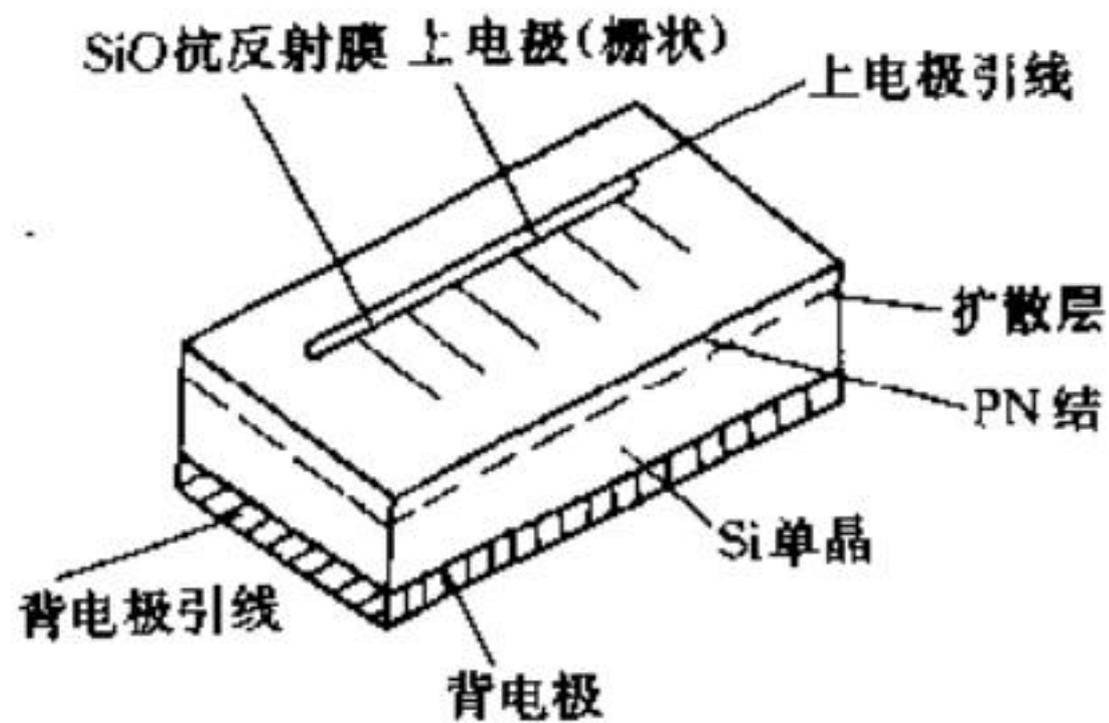
光电池

- 光电池是根据光生伏特效应制成的将光能转换成电能的一种器件。
- **PN结的光生伏特效应**：当用适当波长的光照射**PN结**时，由于内建场的作用（不加外电场），光生电子拉向**n区**，光生空穴拉向**p区**，相当于**PN结**上加一个正电压。
- 半导体内部产生电动势（光生电压）；如将**PN结**短路，则会出现电流（光生电流）。

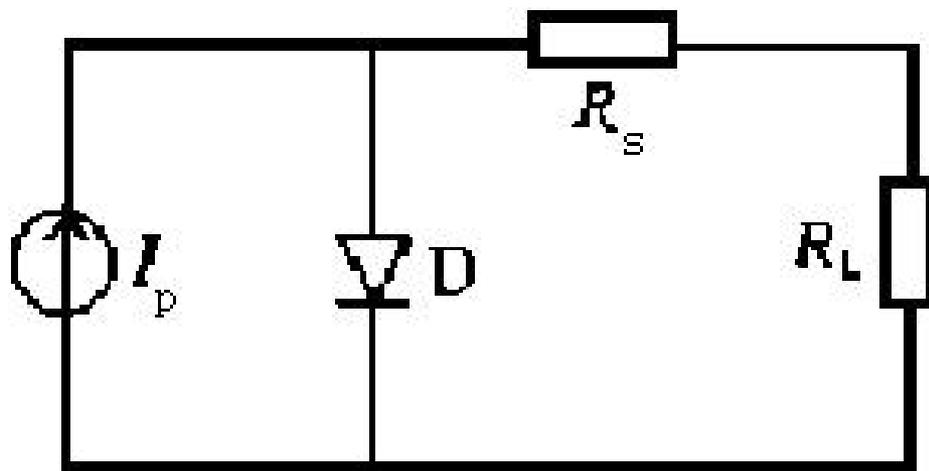
光电池的结构特点

- 光电池核心部分是一个**PN**结，一般作成面积大的薄片状，来接收更多的入射光。
- 在**N**型硅片上扩散**P**型杂质（如硼），
受光面是**P**型层
- 或在**P**型硅片上扩散**N**型杂质（如磷），
受光面是**N**型层

-
- 受光面有二氧化硅抗反射膜，起到增透作用和保护作用
 - 上电极做成栅状，为了更多的光入射
 - 由于光子入射深度有限，为使光照到**PN**结上，实际使用的光电池制成薄**P**型或薄**N**型。
-



光电池等效电路



$$I_L = I_p - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q}{kT} (U - I_L R_s)\right] - 1 \right\}$$

I_p 为光电池等效电路中的恒流源

I_0 为光电池等效二极管反向饱和电流,

q 为电子电荷量

U 为光电池输出电压

R_s 为光电池等效电路中串联电阻, R_s 很小, 可以忽略

$$I_L = I_p - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right]$$

当 $I = 0$ ，得到开路电压

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right)$$

当 $U = 0$ ，得到短路电流

$$I_{sc} = I_p$$

I_{sc} 与入射光强度成正比

开路电压与入射光强度的对数成正比

光电池的特性

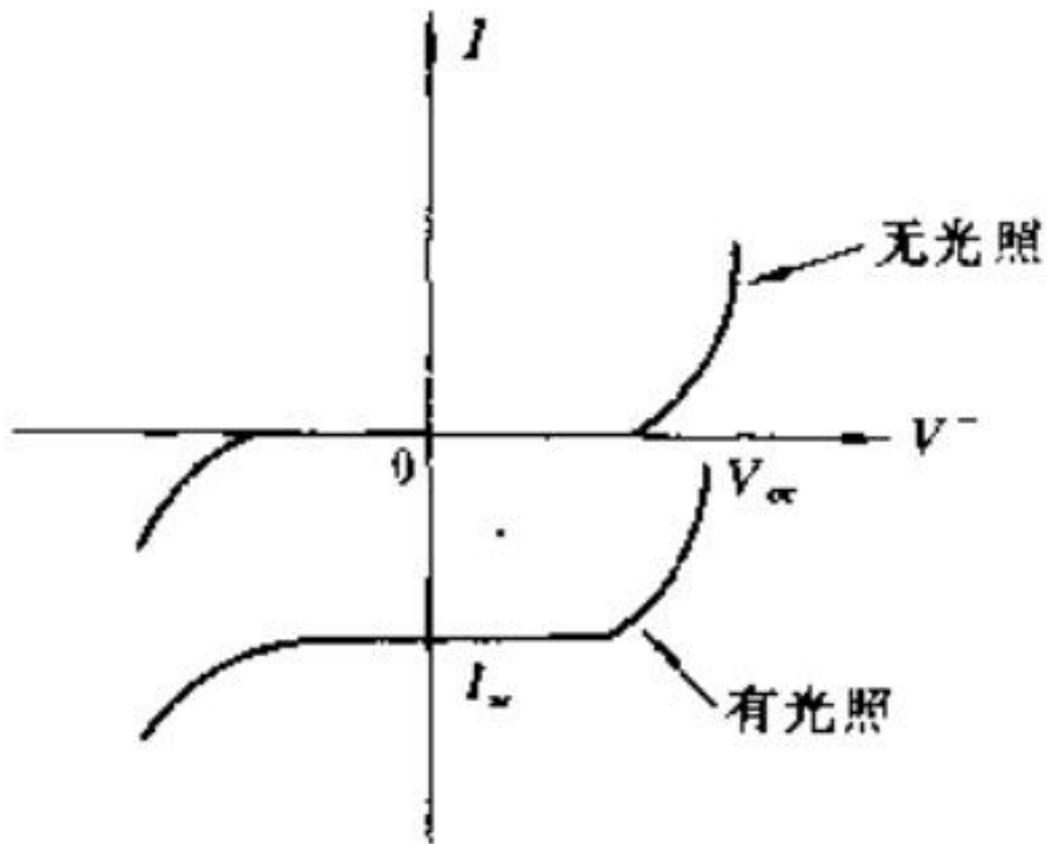
■ 1、伏安特性

无光照时，光电池伏安特性曲线与普通半导体二极管相同。

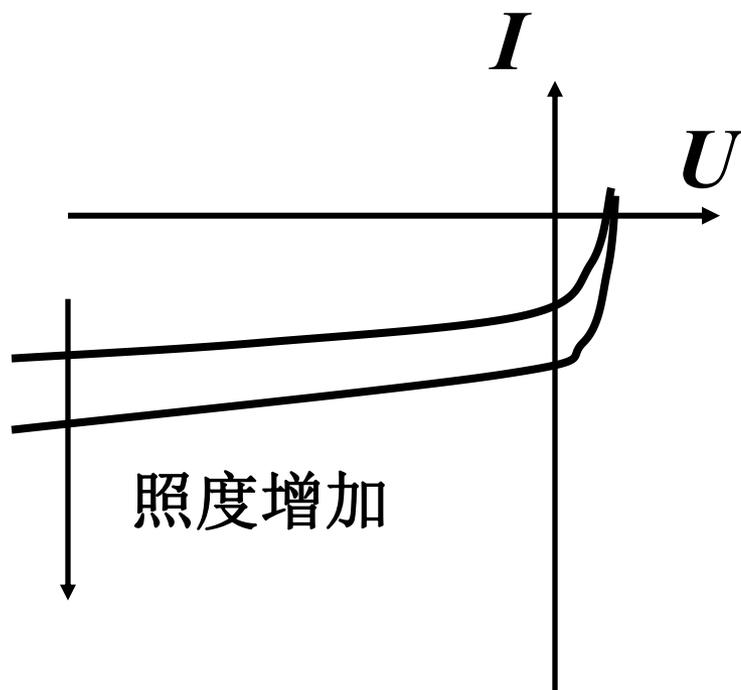
有光照时，沿电流轴方向平移，平移幅度与光照度成正比。

曲线与电压轴交点称为开路电压 V_{oc} ，与电流轴交点称为短路电流 I_{sc} 。

光电池伏安特性曲线



反向电流随光照度的增加而上升

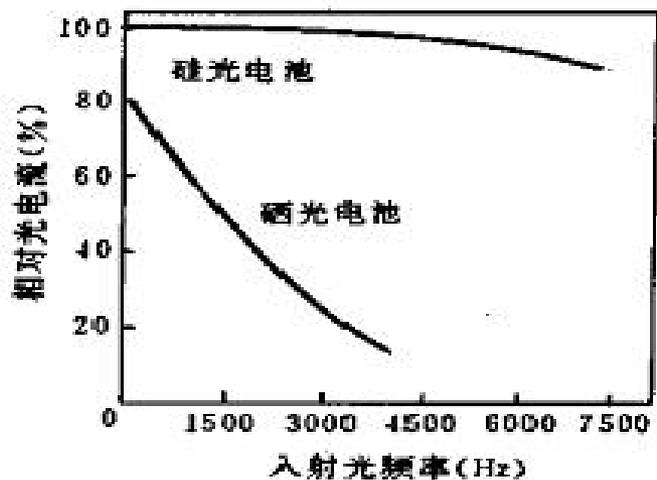


2、时间和频率响应

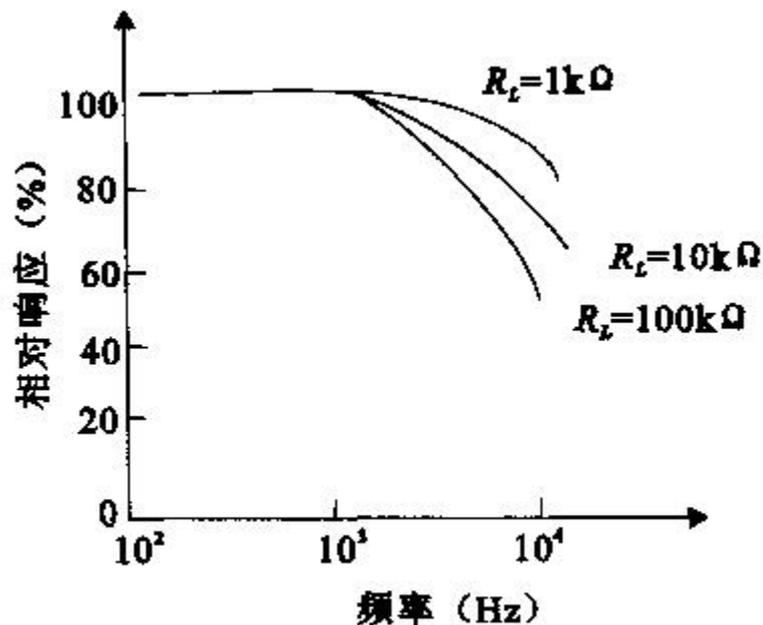
硅光电池频率特性好

硒光电池频率特性差

硅光电池是目前使用最广泛的光电池



光电池的频率特性



硅光电池的频率特性

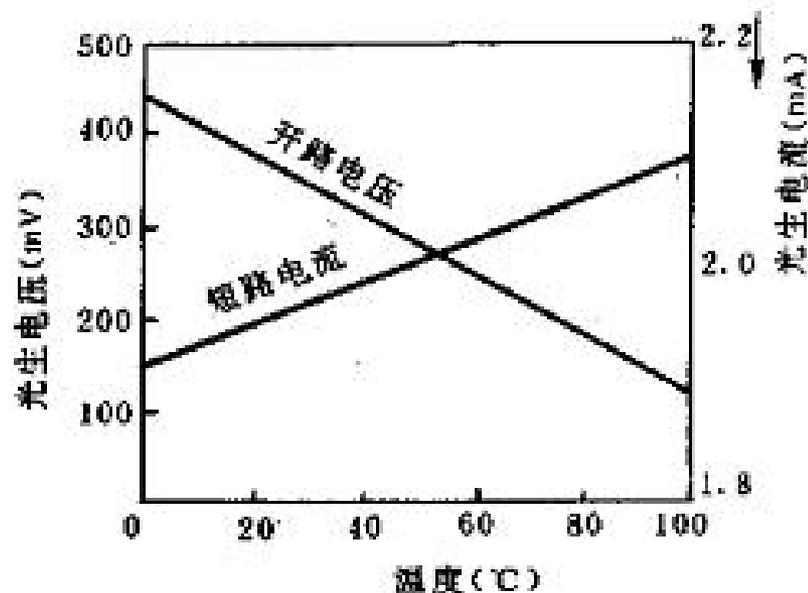
国内生产的几种 2CR 型硅光电池时间响应

型号	面积	负载 $R_L = 100\Omega$		负载 $R_L = 500\Omega$		负载 $R_L = 1k\Omega$	
	mm ²	$t_r (\mu s)$	$t_f (\mu s)$	$t_r (\mu s)$	$t_f (\mu s)$	$t_r (\mu s)$	$t_f (\mu s)$
2CR21	5×5	15	15	20	20	25	25
2CR41	10×10	15	17	35	40	60	70
2CR51	10×20	30	40	60	80	150	150

- 要得到短的响应时间，必须选用小的负载电阻 R_L ；
- 光电池面积越大则响应时间越大，因为光电池面积越大则结电容 C_j 越大，在给定负载时，时间常数就越大，故要求短的响应时间，必须选用小面积光电池。

■3、温度特性

随着温度的上升，硅光电池的 spectra 响应向长波方向移动，开路电压下降，短路电流上升。光电池做探测器件时，测量仪器应考虑温度的漂移，要进行补偿。



开路电压下降大约2~3mV/度

短路电流上升大约 10^{-5} ~ 10^{-3} mA/度

光电池的温度特性

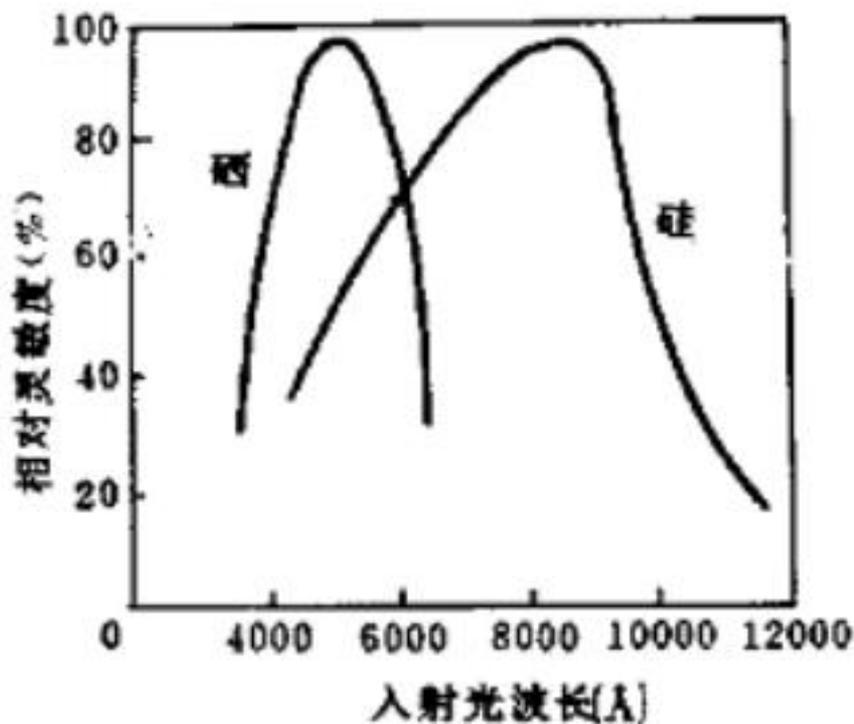
4、光谱响应度

- 硅光电池

响应波长0.4-1.1微米，
峰值波长0.8-0.9微米。

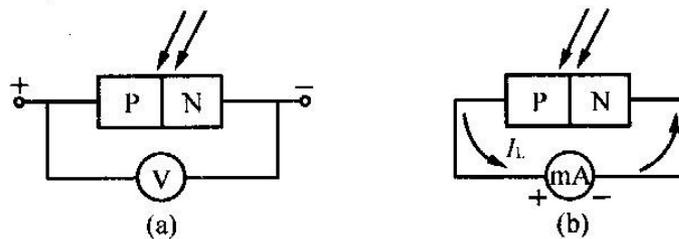
- 硒光电池

响应波长0.34-0.75微米
峰值波长0.54微米。



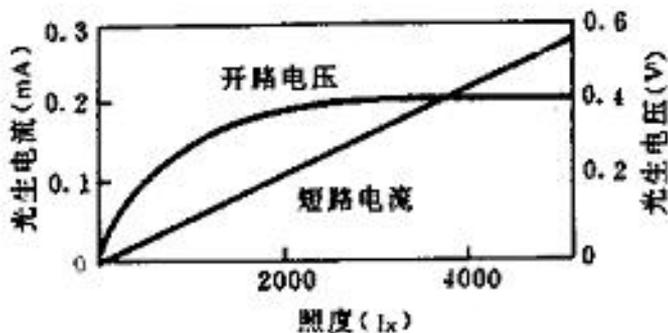
5、光电池的日照特性

- 连接方式：开路电压输出---(a)
短路电流输出---(b)



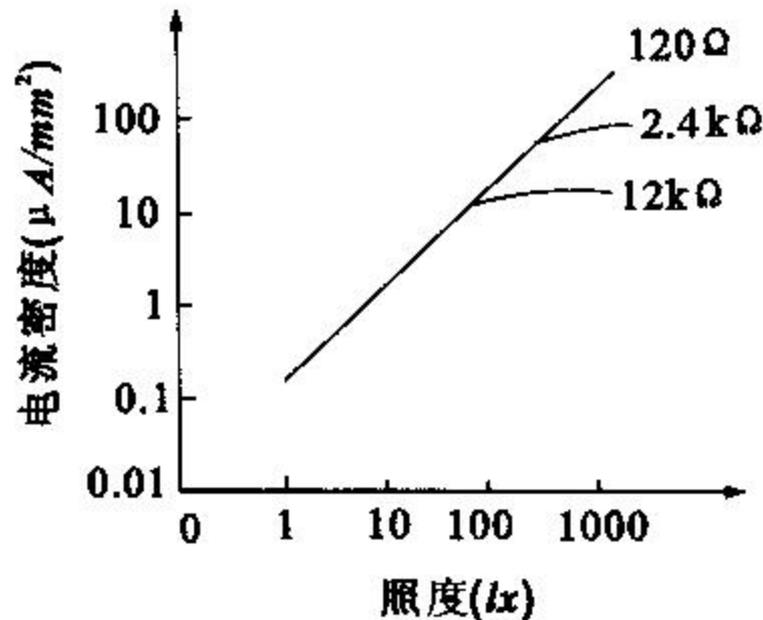
- 光电池在不同的光强照射下可产生不同的光电流和光生电动势。
- 短路电流在很大范围内与光强成线性关系。
- 开路电压随光强变化是非线性的，并且当照度在 **2000lx** 时趋于饱和。

- 光照特性---
- 开路电压输出：非线性(电压---光强)，灵敏度高
- 短路电流输出：线性好(电流---光强)，灵敏度低
- 开关测量（开路电压输出），线性检测（短路电流输出）



硅光电池的光照特性

- 负载 R_L 的增大线性范围也越来越小。
- 因此，在要求输出电流与光照度成线性关系时，负载电阻在条件许可的情况下越小越好，并限制在适当的光照范围内使用。



硅光电池光照与负载特性

光电池的应用

■ 1、光电探测器件

利用光电池做探测器有频率响应高，光电流随光照度线性变化等特点。

■ 2、将太阳能转化为电能

实际应用中，把硅光电池经串联、并联组成电池组。

硅太阳能电池

- 硅太阳能电池包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、非晶硅太阳能电池。
- 单晶硅太阳能电池在实验室里最高的转换效率为23%，而规模生产的单晶硅太阳能电池，其效率为15%。
- 多晶硅半导体材料的价格比较低廉，但是由于它存在着较多的晶粒间界而有较多的弱点。多晶硅太阳能电池的实验室最高转换效率为18%，工业规模生产的转换效率为10%。

非晶硅太阳能电池

- 非晶硅薄膜太阳能电池组件的制造采用薄膜工艺, 具有较多的优点, 例如: 沉积温度低、衬底材料价格较低廉, 能够实现大面积沉积。
- 非晶硅的可见光吸收系数比单晶硅大, 是单晶硅的**40**倍, 1微米厚的非晶硅薄膜, 可以吸引大约**90%**有用的太阳光能。
- 非晶硅太阳能电池的稳定性较差, 从而影响了它的迅速发展。

化合物太阳能电池

- 三五族化合物电池和二六族化合物电池。
- 三五族化合物电池主要有**GaAs**电池、**InP**电池、**GaSb**电池等；
- 二六族化合物电池主要有**CaS/CuInSe**电池、**CaS/CdTe**电池等。
- 在三五族化合物太阳能电池中,**GaAs**电池的转换效率最高,可达**28%**;

GaAs 化合物太阳能电池

- **Ga**是其它产品的副产品,非常稀少珍贵;**As** 不是稀有元素,有毒。
- **GaAs**化合物材料尤其适用于制造高效电池和多结电池,这是由于**GaAs**具有十分理想的光学带隙以及较高的吸收效率。
- **GaAs** 化合物太阳能电池虽然具有诸多优点,但是**GaAs**材料的价格不菲,因而在很大程度上限制了用**GaAs**电池的普及。

太阳能

- 太阳能特点：

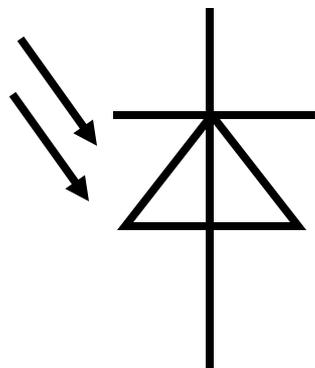
①无枯竭危险；②绝对干净；③不受资源分布地域的限制；④可在用电处就近发电；⑤能源质量高；⑥使用者从感情上容易接受；⑦获取能源花费的时间短。

- 要使太阳能发电真正达到实用水平，一是要提高太阳能光电变换效率并降低成本；二是要实现太阳能发电同现在的电网联网。

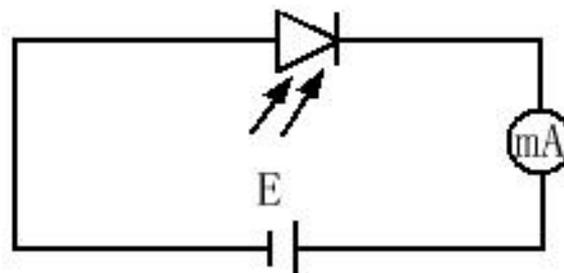
光敏二极管结构

- 光敏二极管与普通二极管一样有一个**PN**结，属于单向导电性的非线性元件。外形不同之处是在光电二极管的外壳上有一个透明的窗口以接收光线照射，实现光电转换。
- 为了获得尽可能大的光生电流，需要较大的工作面，即**PN**结面积比普通二极管大得多，以扩散层作为它的受光面。
- 为了提高光电转换能力，**PN**结的深度较普通二极管浅。

光电二极管（光敏二极管）



光敏二极管符号

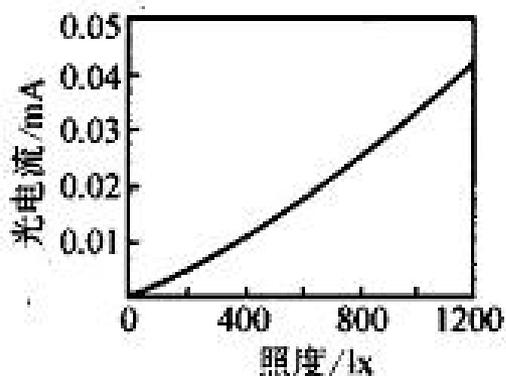


光敏二极管接法

外加反向偏压

- 可以不加偏压，与光电池不同，光敏二极管一般在负偏压情况下使用
- 大反偏压的施加，增加了耗尽层的宽度和结电场，电子—空穴在耗尽层复合机会少，提高光敏二极管的灵敏度。
- 增加了耗尽层的宽度，结电容减小，提高器件的频响特性。
- 但是，为了提高灵敏度及频响特性，却不能无限地加大反向偏压，因为它还受到PN结反向击穿电压等因素的限制。

- 光敏二极管体积小，灵敏度高，响应时间短，光谱响应在可见到近红外区中，光电检测中应用多。



- 扩散型P-i-N硅光敏二极管和雪崩光敏二极管



扩散型P-i-N硅光敏二极管

- 选择一定厚度的i层，具有高速响应特性。
- i层所起的作用:(1)为了取得较大的PN结击穿电压，必须选择高电阻率的基体材料，这样势必增加了串联电阻，使时间常数增大，影响管子的频率响应。
- 而i层的存在，使击穿电压不再受到基体材料的限制，从而可选择低电阻率的基体材料。这样不但提高了击穿电压，还减少了串联电阻和时间常数。
- (2)反偏下，耗尽层较无i层时要大得多，从而使结电容下降，提高了频率响应。

PIN管的最大特点是

频带宽，可达10GHz。

另一特点是线性输出范围宽。

缺点：

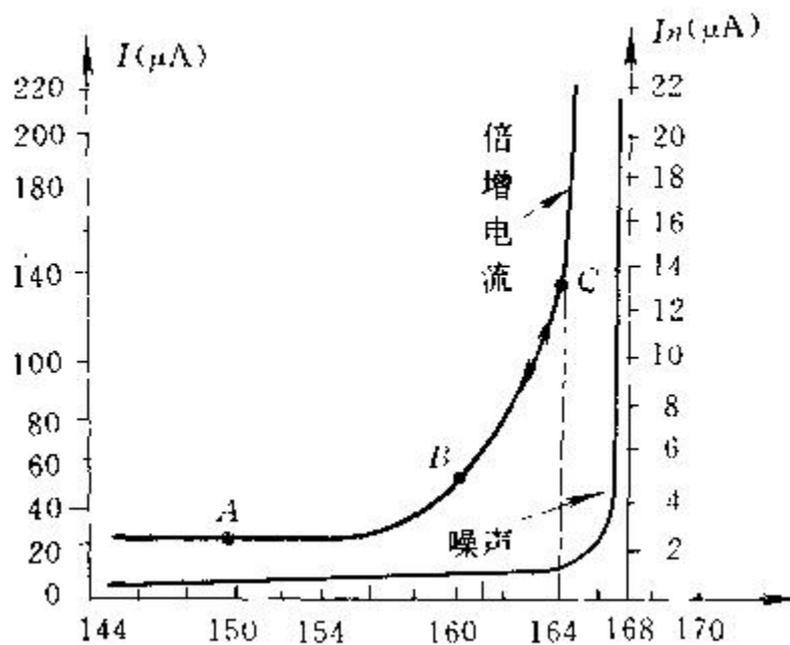
由于I层的存在，管子的输出电流小，一般多为零点几微安至数微安。

雪崩光敏二极管

- 由于存在因碰撞电离引起的内增益机理，雪崩管具有高的增益带宽乘积和极快的时间响应特性。
- 通过一定的工艺可以使它在**1.06**微米波长处的量子效率达到**30%**，非常适于可见光及近红外区域的应用。

- 当光敏二极管的**PN**结上加相当大的反向偏压时，在结区产生一个很高的电场，使进入场区的光生载流子获得足够的能量，通过碰撞使晶格原子电离，而产生新的电子—空穴对。
- 新的电子—空穴对在强电场的作用下分别向相反方向运动。在运动过程中，又有可能与原子碰撞再一次产生电子—空穴对。
- 只要电场足够强，此过程就将继续下去，达到载流子的雪崩倍增。通常，雪崩光敏二极管的反向工作偏压略低于击穿电压。

雪崩光电二极管的 倍增电流、噪声与偏压的关系曲线



- 在偏置电压较低时的**A**点以左，不发生雪崩过程；随着偏压的逐渐升高，倍增电流逐渐增加
- 从**B**点到**c**点增加很快，属于雪崩倍增区；偏压再继续增大，将发生雪崩击穿；同时噪声
- 也显著增加，如图中**c**点以有的区域。因此，最佳的偏压工作区是**c**点以左，否则进入雪崩击穿区烧坏管子。
- 由于击穿电压会随温度漂移，必须根据环境温度变化相应调整工作电压。

- 雪崩光电二极管具有电流增益大，灵敏度高，频率响应快，带宽可达**100GHz**。是目前响应最快的一种光敏二极管。
- 不需要后续庞大的放大电路等特点。因此它在微弱辐射信号的探测方向被广泛地应用。
- 在设计雪崩光敏二极管时，要保证载流子在整个光敏区的均匀倍增，这就需要选择无缺陷的材料，必须保持更高的工艺和保证结面的平整。
- 其缺点是工艺要求高，稳定性差，受温度影响大。

雪崩光电二极管与光电倍增管比较

- 体积小
- 结构紧凑
- 工作电压低
- 使用方便
- 但其暗电流比光电倍增管的暗电流大，相应的噪声也较大
- 故光电倍增管更适宜于弱光探测

光敏二极管阵列

- 将光敏二极管以线列或面阵形式集合在一起，用来同时探测被测物体各部位提供的不同光信息，并将这些信息转换为电信号的器件。



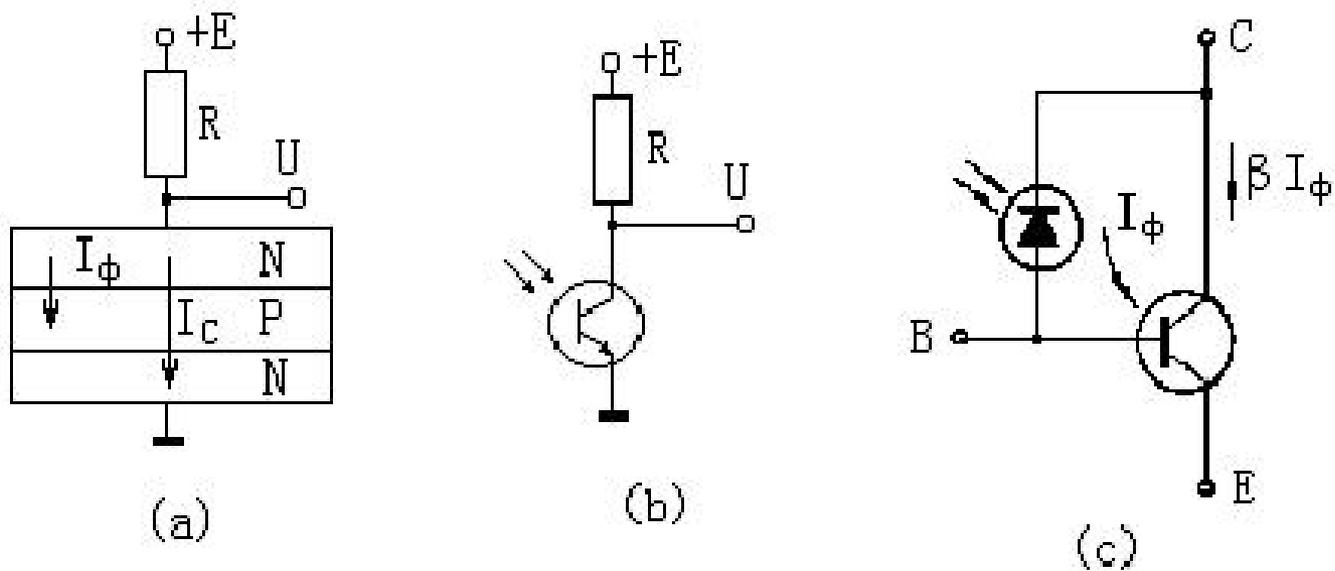
象限探测器

- 象限探测器有二象限和四象限探测器，又分光电二极管象限探测器和硅光电池象限探测器。
- 象限探测器是在同一块芯片上制成两或四个探测器，中间有沟道将它们隔开，因而这两或四个探测器有完全相同性能参数。
- 当被测体位置发生变化时，来自目标的辐射量使象限间产生差异，这种差异会引起象限间信号输出变化，从而确定目标方位，同时可起制导、跟踪、搜索、定位等作用。

光敏三极管（光电三极管）

- 光电三极管是由光电二极管和一个晶体三极管构成，相当于在晶体三极管的基极和集电极间并联一个光电二极管。
- 同光电二极管一样，光电三极管外壳也有一个透明窗口，以接收光线照射。
- 日前用得较多的是NPN和PNP两种平面硅光电三极管。

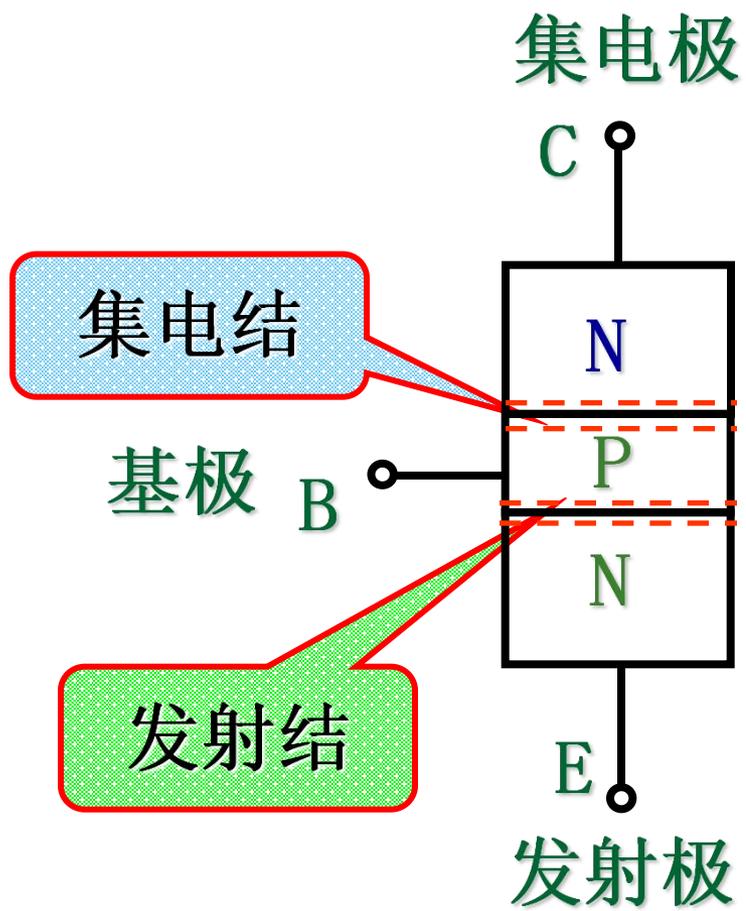
NPN光电三极管结构原理简图



光敏三极管原理和结构

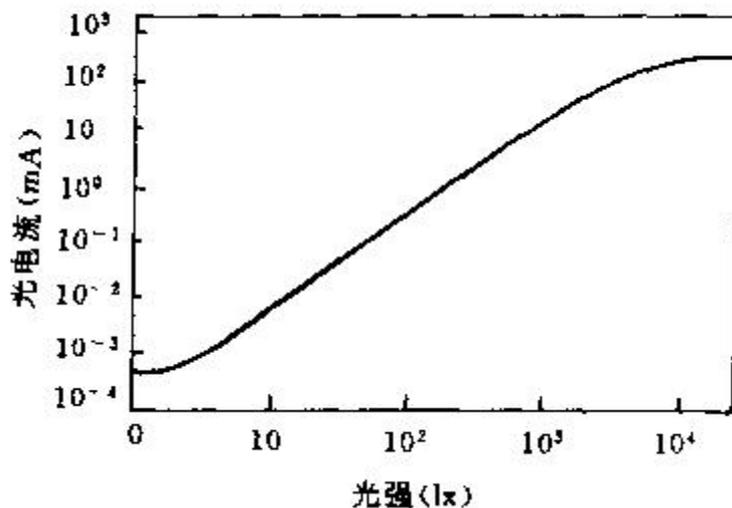
光电三极管工作原理

- **NPN**光电三极管（**3DU**型），使用时光电二极管的发射极接电源负极，集电极接电源正极。
- 光电三极管不受光时，相当于普通三极管基极开路的状态。集电结(基—集结)处于反向偏置，基极电流等于**0**，因而集电极电流很小，为光电三极管的暗电流。
- 当光子入射到集电结时，就会被吸收而产生电子—空穴对，处于反向偏置的集电结内建电场使电子漂移到集电极，空穴漂移到基极，形成光生电压，基极电位升高。



- 如同普通三极管的发射结(基—发结)加上了正向偏置，当基极没有引线时，集电极电流就等于发射极电流。
- 这样晶体三极管起到电流放大的作用。
- 由于光敏三极管基极电流是由光电流供给，因此一般基极不需外接点，所以通常只有集电极和发射极两个引脚线。

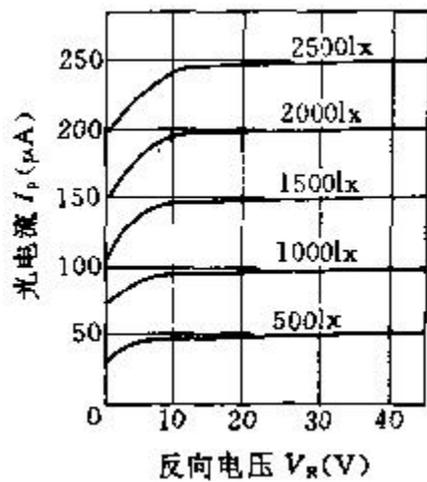
- 光电三极管与光电二极管相比，具有较高的输出光电流，但线性差
- 线性差主要是由电流放大倍数 β 的非线性所致
- 在大照度时，光敏三极管不能作线性转换元件，但可以作开关元件使用。



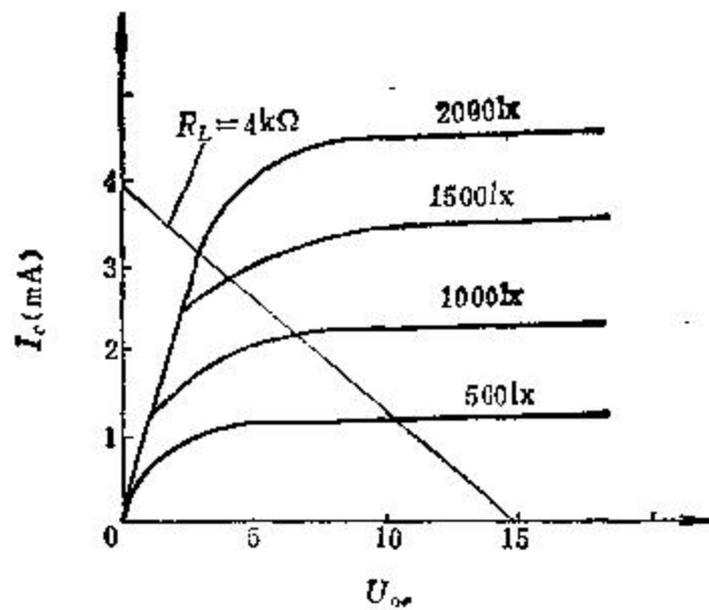
光电三极管的光照特性

光敏三极管的伏安特性

- 硅光电三极管的光电流在毫安量级，硅光电二极管的光电流在微安量级。
- 在零偏压时硅光电三极管没有光电流输出，但硅光电二极管有光电流输出。
- 工作电压较低时输出电流有非线性，硅光电三极管的非线性更严重。（因为放大倍数与工作电压有关）
- 在一定的偏压下，硅光电三极管的伏安曲线在低照度时间间隔较均匀，在高照度时曲线越来越密



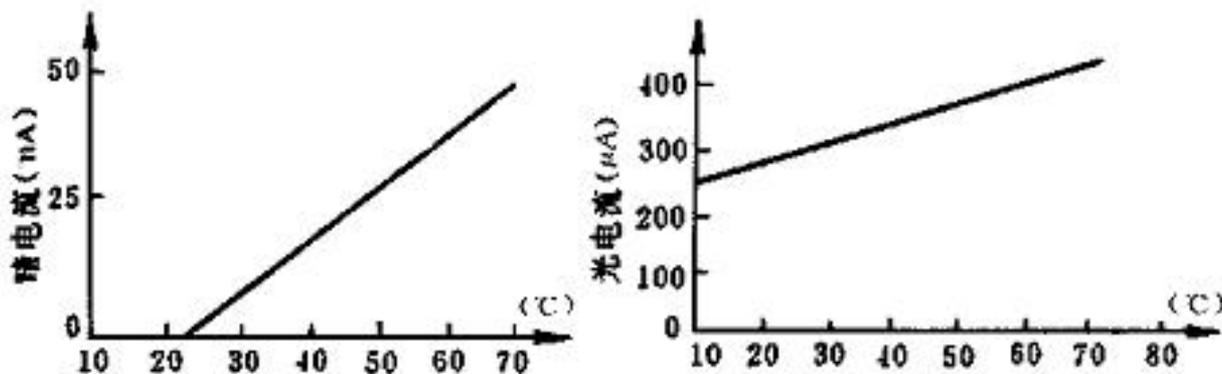
硅光电二极管



硅光电三极管

光敏三极管的温度特性

- 温度特性反映了光敏三极管的暗电流及光电流与温度的关系。
- 温度变化对光电流和暗电流都有影响，对暗电流的影响更大。
- 精密测量时，应采取温度补偿措施，否则将会导致输出误差。
- 光电三极管的光电流和暗电流受温度影响比光电二极管大得多



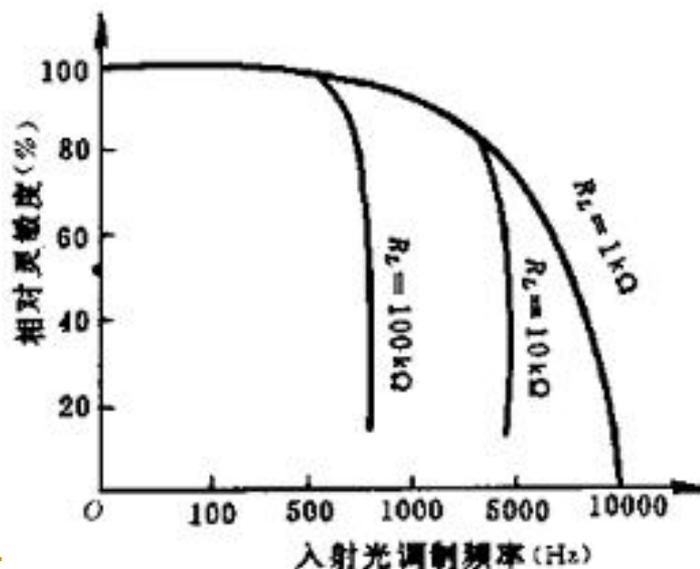
温度特性

光敏三极管的（调制）频率特性

光敏三极管的频率特性受负载电阻的影响，减小负载电阻可以提高频率响应。

一般来说，光敏三极管的频率响应比光敏二极管差。

对于锗管，入射光的调制频率要求在5000Hz以下，硅管的频率响应要比锗管好。



第八章 发光、耦合和成像器件

8.1 发光二极管

8.2 激光器

8.3 光电耦合器件

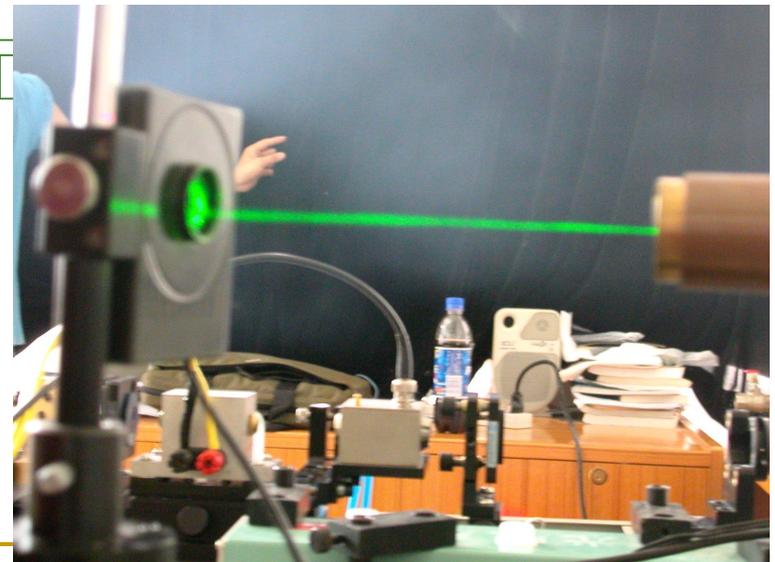
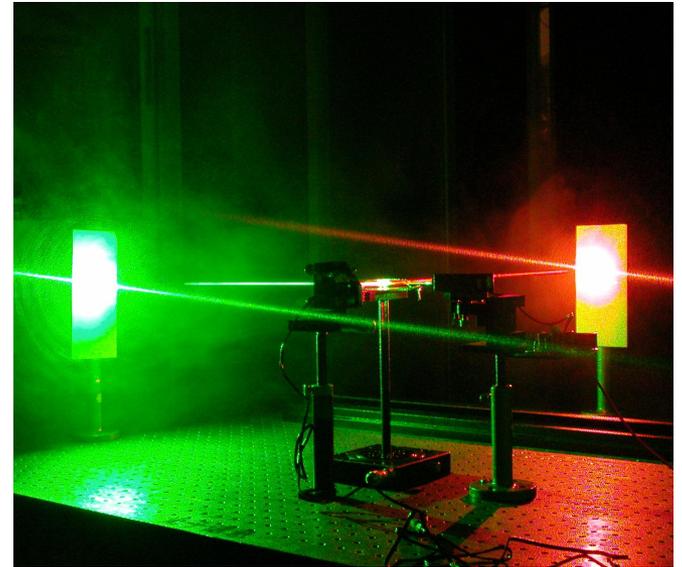
8.4 CCD

8.1 发光二极管

- 发光二极管（LED）的类型
- 发光二极管的原理
- 发光二极管的特性
- 发光二极管的应用

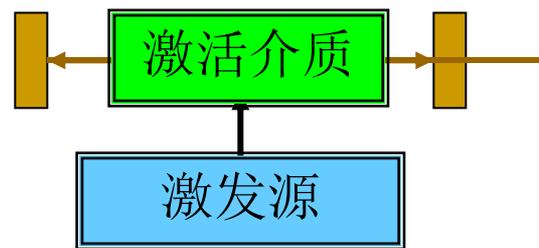
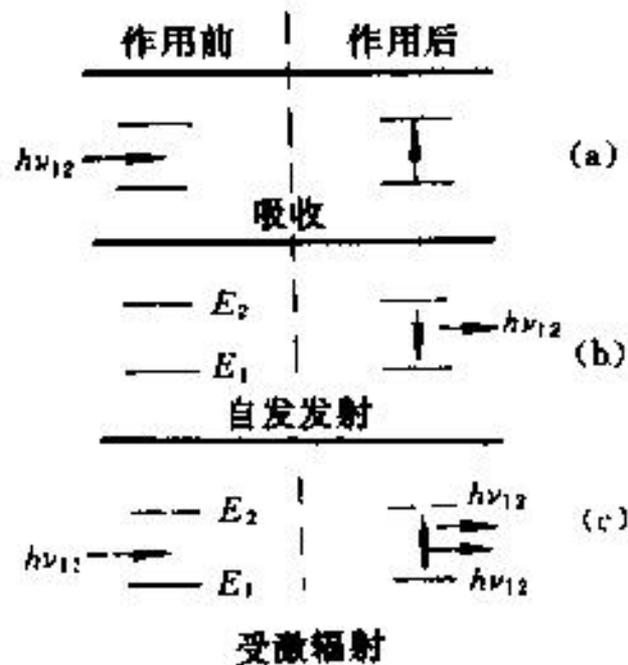
8.2 激光器

- 激光器的结构与原理
- 激光器的种类
- 激光器的特性参数
- 激光器在光电检测方面的应用



激光器的原理

- 受激辐射：激光是受激辐射的光放大。
- 粒子数反转
- 增益大于损耗
- 激光器由三部分组成：激活介质，谐振腔和激发源。
- 激光具有：单色性，方向性，高亮度，相干性。



激光器的特性参数

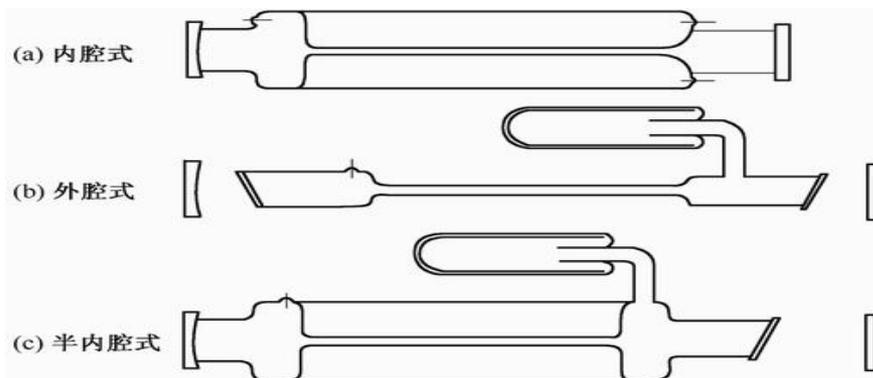
- 功率（平均 / 峰值），能量
- 波长，频率，线宽
- 脉冲宽度，重复频率
- 光斑直径，发散角，M²-平方因子
- 模式，波长可调谐性
- 稳定性（波长 / 频率 / 功率 / 能量 / 方向等），寿命，光电效率

激光器的类型

- 气体、固体、半导体激光器
- 紫外、可见和红外激光器
- 连续、准连续和脉冲激光器
- 单频、单模激光器
- 可调谐激光器
- 超短脉冲激光器

气体激光器

- 光束质量好，线宽窄，相干性好，谱线丰富。
- 效率低，能耗高，寿命较短，体积大。
- 原子（氦-氖）激光器，离子（氩，氪，金属蒸汽）激光器，分子（ CO_2 , CO , 准分子）激光器。

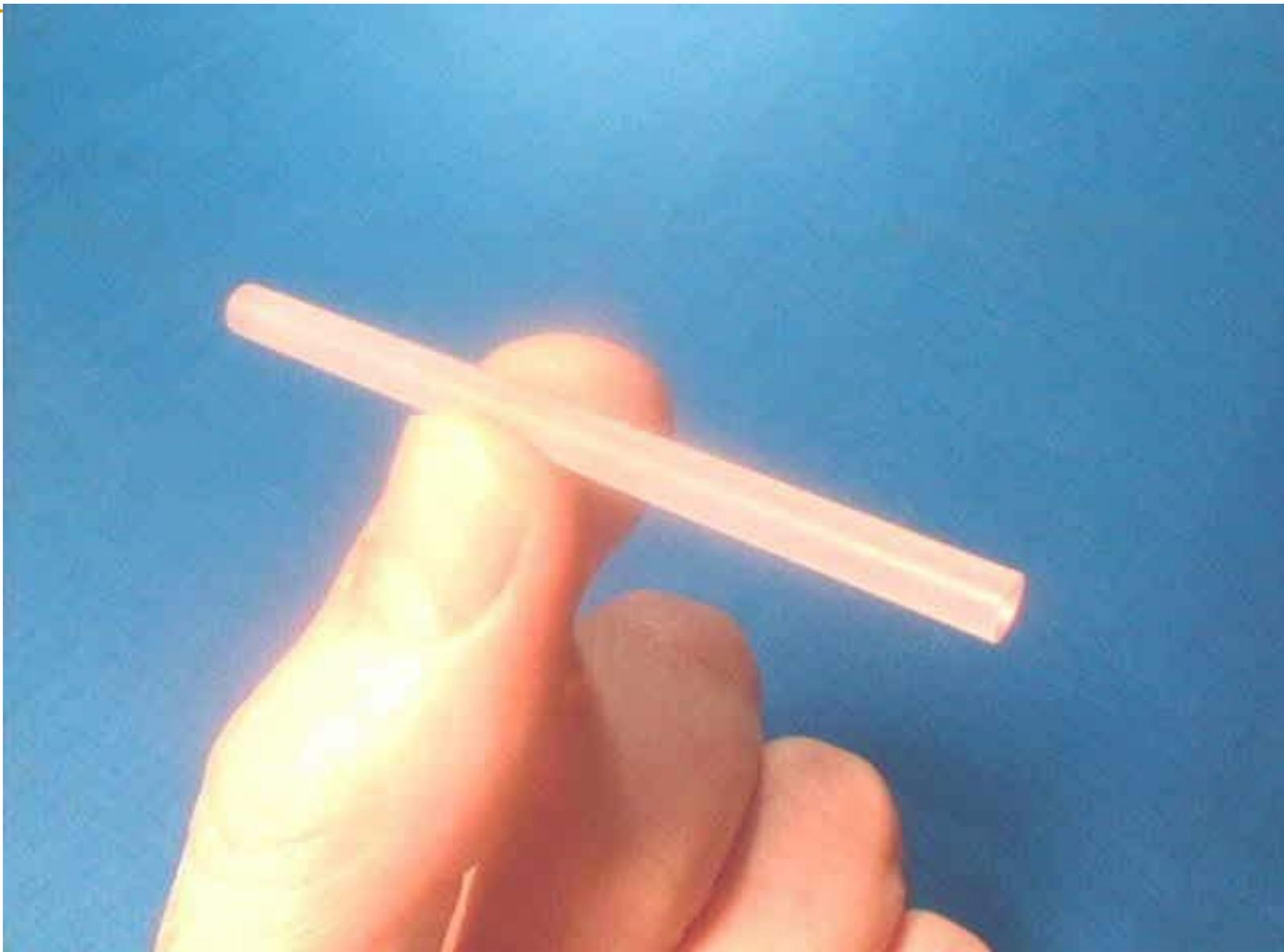


He-Ne激光器的基本结构形式

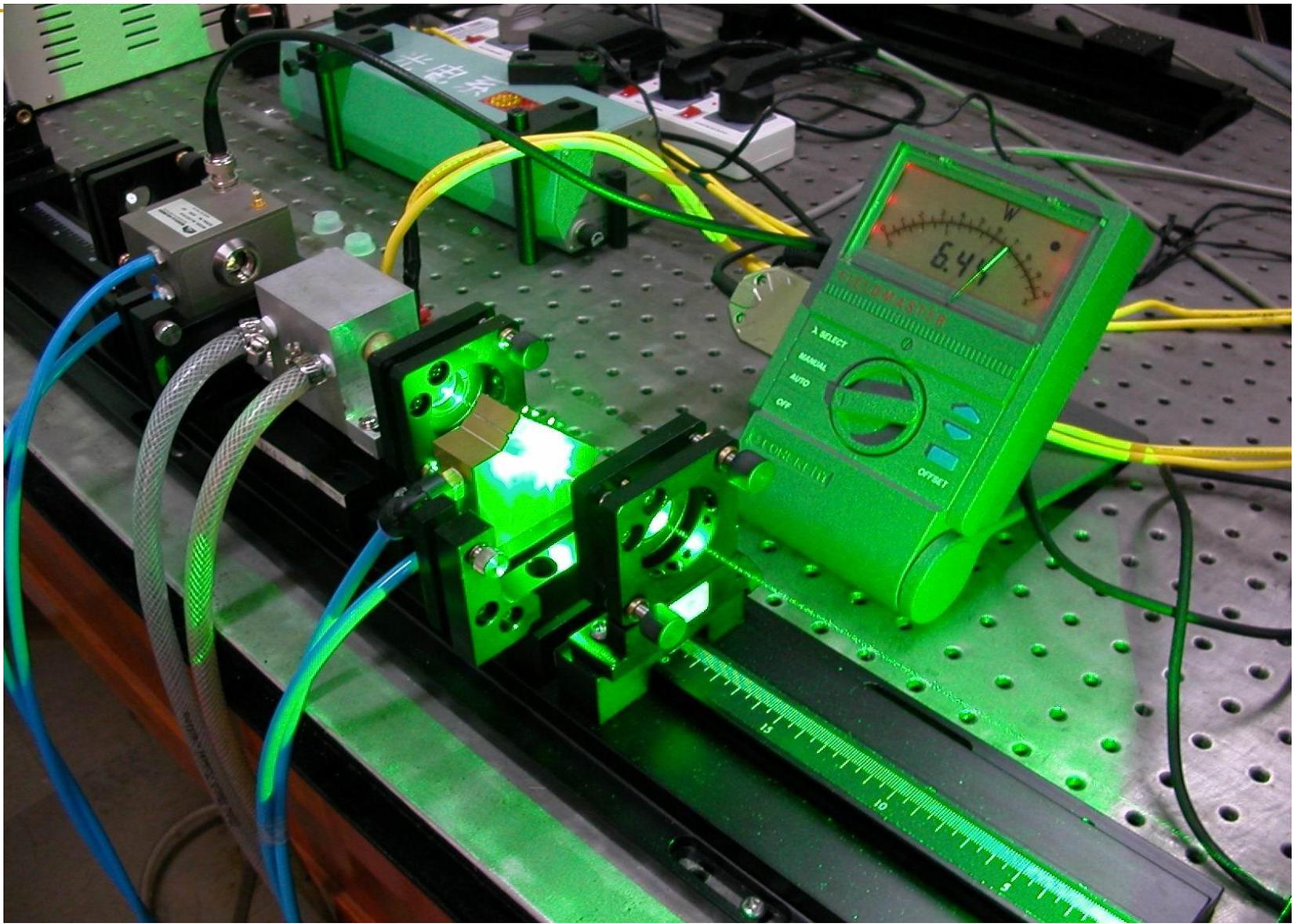


固体激光器

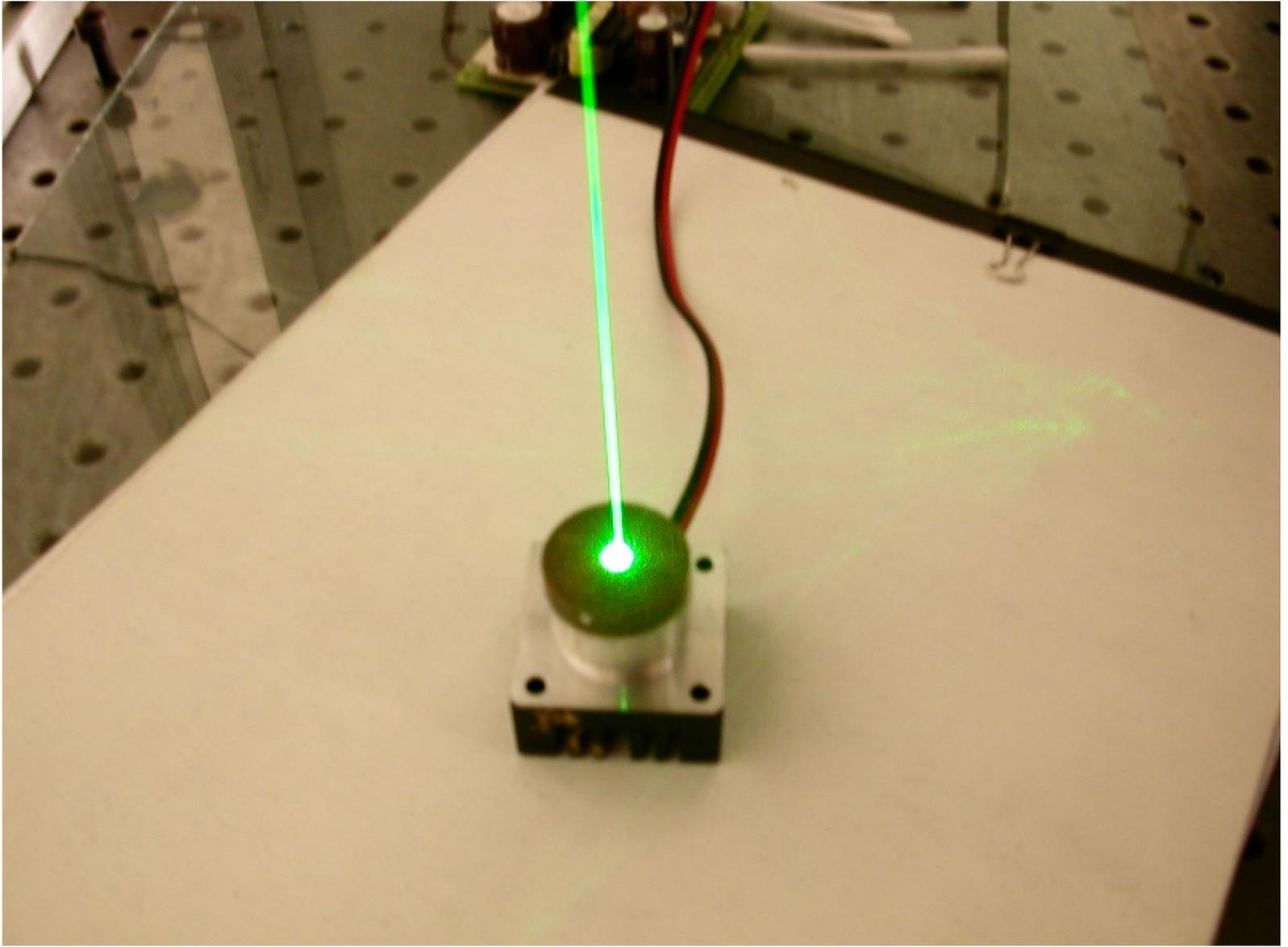
- 运行方式多样：连续，脉冲，调Q，锁模等，可以获得高平均功率，高重复率，高脉冲能量，高峰值功率激光；
- 主要在红外波段工作，采用光学泵浦方式；
- 结构紧凑，寿命较长，稳定可靠；
- **ND：YAG**，红宝石，钕玻璃激光器。



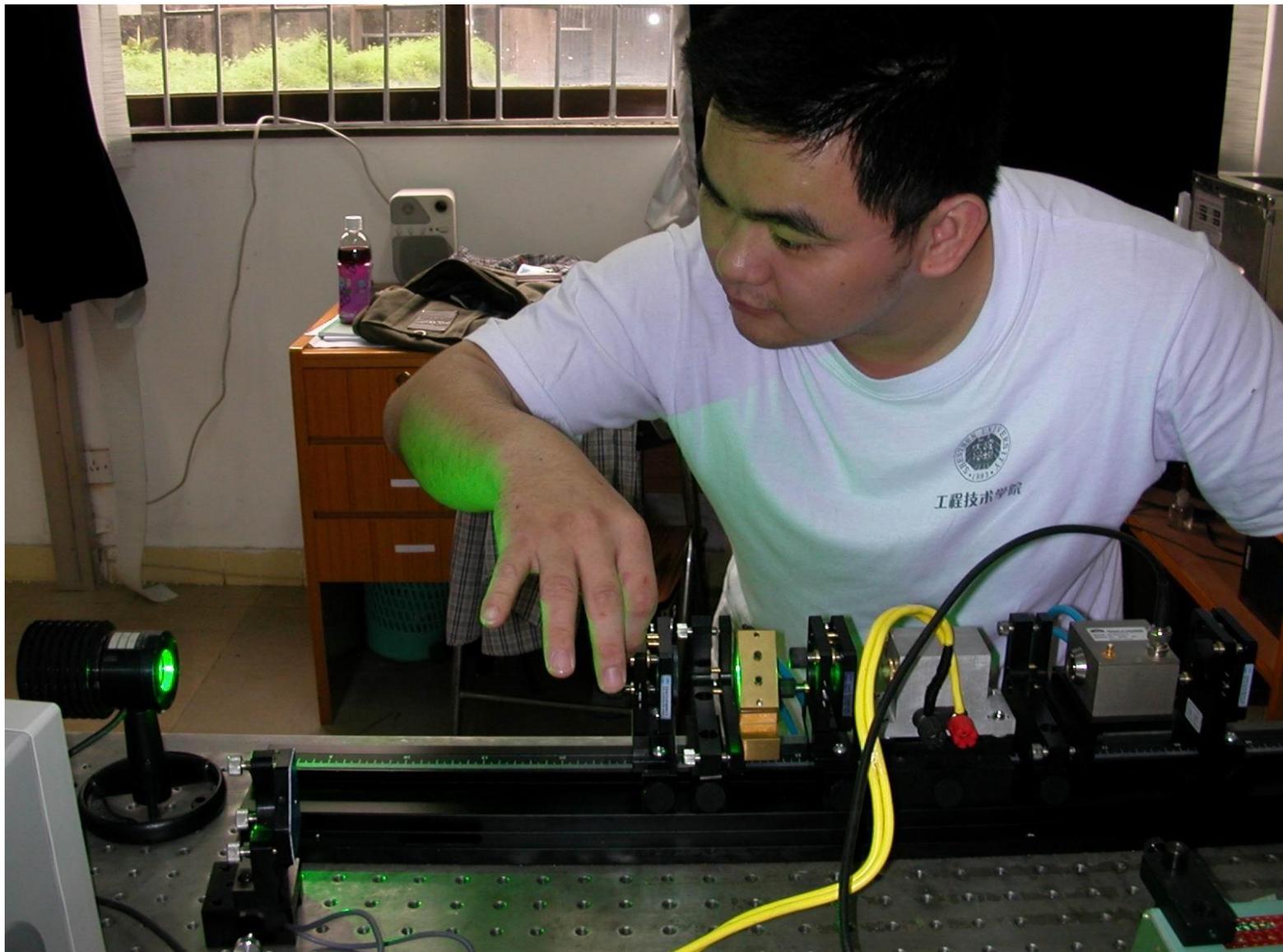
固 体 激 光 晶 体 棒



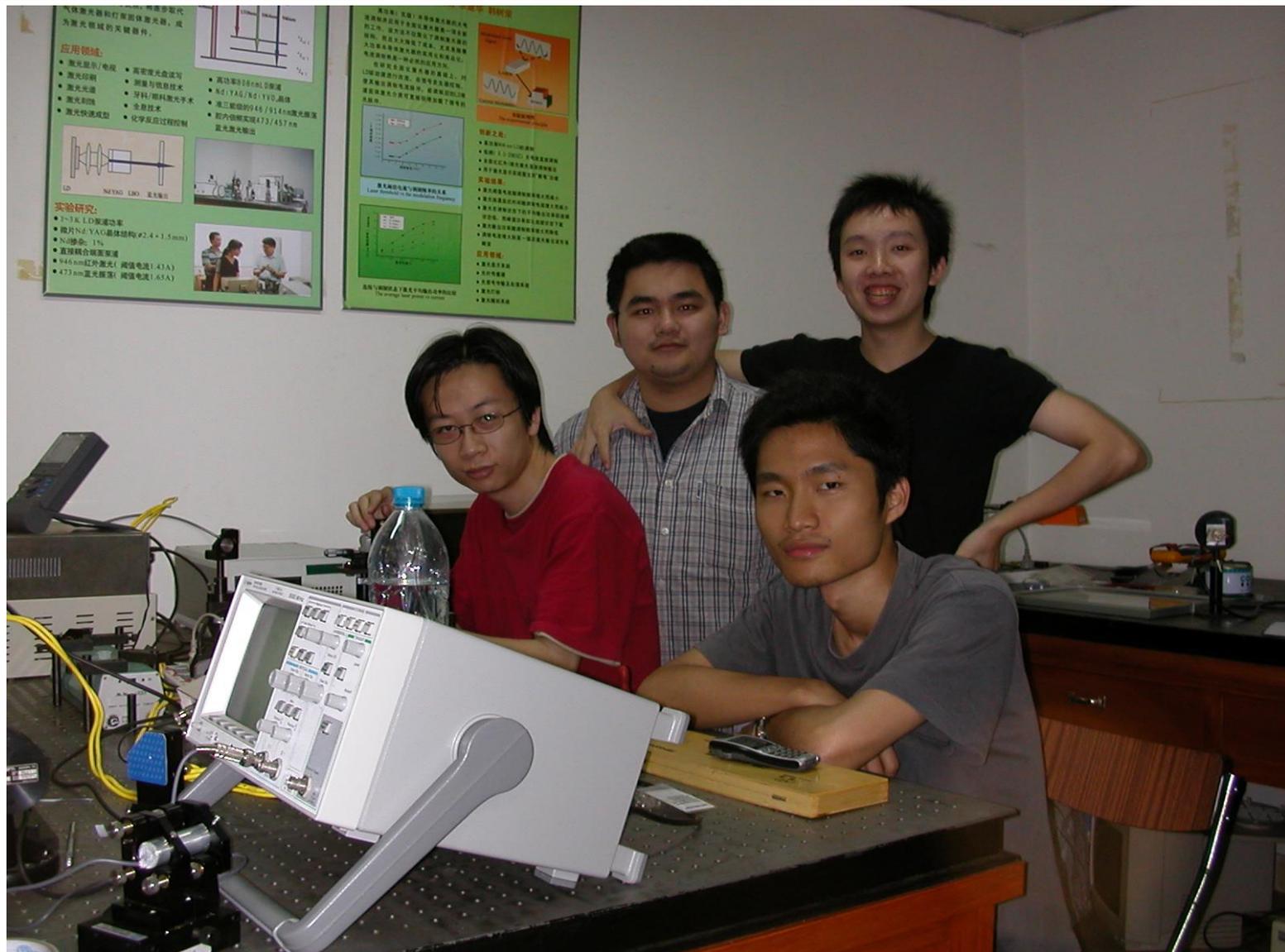
固 体 激 光 实 验 装 置



微 型 固 体 激 光 器 (学 生 研 发)



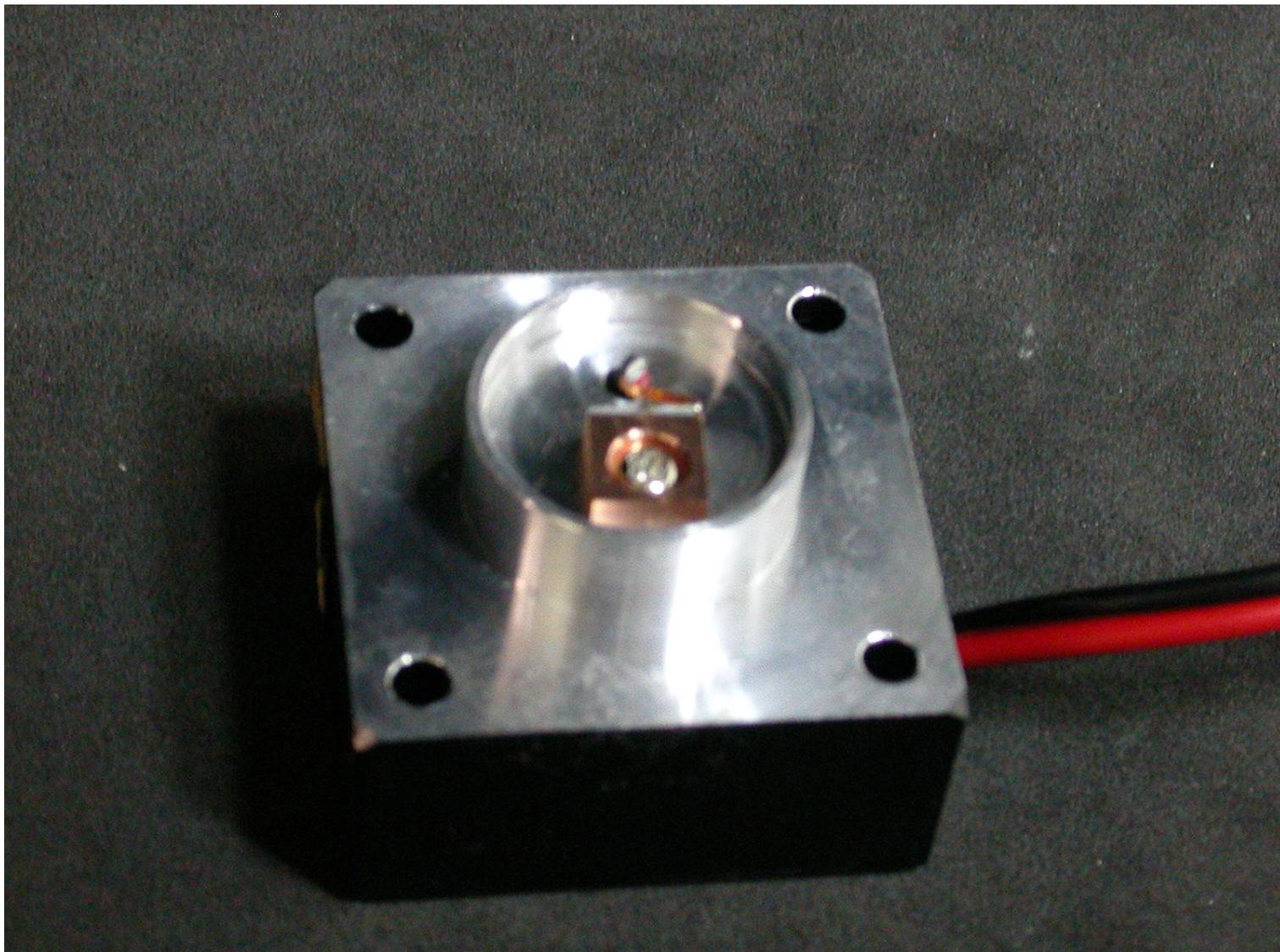
深 大 学 生 研 究 固 体 激 光 器



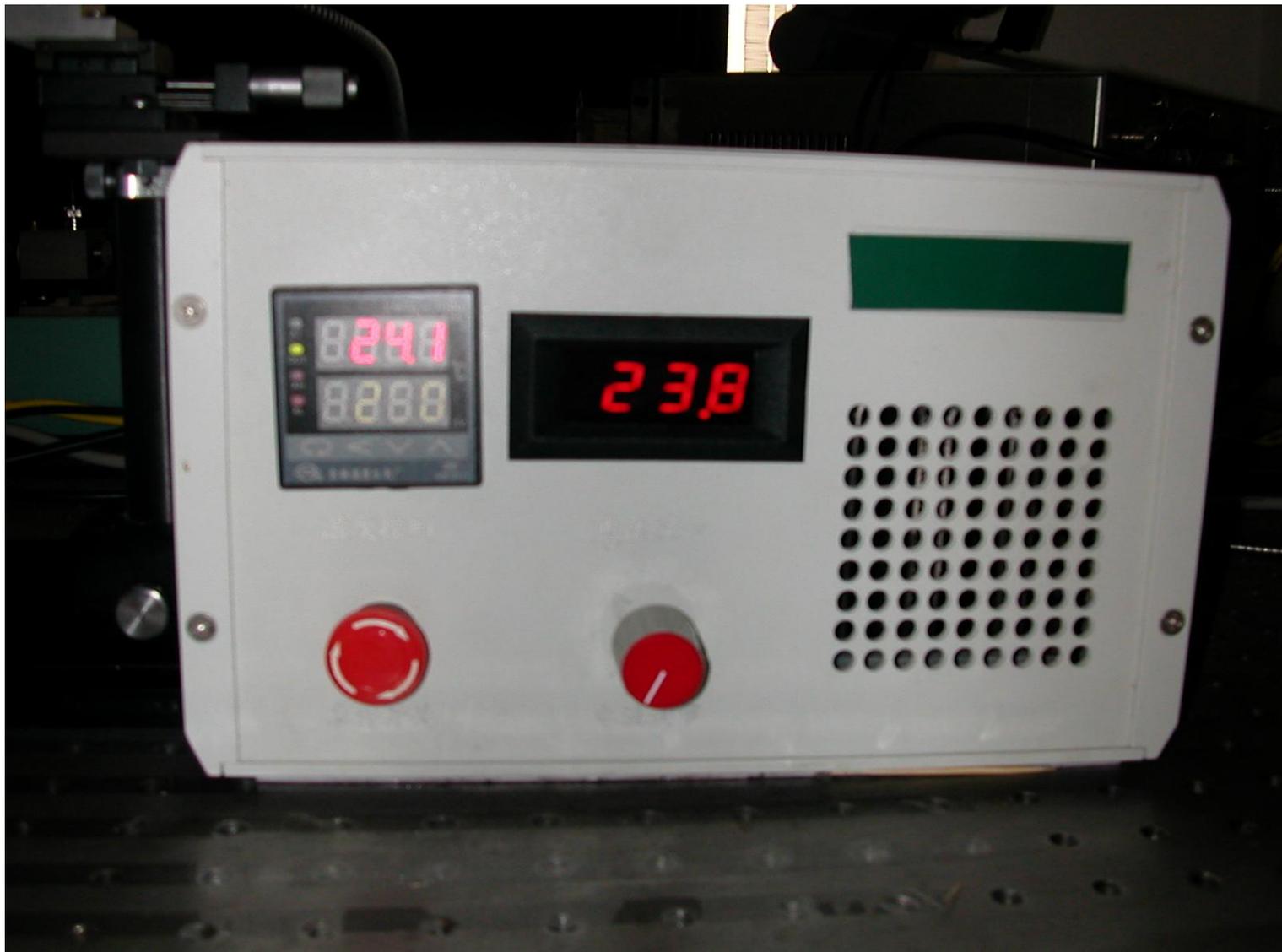
深大“挑战杯”小组（省二等奖）

半导体激光器

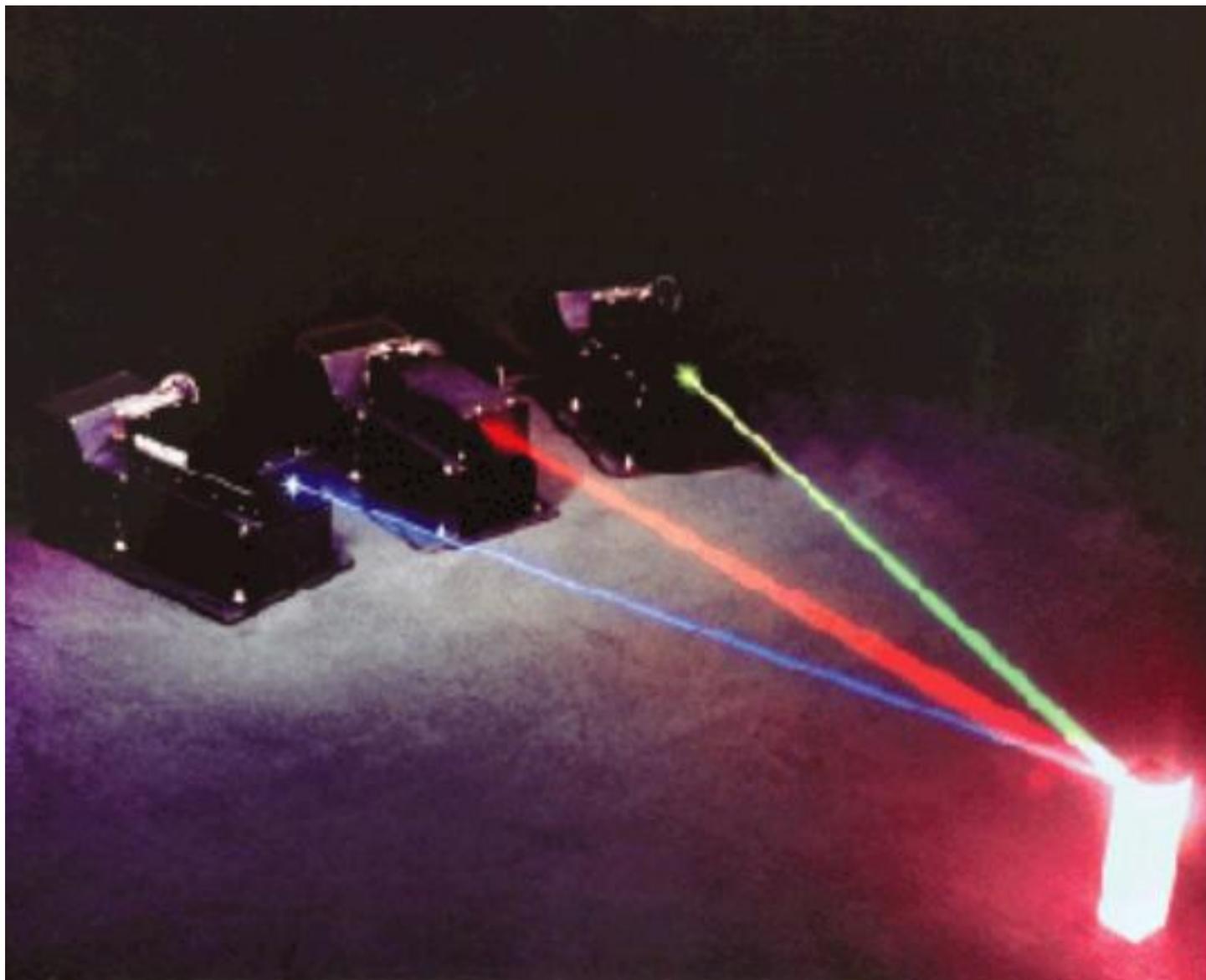
- 体积小，效率高，能耗低，寿命长，稳定可靠；
- 线宽较宽，波长可调谐，能产生超短脉冲，直接高频调制；
- 可批量生产，单片集成；
- 发散角大，温度特性差，容易产生噪声。



半 导 体 激 光 器 （ 自 制 ）



半 导 体 激 光 器 电 源



白 光 激 光 器

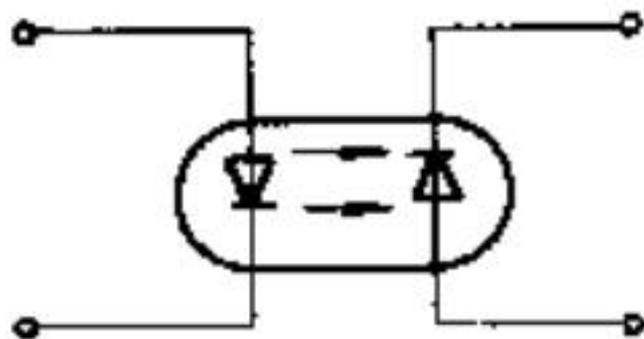
激光器在光电检测中的应用

- 激光测距，测长，测平面度等
- 激光大气污染检测
- 激光DNA检测
- 激光海洋探测
- 激光制导
- 激光雷达
- 激光干涉测量（探伤）
- 激光全息测量

8.3 光电耦合器件

- 定义：发光器件与光接受器件的组合器件。
- 类型：
 - 光电耦合 / 隔离器：在电路之间传递信息，又能实现电路间的电气隔离和消除噪声。
 - 光传感器：用于检测物体的位置或物体有无的状态。
- 发光器件：L E D，L D，灯等
- 光接受器件：光电二极管 / 三极管，光电池，光敏电阻。

工作原理与特点



光电耦合器件的应用

- 代替脉冲变压器耦合从零到几兆赫兹的信号，失真小；
- 代替继电器使用，做光电开关用；
- 把不同电位的两组电路互连，完成电平匹配和电平转移；
- 作为计算机主机与输入 / 输出端的接口，大大提高计算机的可靠性；
- 在稳压电源中作为过流保护器件，简单可靠。

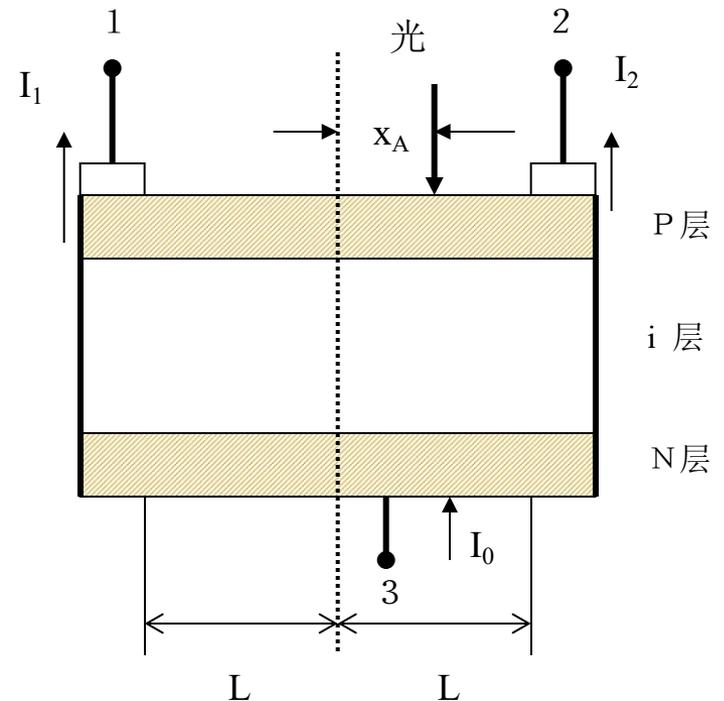
光电位置敏感器件 (PSD)

- PSD用于测量光斑的位置或位置的移动量
- 光束入射光敏层,在入射位置产生与入射辐射成正比的信号电荷,该电荷形成的光电流(I_1, I_2)由信号电极1和2输出, 3 为公共电极
- X_A : 位置信号

$$I_0 = I_1 + I_2$$

$$I_1 = I_0 \frac{L - x_A}{2L}$$

$$I_2 = I_0 \frac{L + x_A}{2L}$$



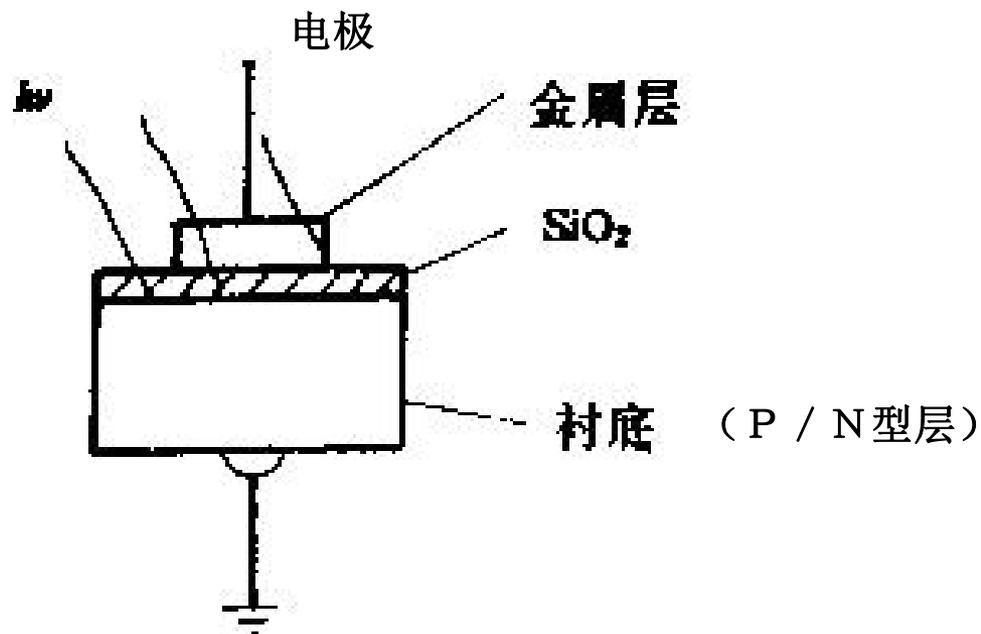
$$x_A = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} L$$

8.4 CCD

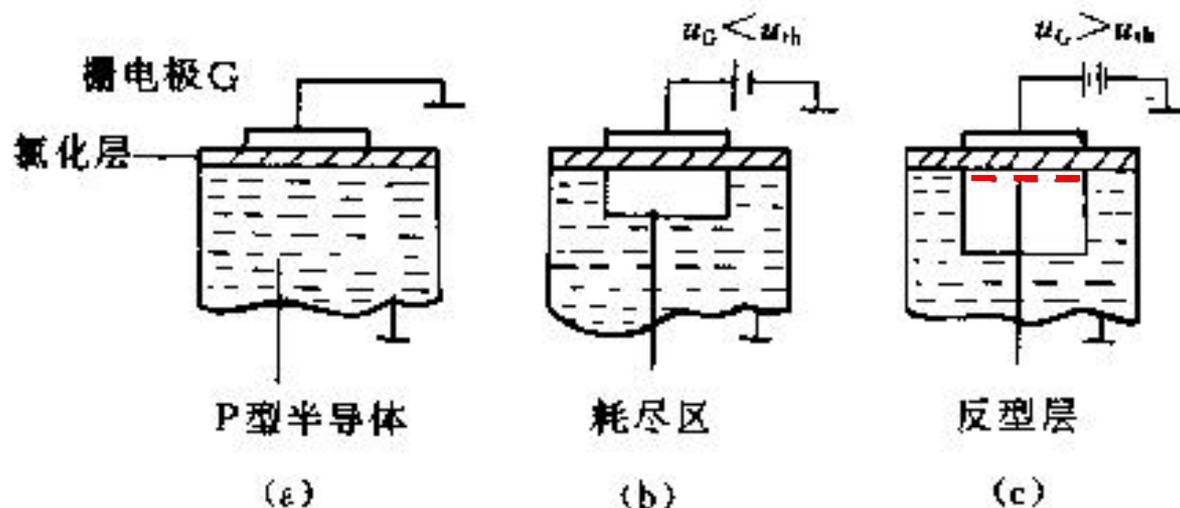
- CCD是一种电荷耦合器件(Charge Coupled Device)
- CCD的突出特点：是以电荷作为信号，而不同于其它大多数器件是以电流或者电压为信号。
- CCD的基本功能是电荷的存储和电荷的转移。
- CCD工作过程的主要问题是信号电荷的产生、存储、传输和检测。

CCD的结构

- **MOS 光敏元**：构成CCD的基本单元是MOS(金属—氧化物—半导体)结构。

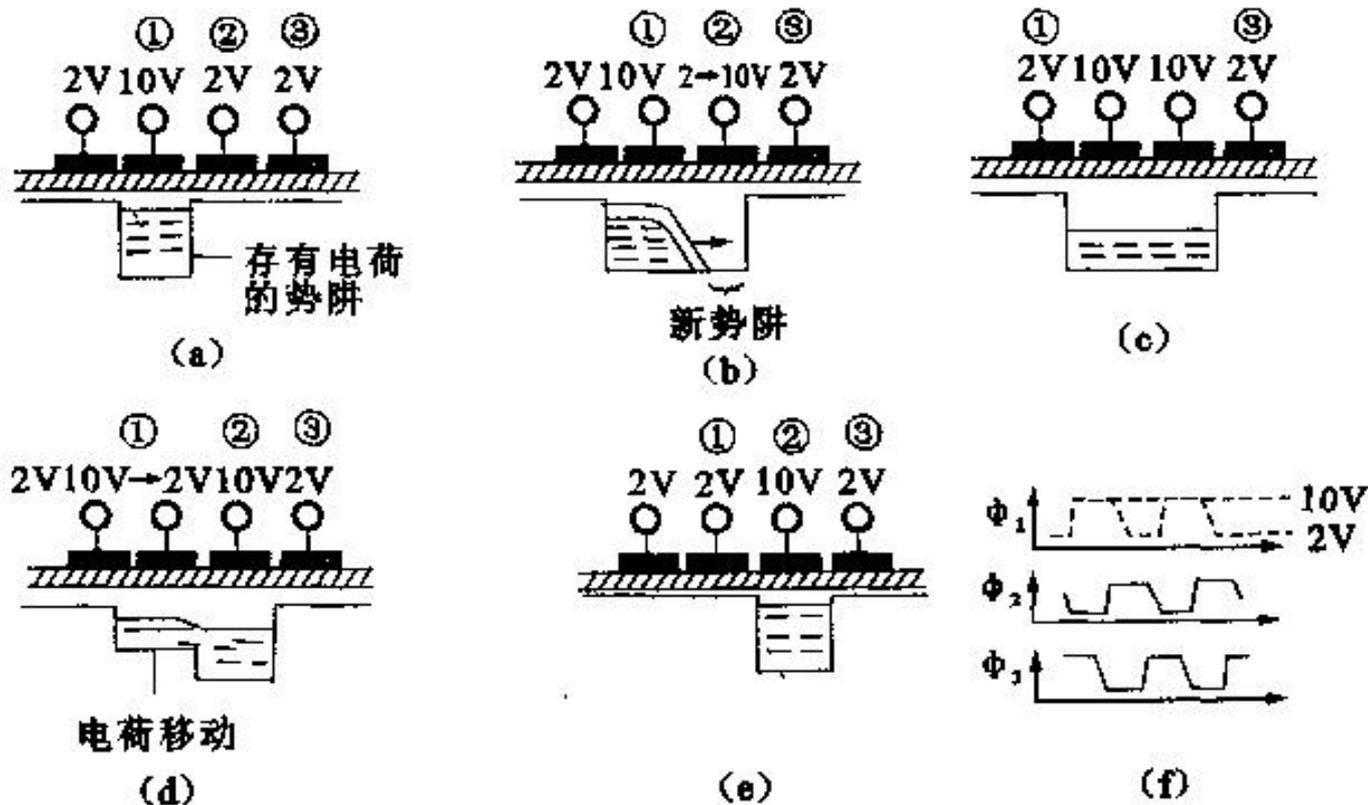


电荷存储



- 在栅极加正偏压之前，P型半导体中的空穴（多子）的分布是均匀的。
- 加正偏压后，空穴被排斥而产生耗尽区，偏压增加，耗尽区向内延伸。
- 当 $U_G > U_{th}$ 时，半导体与绝缘体界面上的电势变得非常高，以致于将半导体内的电子(少子)吸引到表面，形成一层极薄但电荷浓度很高的反型层。
- 反型层电荷的存在表明了MOS结构存储电荷的功能。

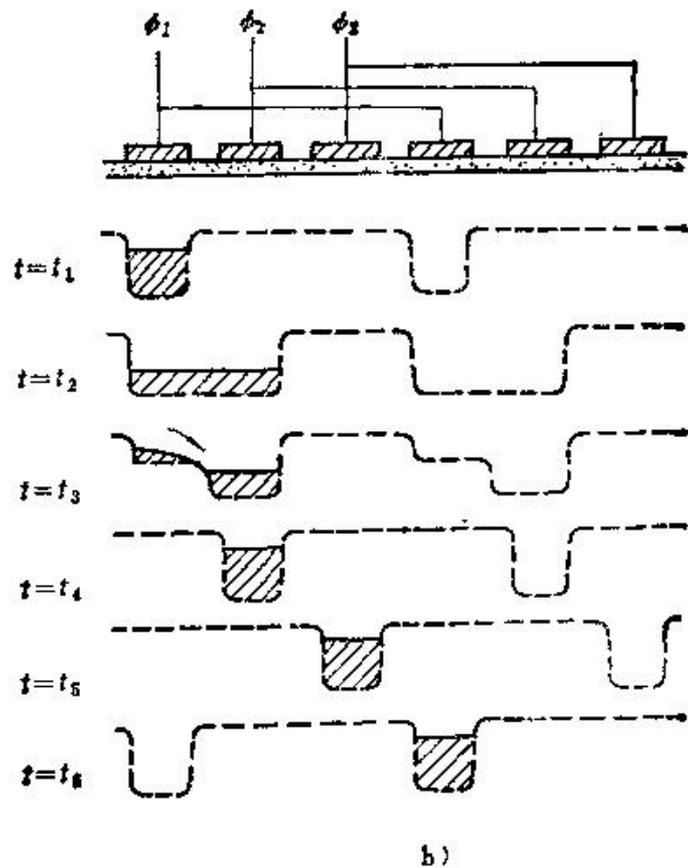
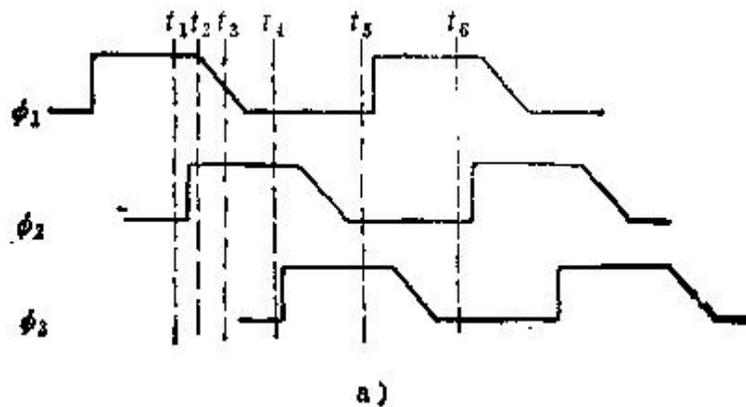
电荷的转移（耦合）



三相 CCD 中电荷的转移过程

电荷的转移（耦合）

- 第一个电极保持10V，第二个电极上的电压由2V变到10V，因这两个电极靠得很紧(间隔只有几微米)，它们各自的对应势阱将合并在一起。原来在第一个电极下的电荷变为这两个电极下势阱所共有。
- 若此后第一个电极电压由10V变为2V，第二个电极电压仍为10V，则共有的电荷转移到第二个电极下的势阱中。这样，深势阱及电荷包向右移动了一个位置。
- **CCD**电极间隙必须很小，电荷才能不受阻碍地自一个电极转移到相邻电极。对绝大多数**CCD**， $1\mu\text{m}$ 的间隙长度是足够了。

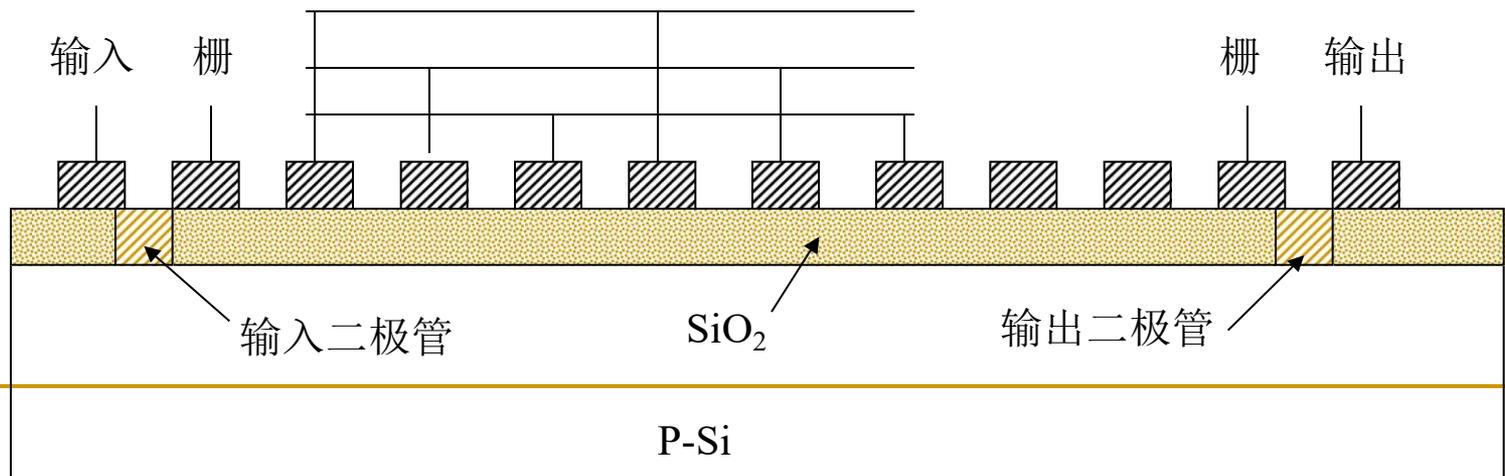


CCD的工作原理

a) 三相栅压的波形 b) 电荷转移过程

CCD的工作原理

- CCD主要由三部分组成：信号输入、电荷转移、信号输出。
- 输入部分：将信号电荷引入到CCD的第一个转移栅极下的势阱中，称为电荷注入。
- 电荷注入的方法主要有两类：光注入和电注入
 - 电注入：用于滤波、延迟线和存储器等。通过输入二极管给输入栅极施加电压。
 - 光注入：用于摄像机。用光敏元件代替输入二极管。当光照射CCD硅片时，在栅极附近的半导体体内产生电子—空穴对，其多数载流子被栅极电压排开，少数载流子则被收集在势阱中形成信号电荷。



CCD的工作原理

- 在CCD栅极上施加按一定规律变化、大小超过阈值的电压，则在半导体表面形成不同深浅的势阱。势阱用于存储信号电荷，其深度同步于信号电压变化，使阱内信号电荷沿半导体表面传输，最后从输出二极管送出视频信号。
- 为了实现电荷的定向转移，在CCD的MOS阵列上划分成以几个相邻MOS电荷为一单元的循环结构。一位CCD中含的MOS个数即为CCD的像数。
- 以电子为信号电荷的CCD称为N型沟道CCD，简称为N型CCD。而以空穴为信号电荷的CCD称为P型沟道CCD，简称为P型CCD。由于电子的迁移率远大于空穴的迁移率，因此N型CCD比P型CCD的工作频率高得多。

CCD的特点

- 体积小，功耗低，可靠性高，寿命长。
- 空间分辨率高，可以获得很高的定位精度和测量精度。
- 光电灵敏度高，动态范围大，红外敏感性强，信噪比高。
- 高速扫描，基本上不保留残象(电子束摄像管有15~20%的残象)
- 集成度高
- 可用于非接触精密尺寸测量系统。
- 无像元烧伤、扭曲，不受电磁干扰。
- 有数字扫描能力。象元的位置可由数字代码确定，便于与计算机结合接口。

CCD的特性参数

- 像素数量，CCD尺寸，最低照度，信噪比等
- 像素数是指CCD上感光元件的数量。44万（768*576）、100万（1024*1024）、200万（1600*1200）、600万（2832*2128）
- 信噪比：典型值为**46**分贝
- 感光范围 — 可见光、红外

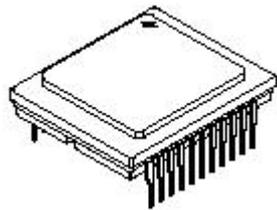
CCD的类型

- CCD按电荷存储的位置分有两种基本类型
 - 1、电荷包存储在半导体与绝缘体之间的界面，并沿界面传输——表面沟道CCD(简称SCCD)。
 - 2、电荷包存储在离半导体表面一定深度的体内，并在半导体体内沿一定方向传输，——体沟道或埋沟道器件(简称BCCD)。

CCD的类型

- 线阵CCD：光敏元排列为一行的称为线阵，象元数从128位至5000位以至7000位不等，由于生产厂家象元数的不同，市场上有数十种型号的器件可供选用。
- 面阵CCD：器件象元排列为一平面，它包含若干行和列的结合。
- 目前达到实用阶段的象元数由25万至数百万个不等，按照片子的尺寸不同有1 / 3英寸、1 / 2英寸、2 / 3英寸以至1英寸之分。

线阵CCD：一行，扫描；体积小，价格低；
面阵CCD：整幅图像；直观；价格高，体积大；



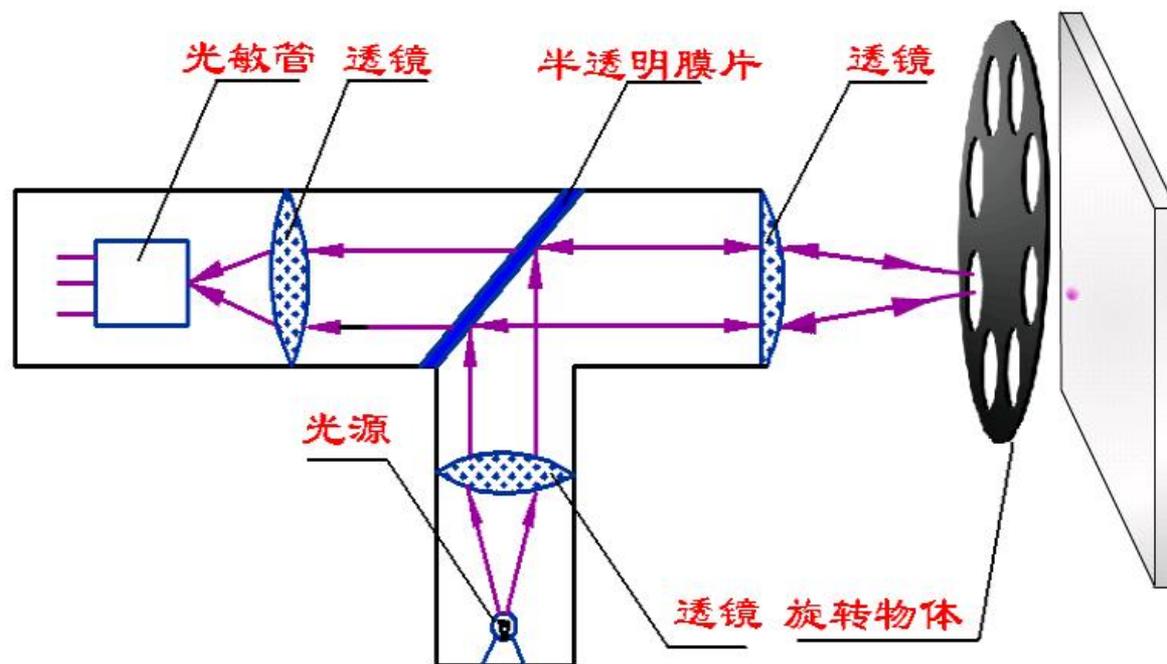
面阵CCD芯片



CCD在检测方面的应用

- 几何量测量
 - 自动步枪激光模拟射击系统。
- 光谱测量
 - 光谱仪输出信号测量。

第九章 光电检测系统

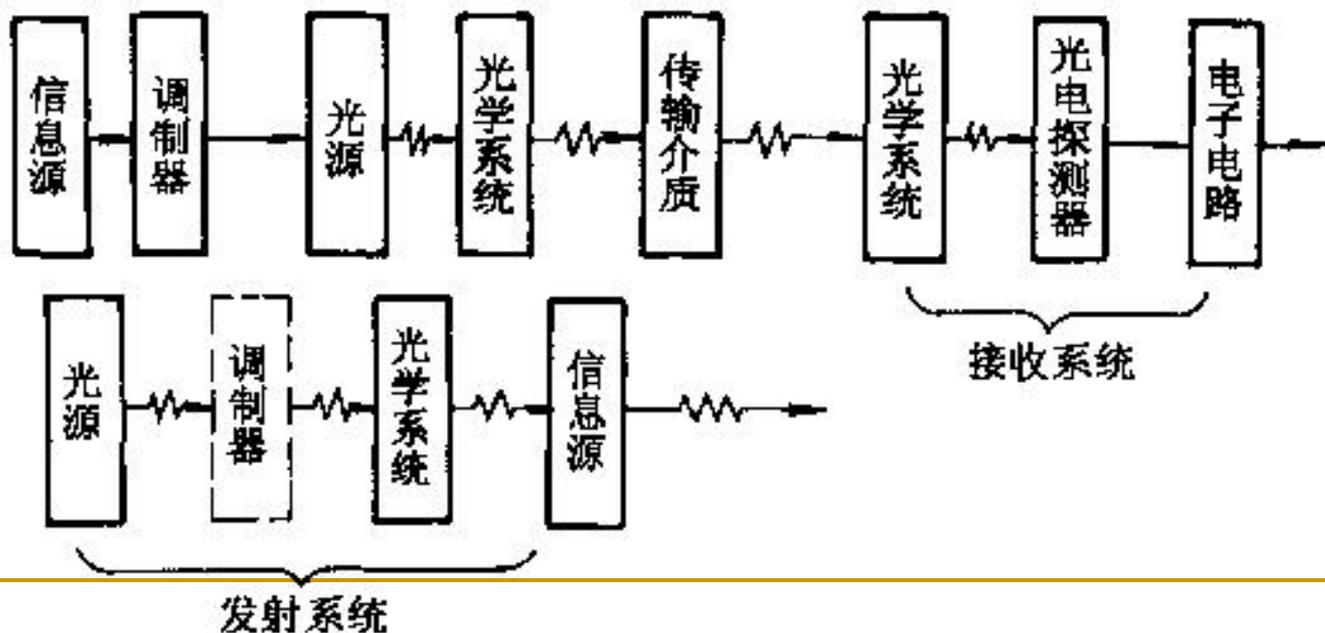


9.1 光电检测系统分类

- 主动系统/被动系统(按信息光源分)
- 红外系统/可见光系统(按光源波长分)
 - 红外系统多用于军事,有大气窗口,需要特种探测器
 - 可见光系统多用于民用
- 点探测/面探测系统(按接受系统分)
 - 用单元探测器接受目标的总辐射功率
 - 用面接受元件测量目标的光强分布
- 模拟系统/数字系统(按调制和信号处理方式分)
- 直接检测/相干检测系统(按光波对信号的携带方式分)

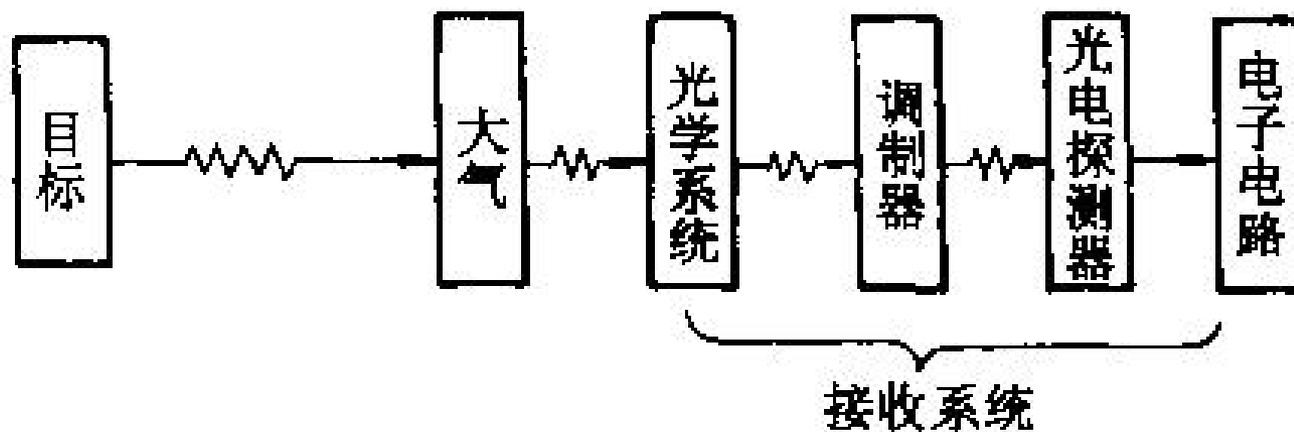
主动系统

- 通过信息调制光源,或者光源发射的光受被测物体调制.



被动系统

- 光信号来自被测物体的自发辐射



直接检测/相干检测

- 直接检测:

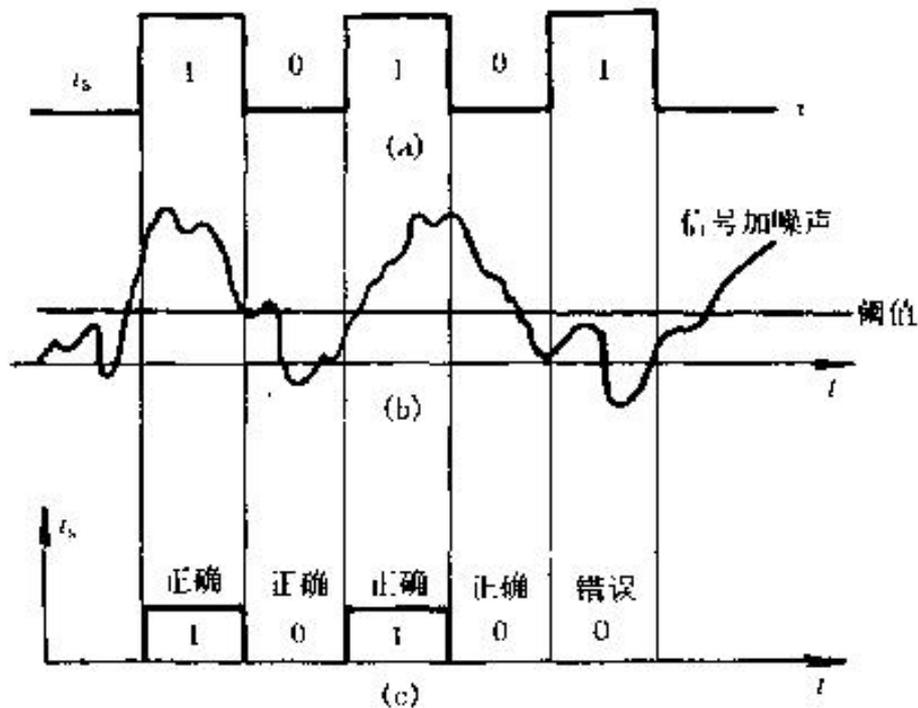
无论是相干或非相干光源，都是利用光源发射的光强携带信息。光电探测器直接把接受到的光强的变化转换为电信号的变化，然后，用解调电路检出所携带的信息。

- 相干检测:

利用光波的振幅、频率、相位携带信息，而不是光强。因为用光波的相干原理，只能用相干光。类似于无线电外差检测，故又称光外差检测。

光电检测系统的信噪比

$$\text{SNR}_p = \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率(方差)}}$$



9.2 直接检测系统的基本工作原理

- 将待测光信号直接入射到光探测器光敏面，光探测器响应于光辐射强度输出相应的电流或电压。

- 光探测器的平方律特性

q 光电流正比于光电场振幅的平方

$$I_p = SP = \frac{q\eta}{h\nu} \overline{E^2(t)} = \frac{q\eta}{2h\nu} A^2$$

q 输出的电功率正比于入射光功率的平方

$$S_p = I_p^2 R_L = \left(\frac{q\eta}{h\nu} \right)^2 P^2 R_L$$

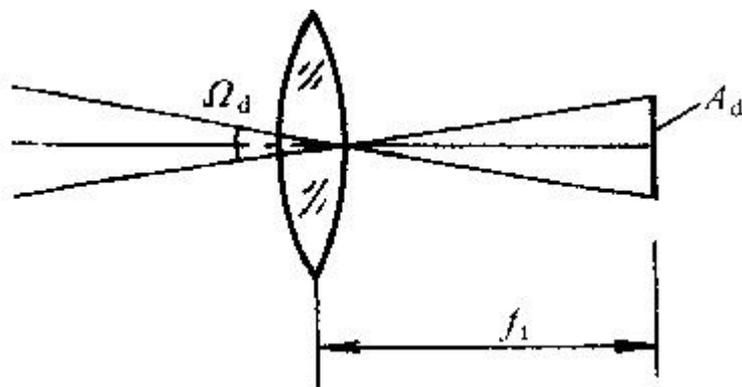
系统的基本特性

$$SNR_o = \frac{P_s^2}{2P_s P_n + P_n^2} = \frac{(P_s/P_n)^2}{1 + 2(P_s/P_n)}$$

直接检测系统的视场角

- 表征系统能“观察”到的空间范围
- 系统的视场角越大越好。但是增大检测器面积使系统的噪声增大；减小焦距使系统的相对孔径加大。

$$\Omega_d = A_d / f_1^2$$

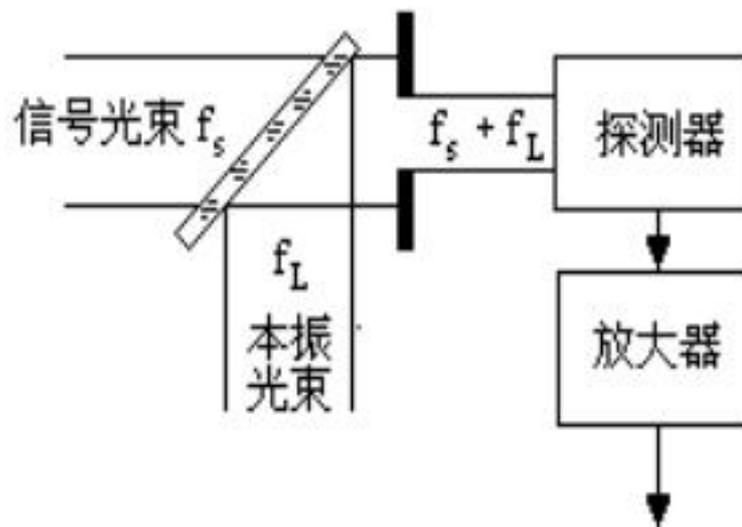


系统的通频带宽

- 检测系统要求 Δf 保持原由信号的调制信息.
- 确定系统频带宽度的几种方法:
 - 等效矩形带宽
 - 频谱曲线下降 3 dB 的带宽
 - 包含 90 % 能量的带宽
- 频带宽度越宽，通过信号的能量越大，系统的噪声功率也越大.

光外差检测

- f_s 为信号光波， f_L 为本机振荡光波，这两束相干光入射到探测器表面进行混频，形成相干光场。
- 经探测器变换后，输出信号中包含 $f_s - f_L$ 的差频信号，故又称相干探测。



基本原理

- 设入射到探测器上的信号光场为：

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)$$

- 本机振荡光场为：

$$E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$$

- 入射到探测器上的总光场为：

$$E(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) + A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$$

光探测器输出的光电流

$$i_p(t) = S \overline{E^2(t)} = S \overline{[E_s(t) + E_L(t)]^2} = S \left\{ \overline{A_s^2 \cos^2(\omega_s t + \varphi_s)} + \overline{A_L^2 \cos^2(\omega_L t + \varphi_L)} \right. \\ \left. + A_s A_L \overline{\cos[(\omega_L + \omega_s)t + (\varphi_s + \varphi_L)]} + A_s A_L \overline{\cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)]} \right\}$$

- $S = \eta q / h\nu$; η : 量子效率; $h\nu$: 光子能量; $\omega_L - \omega_s$ 差频。
- 式中第一、二项为余弦函数平方的平均值, 等于 $1/2$ 。
- 第三项 (和频项) 是余弦函数的平均值为零。而第四项 (差频项) 相对光频而言, 频率要低得多。
- 当差频 $(\omega_L - \omega_s)/2\pi$ 低于光探测器的截止频率时, 光探测器就有频率为 $(\omega_L - \omega_s)/2\pi$ 的光电流输出。

光外差检测的特性

- 可获得全部信息：不仅可探测振幅和强度调制的光信号，还可探测频率调制及相位调制的光信号，即在光探测器输出电流中包含有信号光的振幅、频率和相位等全部信息；
- 转换效率高：转换增益可高达 $10^7 - 10^8$ ，对微弱信号的探测有利。

$$G = \frac{2S^2 P_s P_L R_L}{S^2 P_s^2 R_L} = \frac{2P_L}{P_s}$$

光外差检测的特性

- 可获得全部信息：不仅可探测振幅和强度调制的光信号，还可探测频率调制及相位调制的光信号，即在光探测器输出电流中包含有信号光的振幅、频率和相位等全部信息。
- 转换效率高：转换增益可高达 $10^7 - 10^8$ ，对微弱信号的探测有利。

$$G = \frac{2S^2 P_s P_L R_L}{S^2 P_s^2 R_L} = \frac{2P_L}{P_s}$$

- 差频信号是由具有恒定频率（近于单频）和恒定相位的相干光混频得到的，只有激光才能实现外差探测。

光外差检测的特性

- 良好的滤波性能

取差频信号为信息处理器的通频带，可以过滤频带外的杂散光；而直接探测中，所有的杂散光都被接收

- 信噪比损失小

- 检测灵敏度高

例如：量子效率为 1，
 Δf 为 1 Hz，则外差检测的
灵敏度极限为 1 个光子

$$NEP = \frac{h\nu\Delta f}{\eta}$$

系统对探测器性能的要求

- 光外差检测对探测器的要求比直接检测高
 - 响应频带宽
 - 均匀性好
 - 工作温度高

9.3 典型的光电检测系统

- 你所知道的光电检测系统???
- 你能讲一讲光电检测系统???
- 你能评一评光电检测系统???

典型的光电检测系统

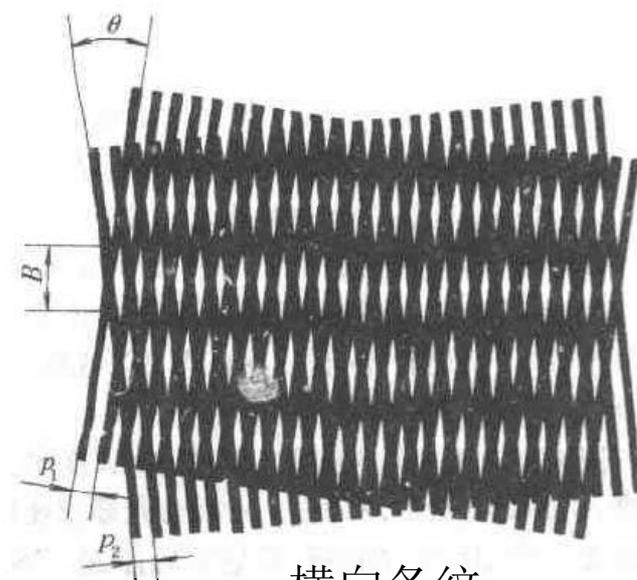
- 直接检测系统（光强调制）
 - 莫尔条纹测长仪
 - 激光测距仪
 - 激光准直
 - 环境污染检测系统
- 光外差检测系统
 - 激光干涉测长仪（相位调制）
 - 多普勒测速（频率调制）
 - 光外差通信



9.3.1 莫尔条纹测长仪

■ 莫尔条纹的原理

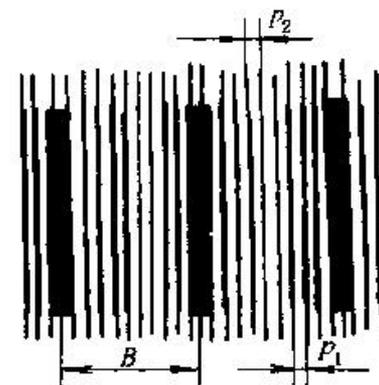
- 将两块光栅(节距分别为 P_1 和 P_2)叠加在一起,并且两者的栅线成很小的角度 θ ,透过光栅能看到如图所示的明暗相间的莫尔条纹.这就是莫尔条纹的光强调制作用.



横向条纹

■ 长光栅莫尔条纹的形式

- 横向条纹: $P_1=P_2$, θ 很小;
- 纵向条纹: $P_1 \sim P_2$, $\theta = 0$;
- 斜条纹: $P_1 \sim P_2$, θ 很小.



纵向条纹

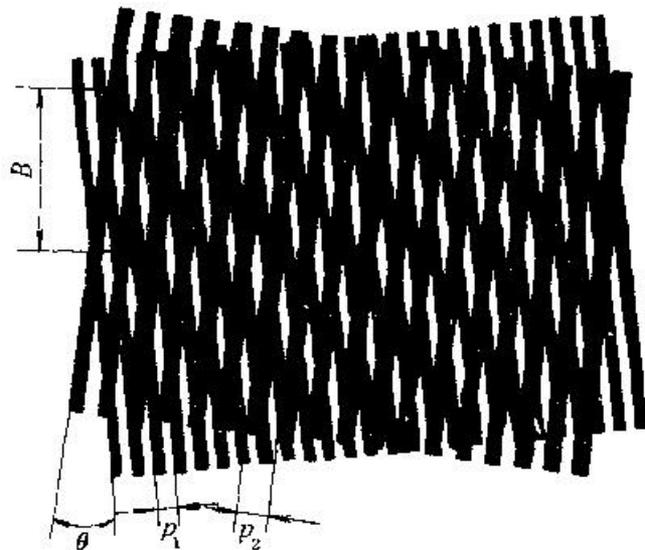
■ 莫尔条纹演示

莫尔条纹的特性

- 光栅的节距比光的波长大很多.
- 莫尔条纹的宽度 B (mm)、光栅的节距 P (mm)和夹角 θ (rad)之间的关系为:

$$B = \frac{P}{2 \tan \theta/2} \approx \frac{P}{\theta}$$

- 当两光栅沿垂直于栅线的方向相对移动时，莫尔条纹将沿平行于栅线的方向移动。光栅每移动一个节距 P ，莫尔条纹移动一个宽度 B 。
- 因为 θ 很小，放大倍数 K 很大。例如： $\theta = 20'$, $K = 172$



斜向条纹

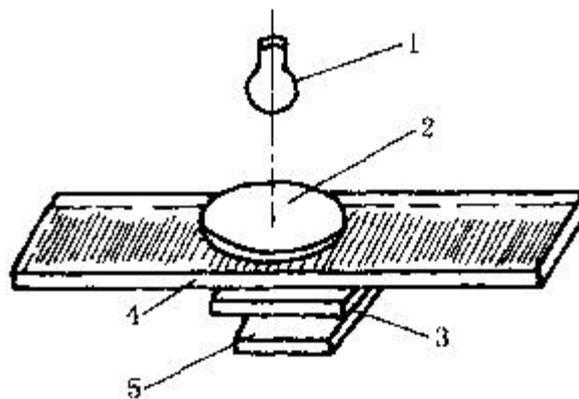
$$K = \frac{B}{P} = \frac{1}{\theta}$$

莫尔条纹测长仪

- 两块光栅：一块为指示光栅与工作台固定。一块为长光栅。工作台前后移动的距离由两块光栅形成的莫尔条纹进行计数得到。指示光栅相对移动一个节距，莫尔条纹变化一周。指示光栅移动的距离为：

$$x = NP + \delta$$

N：指示光栅移动距离中包含的光栅线对数， δ ：小于1个光栅节距的小数。

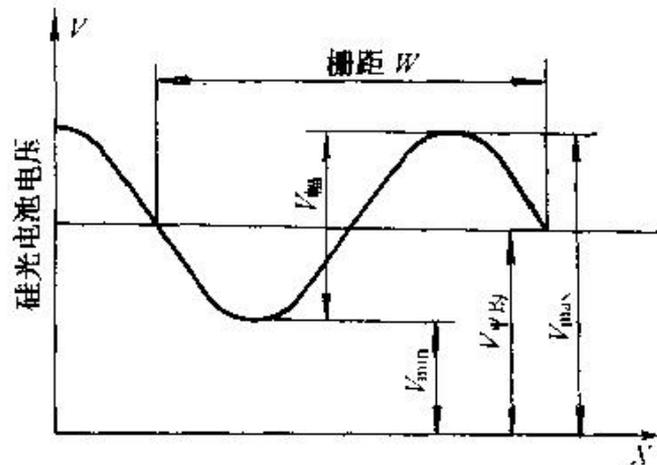


简单光栅读数头

1：灯，2：聚光镜，3：指示光栅，4：长光栅，5：光电探测器

莫尔条纹测长仪

- 光电探测器接收到的明暗变化的光信号转换成电信号；
- 通过对莫尔条纹的直接测量，可以测的光栅的位移量；
- 在较宽的莫尔条纹间隔内安放细分装置进行细分，可读取位移的分数，提高测量的灵敏度和精度。



光栅输出信号波形

莫尔条纹测长仪的应用

- 工业自动化中的核心测控部件
- 小型智能化的长度测试仪器，用于对长度、直径、厚度、表面形状、粗糙度等多种参数的测量。
- 新一代的计量测试工具
- 某些几何量计量检测仪器的核心转换系统
- 某些物理量的计量检测仪器的核心转换系统
- 纳米级测量的重要仪器
- 非接触在线测量控制仪器

9.3.2 激光测距仪

- 激光测距仪的类型
 - 脉冲激光测距仪
 - 相位激光测距仪
- 激光测距仪的特点
 - 测程远、测量精度高
 - 结构小巧、携带方便
 - 快速、非接触式距离测量
 - 激光对点准确
 - 受气象条件影响较大
- 激光测距仪广泛应用于工业、国防军事、科学技术。



一、脉冲激光测距仪

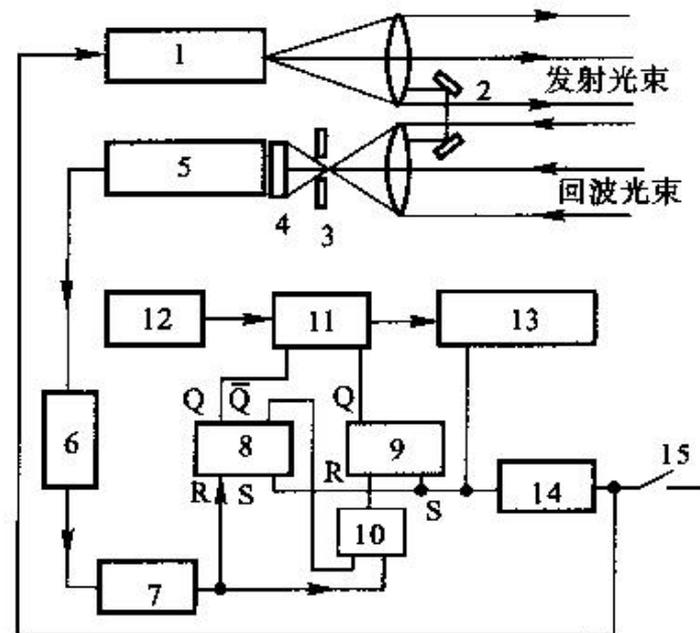
■ 测距原理：

由激光器对被测目标发射一个光脉冲，然后接受目标反射回来的光脉冲，通过测量光脉冲往返所经过的时间来计算目标的距离。

$$L = \frac{t}{2}c = \frac{n\tau}{2}c$$

■ 测距仪原理：

由激光发射系统、接受系统，门控电路、时钟脉冲振荡器和计数器等组成。



脉冲激光测距仪的原理框图

脉冲激光测距仪

发射系统

激光器：LD, ND: YAG (调Q/锁模)

电源

发射望远系统

物镜

小孔光阑

干涉滤光片

接收系统

接收光学系统

光电探测器

低噪声宽带放大器

整形电路

门控电路

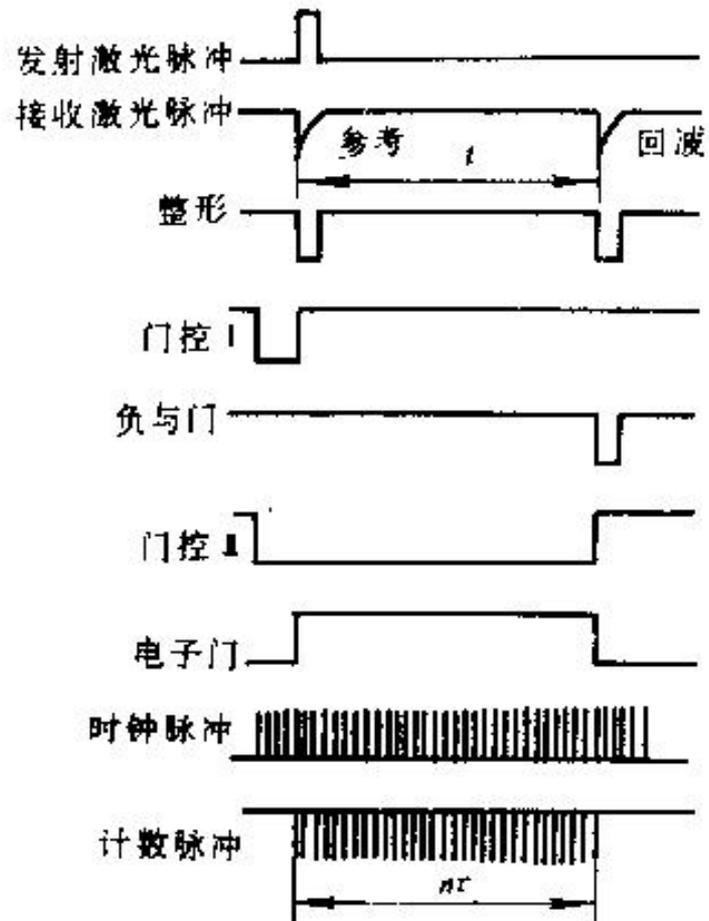
时钟脉冲振荡器

计数显示器

- 激光器发射激光脉冲被分为两部分：参考信号和回波信号。
- 回波脉冲经光电探测器转换成电信号，再经放大和整形后，将电子门打开，使通过电子门的时钟脉冲进入计数器开始计时；当回波脉冲（负与门）到来时，关闭电子门。
- 在参考和回波脉冲之间计数器所接收到的时钟脉冲个数代表被测距离。

$$L = \frac{t}{2}c = \frac{n\tau}{2}c$$

- 时钟频率越高，测量的分辨率越高。但分辨率最终取决于激光脉冲的上升时间。

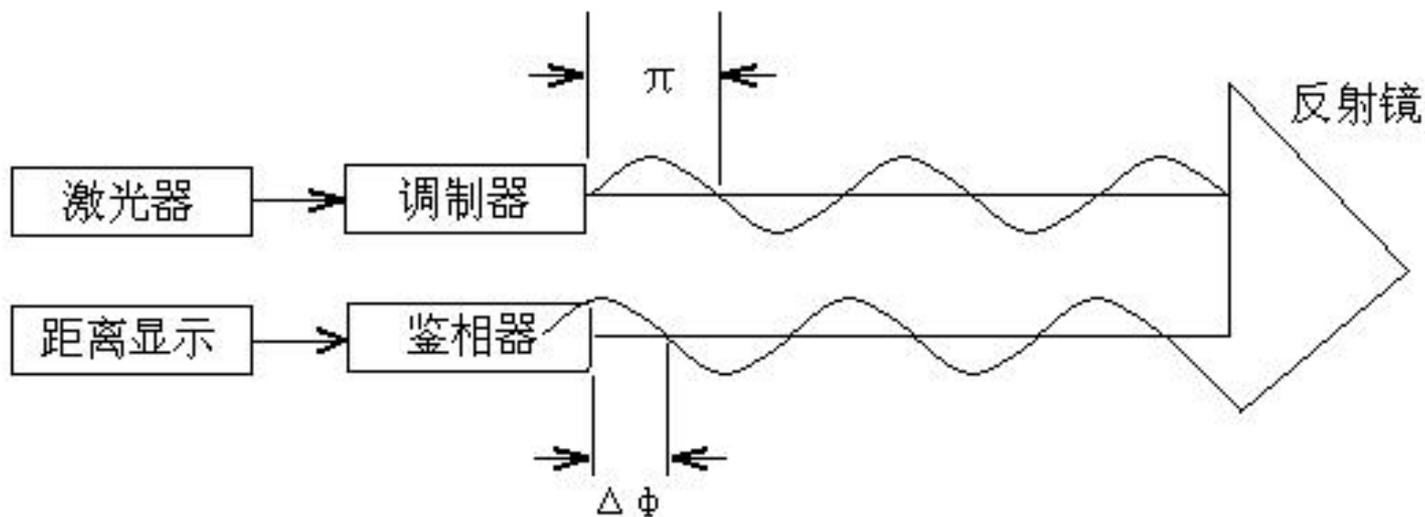


脉冲测距波形

二、相位激光测距仪

■ 相位测距原理：

相位激光测距是用无线电波段的频率，对激光束进行幅度调制并测定调制光往返一次所产生的相位延迟，再根据调制光的波长，换算此相位延迟所代表的距离。



若调制光角频率为 ω ，在待测量距离D上往返一次产生的相位延迟为 ϕ ，则对应时间t可表示为：

$$t = \phi / \omega$$

距离L可表示为

$$L = \frac{ct}{2} = \frac{1}{2} c \frac{\phi}{\omega}$$

式中：

ϕ ——信号往返测线一次产生的总的相位延迟。

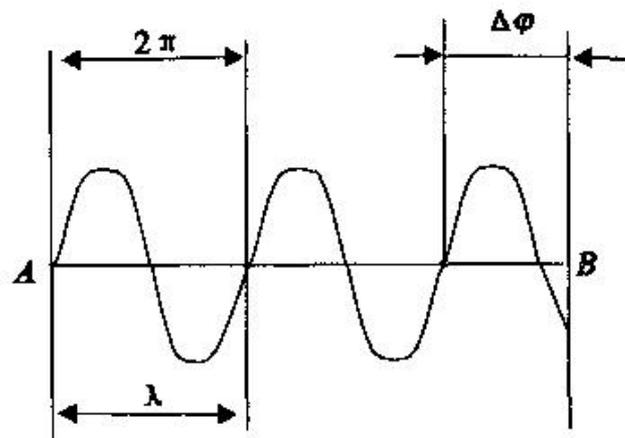
ω ——调制信号的角频率， $\omega = 2\pi f$ 。

相位延迟: $\phi = 2\pi(N + \Delta N) = 2\pi N + \Delta\phi$

被测距离: $L = \frac{c}{2f}(N + \Delta N) = \lambda(N + \Delta N)$

N: 测线所包含调制波长个数。 ΔN : 测线所包含不足波长的小数部分。 λ : 称为测尺长, 又称“光尺”。

距离的测量变成了
测线所包含波长个
数和不足一个波长
的小数部分的测量。



- 测量信号相位的方法都不能确定出相位的整周期数 N ，只能测定不足 2π 的尾数 N 。由于 N 值不确定，距离 L 就成为多值解。
- 测程长，精度低；反之，精度高，则测程短
- 解决方法：
 - 用两个频率的波（两个不同的光尺）进行测量，一个用来测量距离的大数，另一个用于精确测量距离的尾数。
 - 就可以既扩大测程又保证精度。
 - 如果需要还可以用更多的频率测量。

差频相位检测原理

■ 调制频率越高,测量精度越高.
但是,一般相位计工作在低频区.

■ 差频后两信号都工作在低频区,但相位差仍保持高频信号的相位差 ϕ_s .

$$e_d = A \cos(\omega_d t + \varphi_0)$$

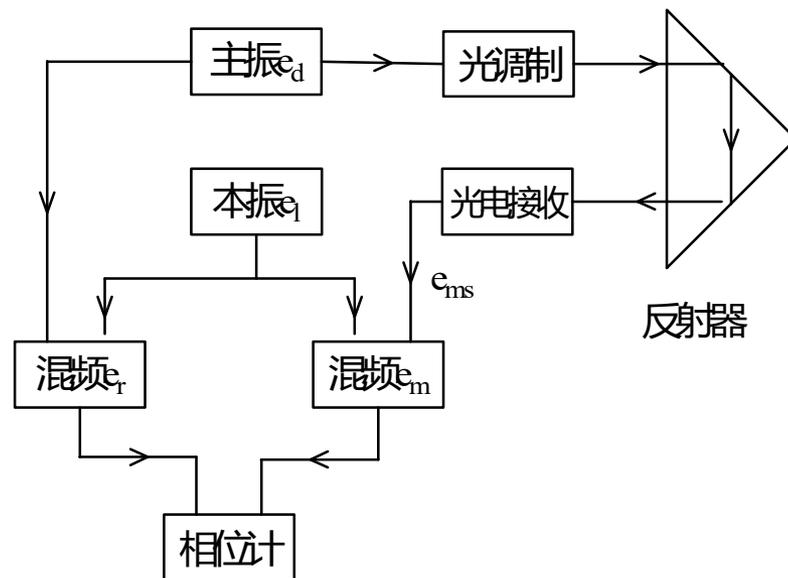
$$e_L = c \cos(\omega_L t + \theta)$$

$$e_{ms} = B \cos(\omega_d t + \varphi_0 + \varphi_s)$$

差频后:

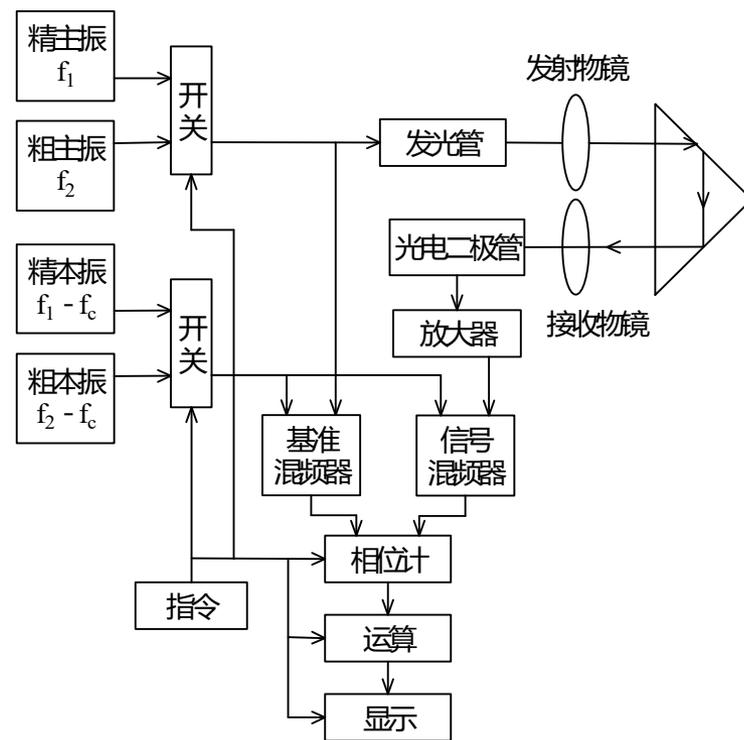
$$e_r = D \cos[(\omega_d - \omega_L)t + (\varphi_0 - \theta)]$$

$$e_m = E \cos[(\omega_d - \omega_L)t + (\varphi_0 - \theta) + \varphi_s]$$



相位激光测距仪的原理

- 精主振 f_1 (高频)和粗主振 f_2 (低频)，由开关控制依次对发光管供电进行两次测相
- 检相器只能工作于较低频率，故设立精本振频率 $f_1 - f_c$ ，粗本振频率 $f_2 - f_c$
- 基准混频器对本振电压和主振电压进行混频外差，进行外差，输出低频 f_c 的基准电压
- 信号混频器对本振电压和输出信号进行混频外差，输出低频 f_c 的信号电压
- 信号与基准电压的有相同的频率,但相位差仍保持高频信号的相位差.由相检计检出相位差.两次测相的结果输入计算电路计算得到测量结果。



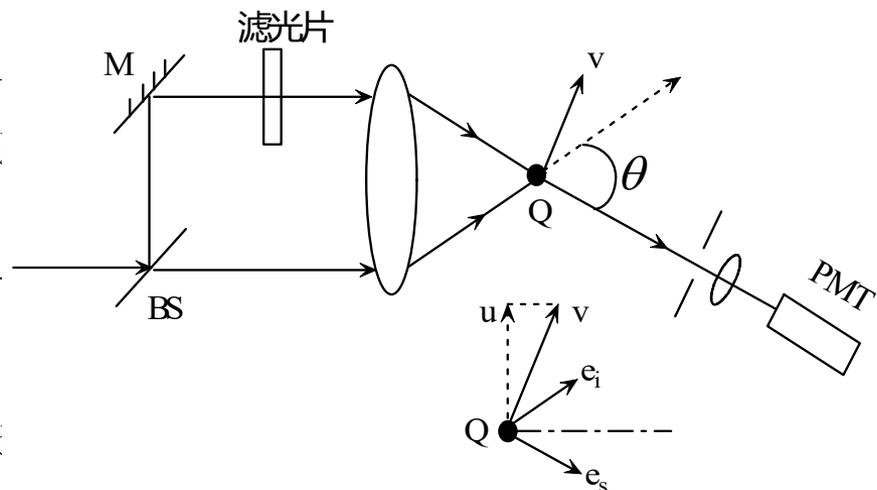
相位激光测距仪的原理图

9.3.3 激光多普勒测速

- 频率调制：运动物体的反射或散射光发生多普勒频移而改变光的频率。
- 光外差检测：可见光的频率很高（ 10^{14} Hz），一般光电器件不能响应，也就无法直接检测多普勒频移。因此，需要光外差的方法：同一光源的两束相干光以一定的条件投射到光电探测器表面进行混频，就能在输出的电信号中得到两束光的差频。

激光多普勒测速的原理

- ❖ 激光束经分光镜分成两束，透镜会聚测点，被该处正以 u 运动的微粒向四面八方散射，光发生了频移，频率为 $(\nu - \nu \cos \theta)$ 。
- ❖ 另一束经滤光片衰减后也由透镜聚于测点，有一部分穿越测点，成为参考光束，频率为 ν 。
- ❖ 进入光阑由透镜会聚到光电倍增管的光电阴极上的有两束频率相近的光，发生干涉。



参考光模式

设：两光束的夹角为 α ，光波波长为 λ ，则干涉条纹的间距为：

$$i = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

干涉条纹的空间频率为：

$$f = \frac{1}{i} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda}$$

若粒子运动的速度为 v ，运动的方向与条纹垂线的夹角为 β ，则粒子散射光的频率为：

$$f_s = f v \cos \beta = v \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta$$

只要测出散射光的频率，就可以得到粒子的速度。

激光多普勒测速的特点

- 动态响应快
- 空间分辨率高
- 流速测量范围宽
- 测量精度高

激光多普勒测速的应用

- 管道内水流流层研究；
- 流速分布 / 亚音速或超音速气流 / 旋流的测量
- 大气远距离测量；
- 风速测量
- 可燃气体火焰的流体力学研究；
- 水洞、风洞和海流测量