



《传感器技术》

主讲人：李刚



10

光电传感器 原理与应用

本章介绍光电效应、光电元件的分类、结构、工作原理、特性、应用电路，光电开关及光电断续器的原理以及光电传感器的应用实例。

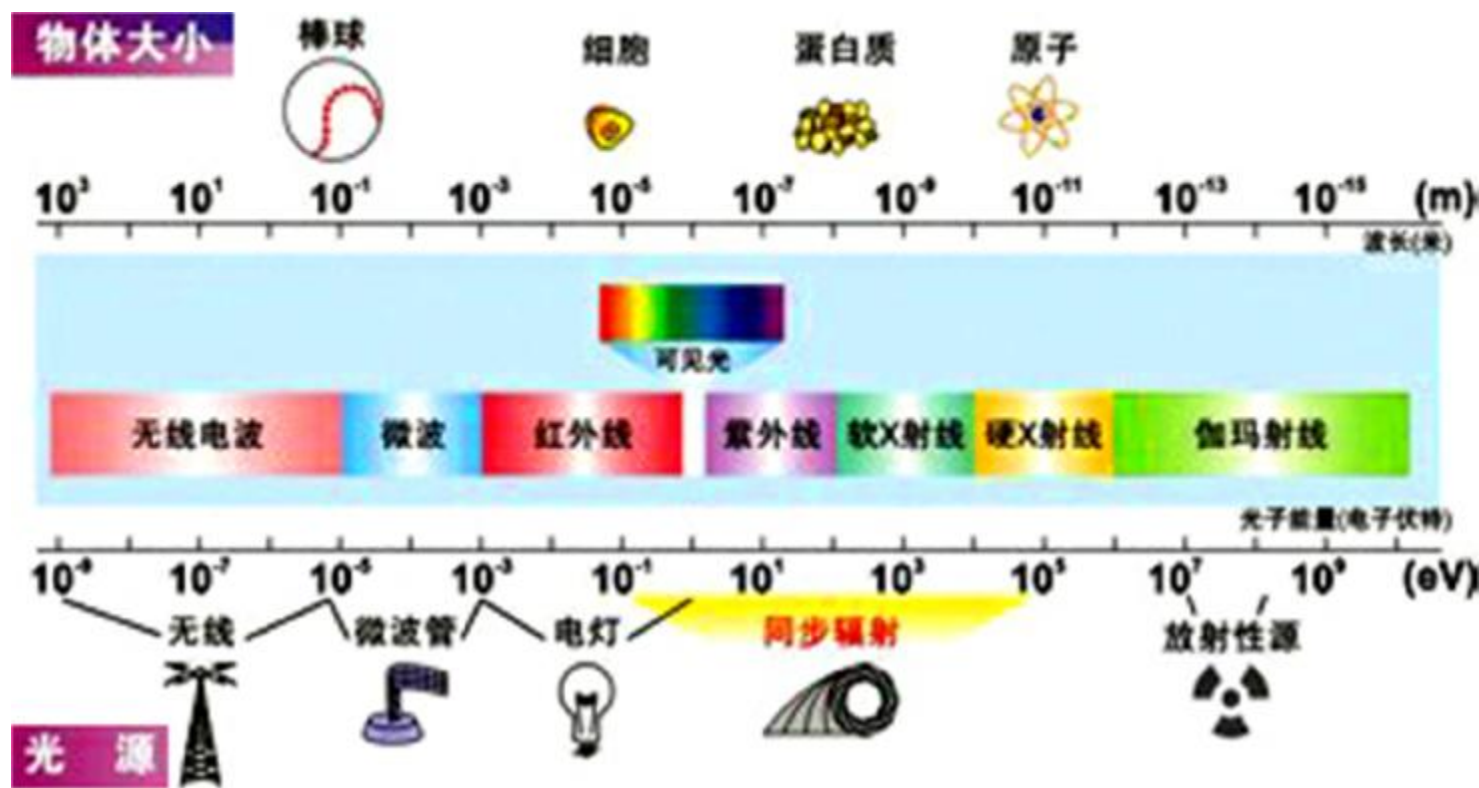
光辐射基础

光辐射的度量方法有两种，一种是物理（客观）的计量方法，称为辐射度参数，它适用于整个电磁辐射谱区，是对辐射量进行物理意义的计量；另一种是生理（主观）的计量方法，称为光度参数，光度参数只适用于可见光谱区，超过这个谱区，光度参数没有意义。

光和光谱：可见光的波长约在370~760nm范围之内。不同波长的光给人的颜色感觉也不同。波长从750nm向400nm减小时，光的颜色从红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的顺序逐渐变化。两种颜色之间没有明显的分界，而是一种颜色逐渐减少，另一种颜色逐渐增多，逐渐过渡，全部可见光波按一定比例混合在一起就形成白色光。

人眼的生理视觉效应

一般按辐射波长及人眼的生理视觉效应将光辐射分成三部分：紫外辐射、可见光和红外辐射。可见光的波长为400nm（紫色）~780nm（红色）。



光通量 Φ

能够发光的物体称为光源。光源照明的效果最终须由人眼来评定。光源在单位时间内向周围空间辐射并引起视觉的能量，称为光通量，用符号 Φ 表示，单位为流明 (lm)。一个100W白炽灯约可产生1700 lm的光通量，而一支40W白色日光灯管则可产生约3000 lm的光通量。

人眼对不同波长的光灵敏度是不一样的。比如在白天或光线较强的地方，人对黄光、绿光最灵敏。波长向红或蓝偏离越多，灵敏度越低，感觉到的光通量就越小。

当波长为555nm（相当于黄绿光）的辐射功率为1W时，人眼感觉到的光通为683lm，所以1lm相当于波长为555nm的单色辐射功率为1/683W时的光通量。

发光强度 I

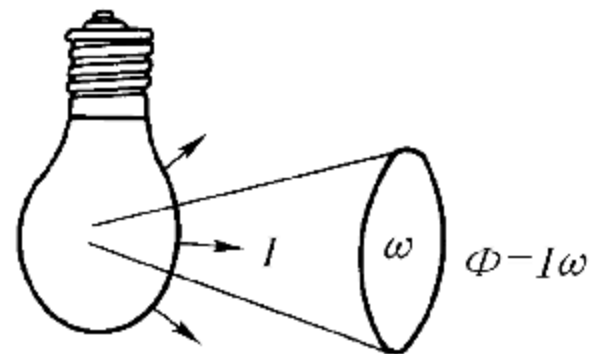
光源在空间某一特定方向上的单位立体角内辐射的光通量（光通量的密度），称为光源在该方向上的发光强度（简称光强），用符号 I 表示，单位为坎德拉（cd），其计算公式为

$$I = F / \omega$$

式中

F ——在 ω 立体角内所辐射的总的光通量 (lm)；

ω ——球面所对应的立体角 (sr)



烛光与坎德拉cd

英国定义的发光强度单位为“烛光”，已不用。

1979年第16届国际计量大会将坎德拉定义为：能发射 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ （相当于波长为555nm）的单色辐射源，若在给定方向上的辐射强度为 $(1/683) \text{W/sr}$ 时，其发光强度为1cd。

发光强度的单位是国际单位制中七个基本单位之一， $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ 的单色光是对人眼最敏感的黄绿色光。按此规定，40W和60W的白炽灯在标准条件下的发光强度约为28cd和50cd，并不与瓦数成正比。



照度 E

照度是用来表示被照面（点）上光的强弱。受照物体表面每单位面积（ 1m^2 ）上接收到的光通量称为照度，符号为 E ，单位为勒克司（ lx ）。被测光均匀并垂直照射平面时的照度 $E = \Phi / A$ 。上式中， Φ 为物体表面单位面积上接收到的总光通量， A 为被照面积，所以 1lx 等效于 $1\text{lm}/\text{m}^2$ 。

场所	照度标准值 L_x
起居室	100
读写	300
卧室	75
阅读	150
餐厅	150
厨房	100
操作台	150
卫生间	100

150 lx 是教育部门要求所有学校课堂桌面所必须达到的标准照度。

环境照度

环境状态	照度 E/lx
满月时的地面	0.2
20cm远处的烛光	10~15
黄昏室内	10
40W荧光灯正下方1.3米	90
40W白炽灯下1米	30
晚上教室桌面	>150
晴天中午室内的窗口桌面	2000~4000
阴天中午室外	6000
晴天中午室外	10000~80000

亮度

在房间内同一位置上，并排放着一个黑色和一个白色的物体，虽然它们的照度一样，但在人眼看起来，白色物体要亮得多。

这是因为人眼的视觉感觉是由被照物体的反射光在眼睛视网膜上形成的照度而产生的。视网膜上由反射光形成的照度愈高，人眼就感到愈亮。白色物体的反光要比黑色物体强得多，所以人就感到白色物体比黑色物体亮得多。

若把被视物体当作一个发光体，则视网膜上的照度是被视物体在沿视线方向上的发光强度造成的发光体在视线方向单位投影面（ 1m^2 ）上的发光强度称为该物体表面的亮度，也称为辉度，用符号 L 来表示，单位为坎德拉每平方米（ cd/m^2 ）。

常用光度学的名称、符号、单位及说明

名称	符号	单 位		说 明
光通量	Φ	流明	lm	发光体每秒所发出的光量总和
光强	I	坎德拉	cd	发光体在特定方向的单位立体角内所发射的光通量
照度	E	勒克斯	lm/m ²	发光体照射在被照物体单位面积上的光通量
亮度	L	尼脱	cd/m ²	发光体在视线方向单位投影面上的发光强度

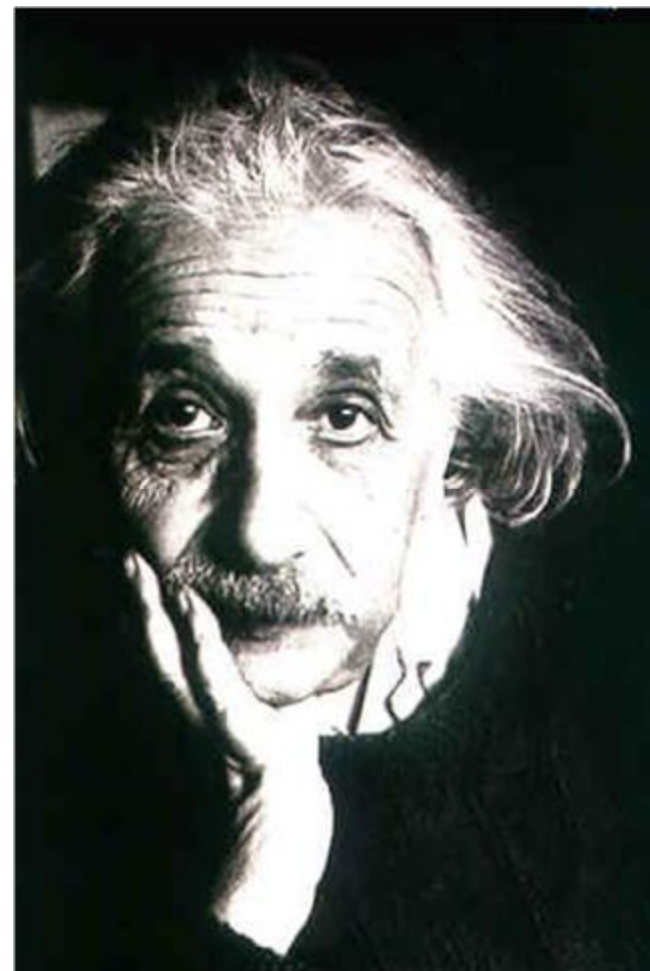


10.1 光电效应与光电元件

第一节 光电效应及光电元件

1905年德国物理学家爱因斯坦用光量子学说解释了光电效应，并为此而获得1921年诺贝尔物理学奖。

用光照射某一物体，可以看作物体受到一连串能量为 hf （或 $h\nu$ ）的光子的轰击，组成这物体的材料吸收光子能量而发生相应电效应的物理现象称为光电效应。



光电效应的分类

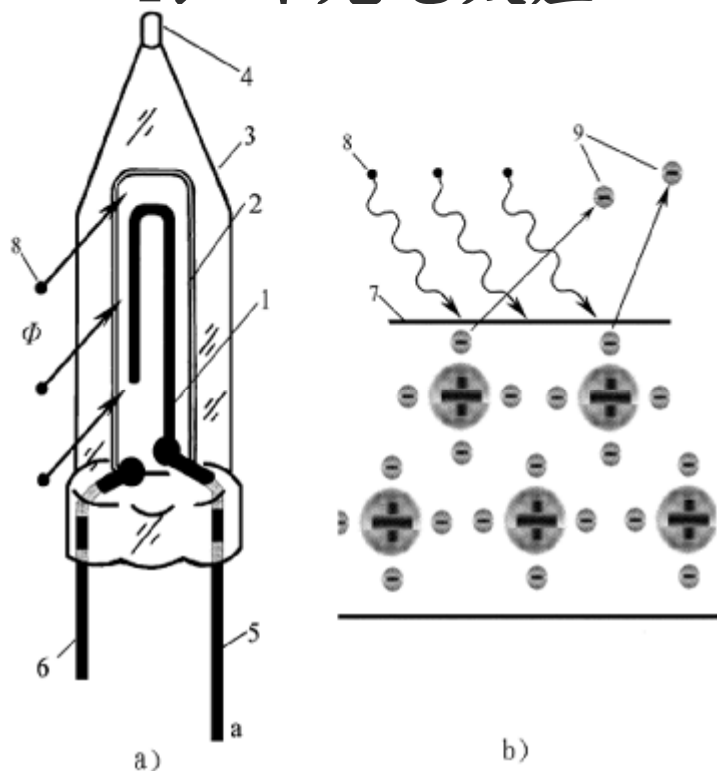
第一类：在光线的作用下能使电子逸出物体表面的现象称为外光电效应，基于外光电效应的光电元件有光电管、光电倍增管、光电摄像管等。

第二类：在光线的作用下能使物体的电阻率改变的现象称为内光电效应，也称为光电导效应。基于内光电效应的光电元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管及光敏晶闸管等。

第三类：在光线的作用下，物体产生一定方向电动势的现象称为光生伏特效应，基于光生伏特效应的光电元件有光电池等。

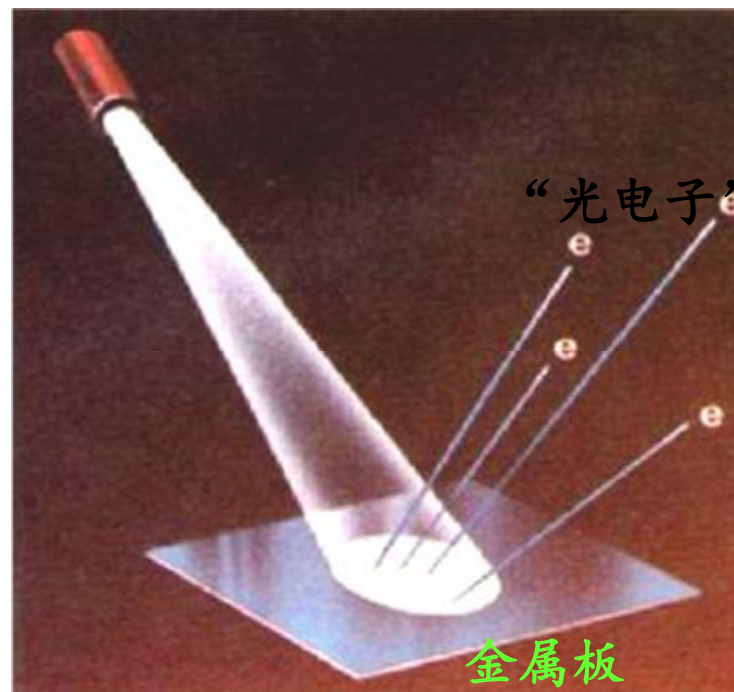
第一类光电元件属于玻璃真空管元件，第二、三类属于半导体元件。

1) 外光电效应



a) 光电管

b) 外光电效应示意



1—阳极a 2—阴极k 3—石英玻璃外壳
 4—抽气管蒂 5—阳极引脚 6—阴极引脚
 7—金属表面 8—光子 9—光致发射电子

爱因斯坦光电方程

电子逸出金属表面的速度 v 可由能量守恒定律确定：

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - W$$

式中

m ——电子质量；

W ——金属光电阴极材料的逸出功；

f ——入射光的频率；

h ——普朗克常数， $h=6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ （自第26届国际计量大会（CGPM）表决通过为精确数）。

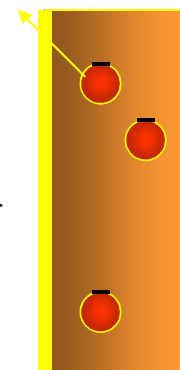
由于逸出功与材料的性质有关，当材料选定后，要使金属表面有电子逸出，入射光的频率 f 应有一最低的限度值。当 hf 小于 W 时，即使光通量很大，照射时间很长，也不可能有电子逸出，这个最低限度的频率称为红限。

几种金属逸出功的近似值(eV)

钠	铝	锌	铜	银	铂
2.46	4.08	4.31	4.70	4.73	6.35

束缚
电子

金属

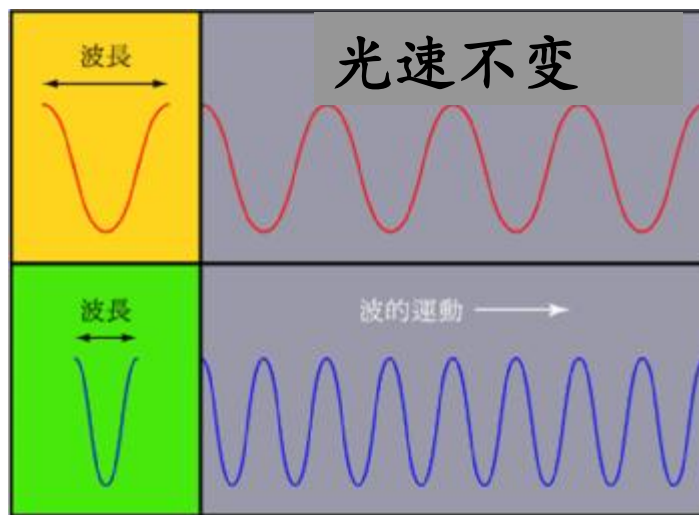


根据爱因斯坦的理论，当光子照射到物体上时，它的能量可以被物体中的某个电子吸收。电子吸收光子的能量 hf （有时也用 $h\nu$ 表示）后，能量增加。如果电子吸收的能量 hf 足够大，能够克服脱离原子所需要的能量（即电离能量） I 和脱离物体表面时的逸出功 W ，电子就能够离开金属表面，而脱逸出来，称为“光电子”。光电子的逸出方向基本与金属板垂直。

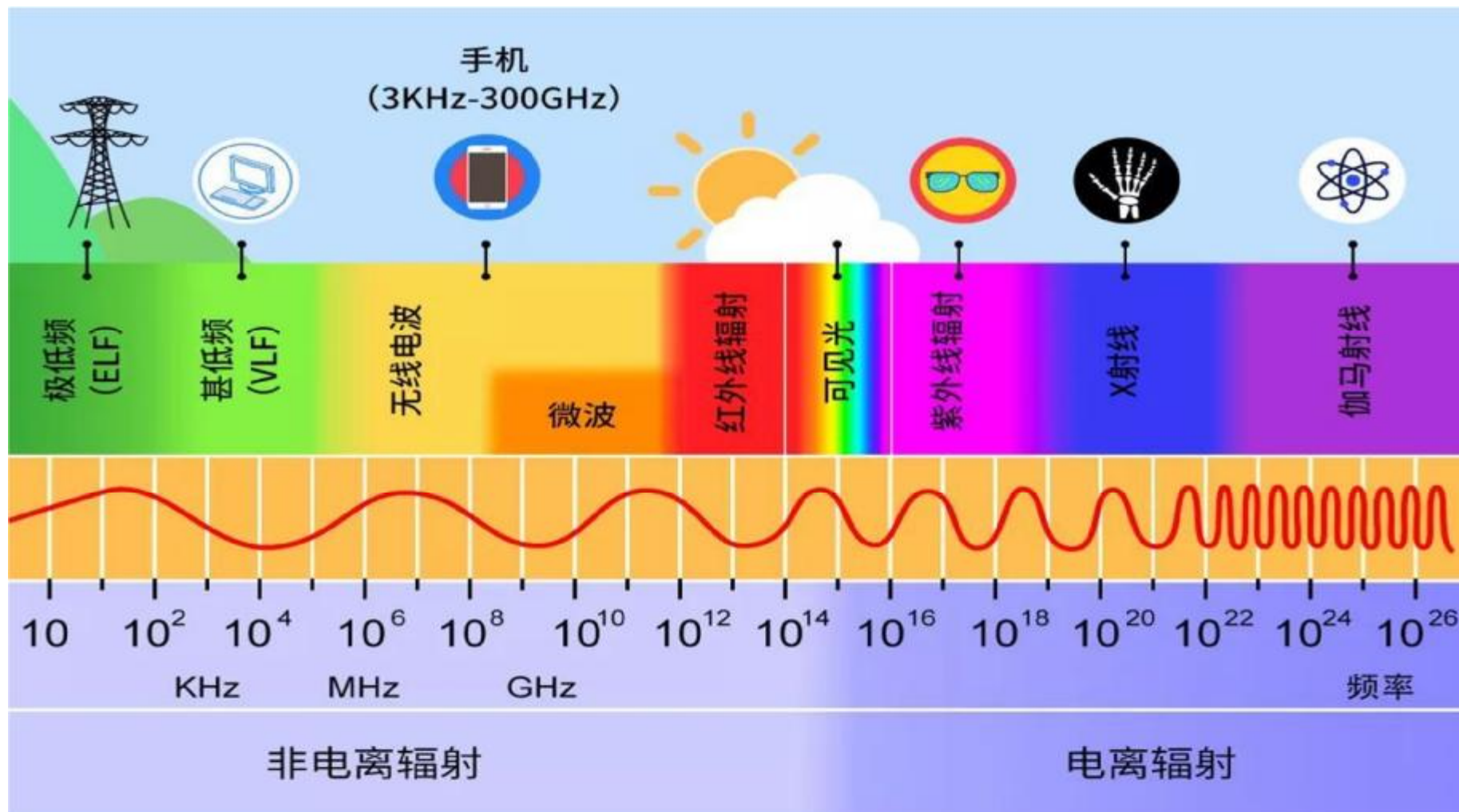
光的频率、波长、光速之间的关系

不同物质的相应的红限波长 λ 是不同的。在光电技术中，经常使用光的波长，而不是光的频率。光的波长 λ 与光的频率 f 、光速 c 之间的关系为 $\lambda = c/f$ ， $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

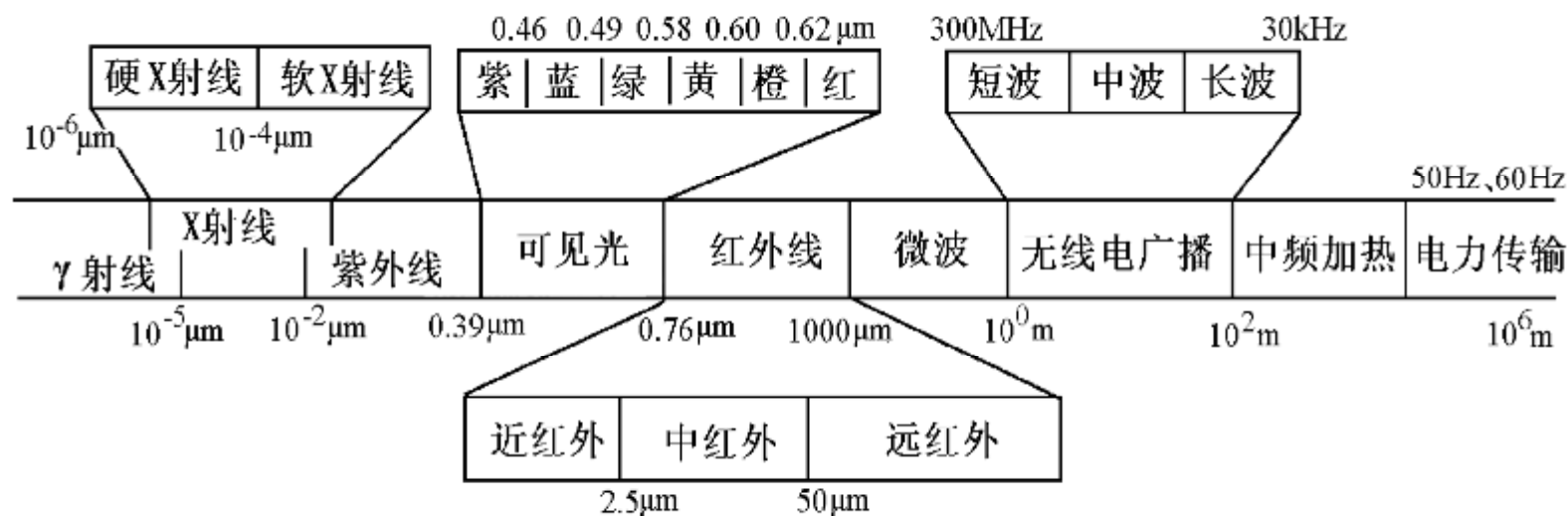
当 hf 大于 W 时，光通量越大，撞击到阴极的光子数目也越多，逸出的电子数目也越多，光电流 I_0 就越大。



电磁波频谱（光是一种电磁波）

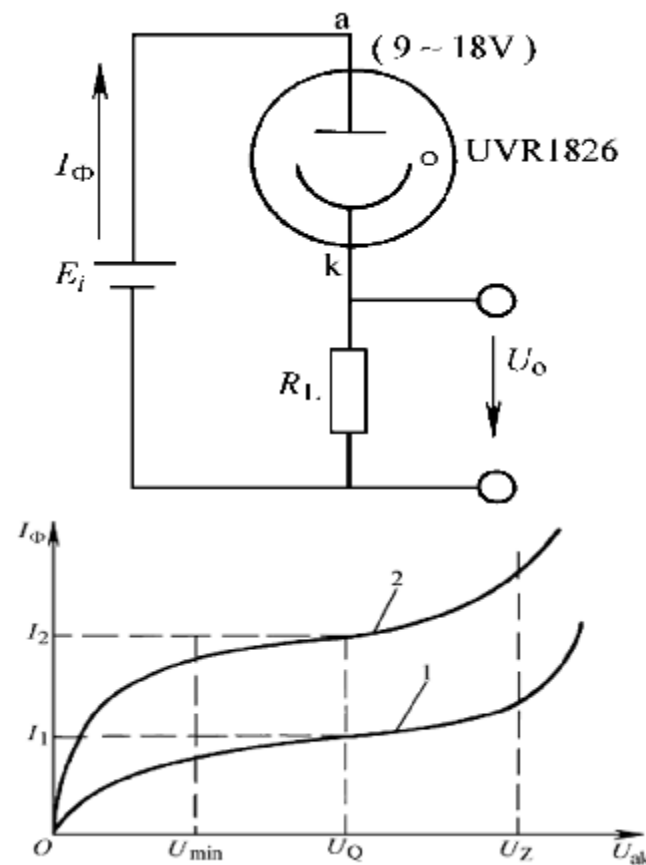


电磁波频谱（光是一种电磁波）



光电管电路及特性

金属阳极a和阴极k封装在一个石英玻璃壳内。当入射光照射在阴极板上时,光子的能量传递给阴极表面的电子,当电子获得的能量足够大时,电子就可以克服金属表面对它的束缚而逸出金属表面,形成电子发射。当光电管阳极加上数十伏电压时,从阴极表面逸出的“光电子”被具有正电压的阳极所吸引,在光电管中形成电流,简称为光电流,光电流 I_ϕ 正比于光电子数,而光电子数又正比于光照度。



1 一低照度时的曲线

2 一紫外线增强时的曲线

光电倍增管

外光电效应的典型元器件还有光电倍增管。它的灵敏度比上述光电管高出几万倍以上，在星光下就可以产生可观的电流，光通量在 $10^{-14} \sim 10^{-6} \text{lm}$ （流明）的很大变化区间里，其输出电流均能保持线性。

因此光电倍增管可用于微光测量，如探测高能射线产生的辉光等。但由于光电倍增管是玻璃真空器件，体积大、易破碎，工作电压高达上千伏，所以目前已逐渐被新型半导体光敏元件所取代。

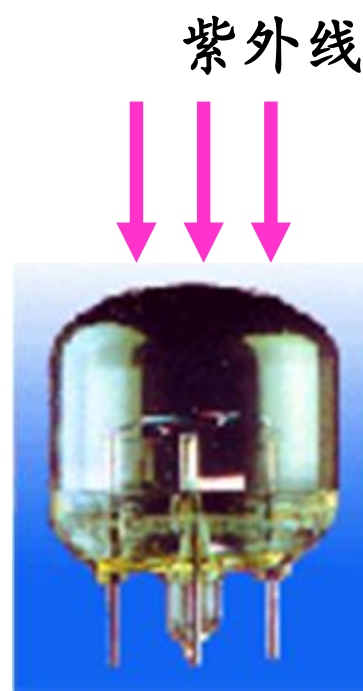
微弱
光照



紫外光电管

当入射紫外线照射在紫外管阴极板上时，电子克服金属表面对它的束缚而逸出金属表面，形成电子发射。紫外管多用于紫外线测量、火焰监测等。可见光较难引起光电子的发射。

火焰的辐射光中包含了较大比例的紫外光，有别于灯光，以及纯粹的高温红外辐射。



玻壳用对紫外线透光率较好的石英材料制造



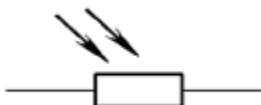
二、基于内光电效应的光电元件

1. 光敏电阻

在半导体光敏材料两端装上电极引线，将其封装在带有透明窗的管壳里就构成光敏电阻。为了增加灵敏度，两电极常做成梳状。

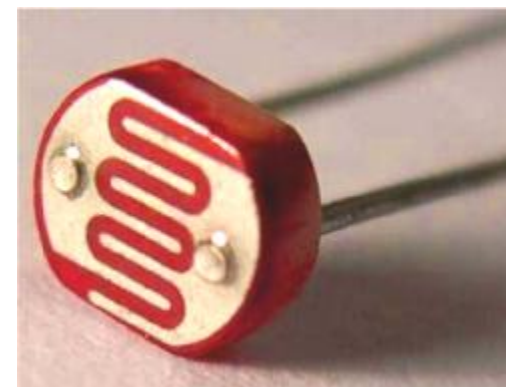
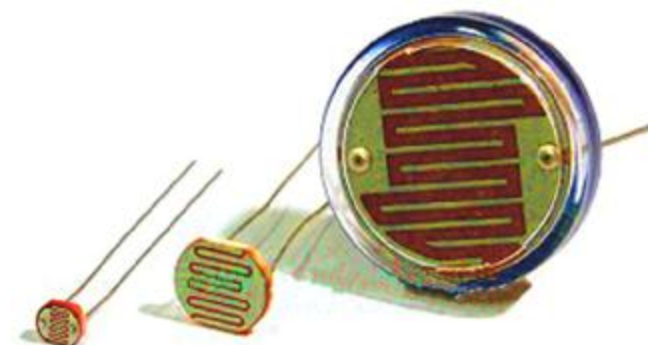
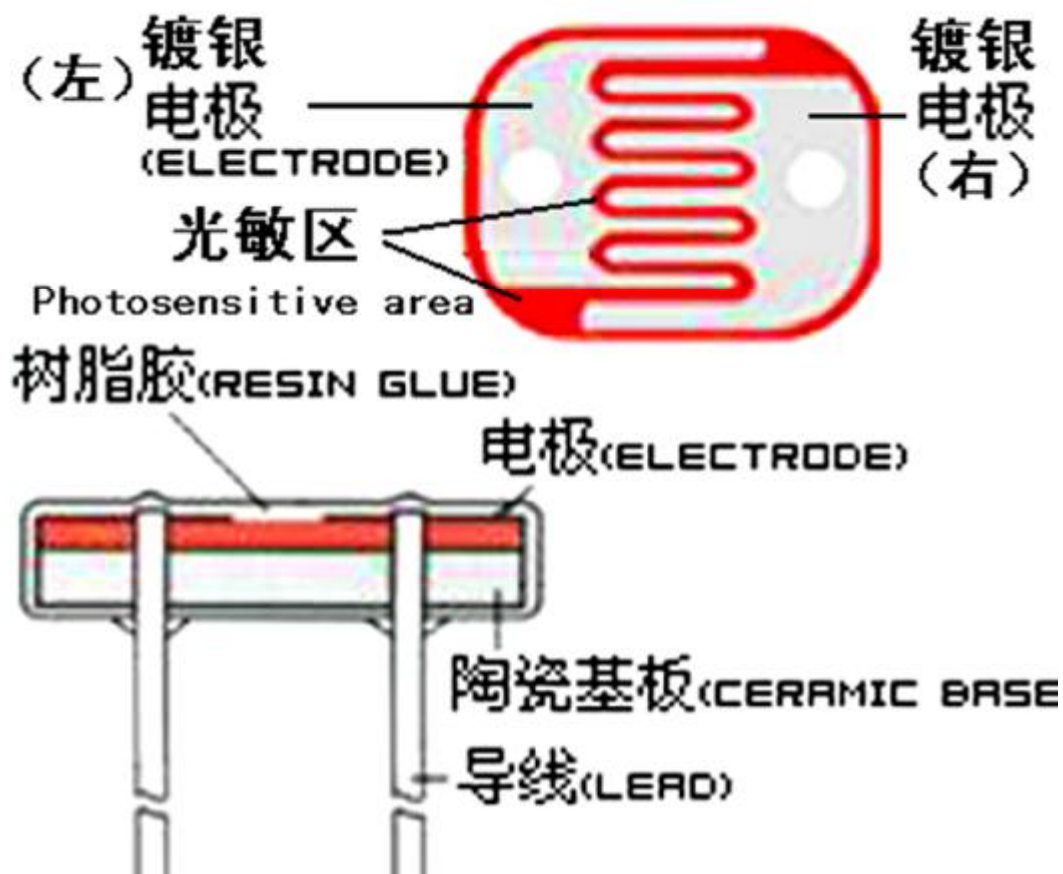
光敏电阻的图形符号：

构成光敏电阻的材料有：



金属的硫化物(如CdS)、硒化物、碲化物等半导体。半导体的导电能力取决于半导体载流子数目的多少。当光敏电阻受到光照时，若光子能量 hf 大于该半导体材料的禁带宽度，则价带中的电子吸收光子能量后，跃迁到导带，成为自由电子，同时产生空穴，电子-空穴对的出现使电阻率变小。光照越强，光生电子-空穴对就越多，阻值就越低。入射光消失，电子-空穴对逐渐复合，电阻也逐渐恢复原值。

光敏电阻外形及结构



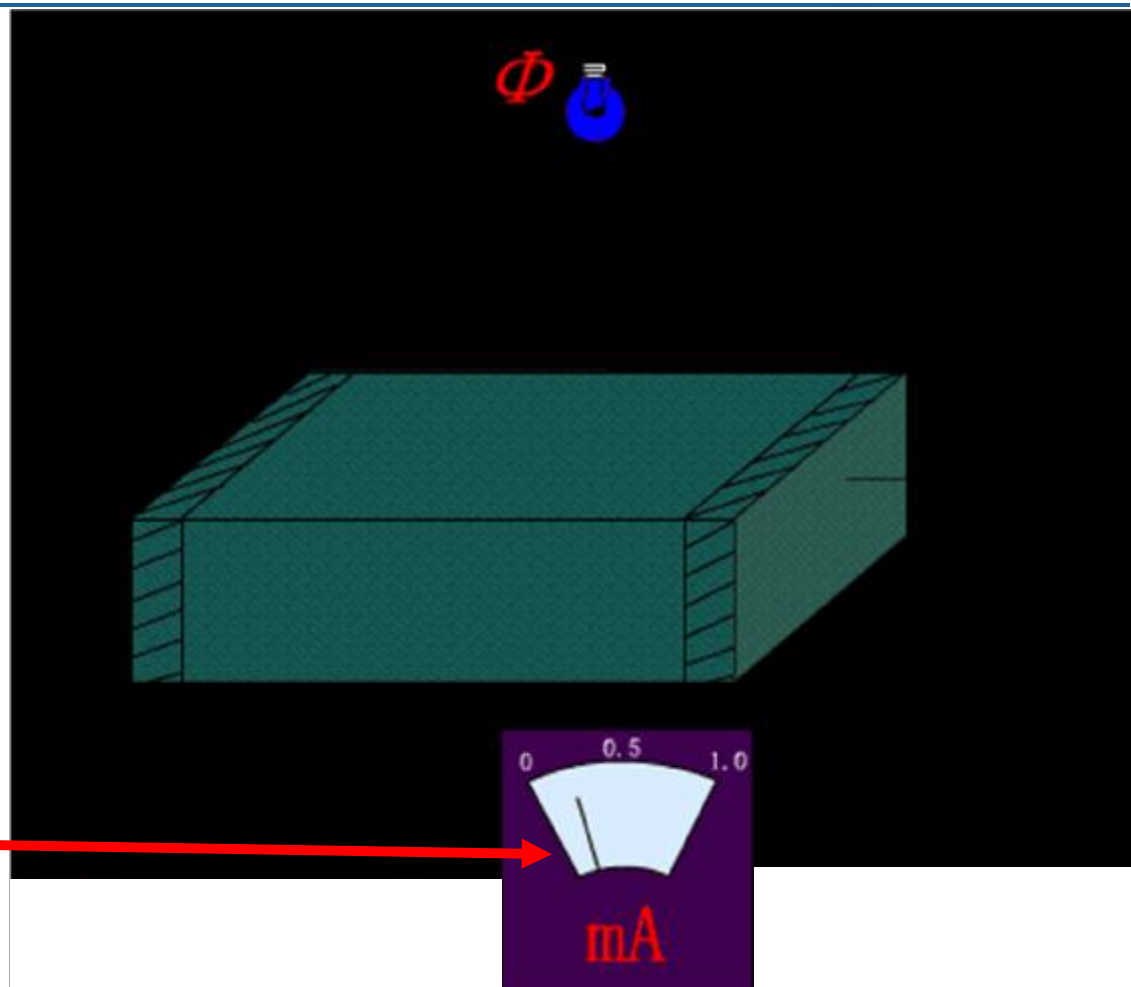
当光敏电阻受到光照时，
左右电极之间的阻值减小。

光敏电阻原理演示

当光敏电阻受到光照时，
光生电子-空穴对增加，阻值
减小，电流增大。

光照产生的电流
称为亮电流

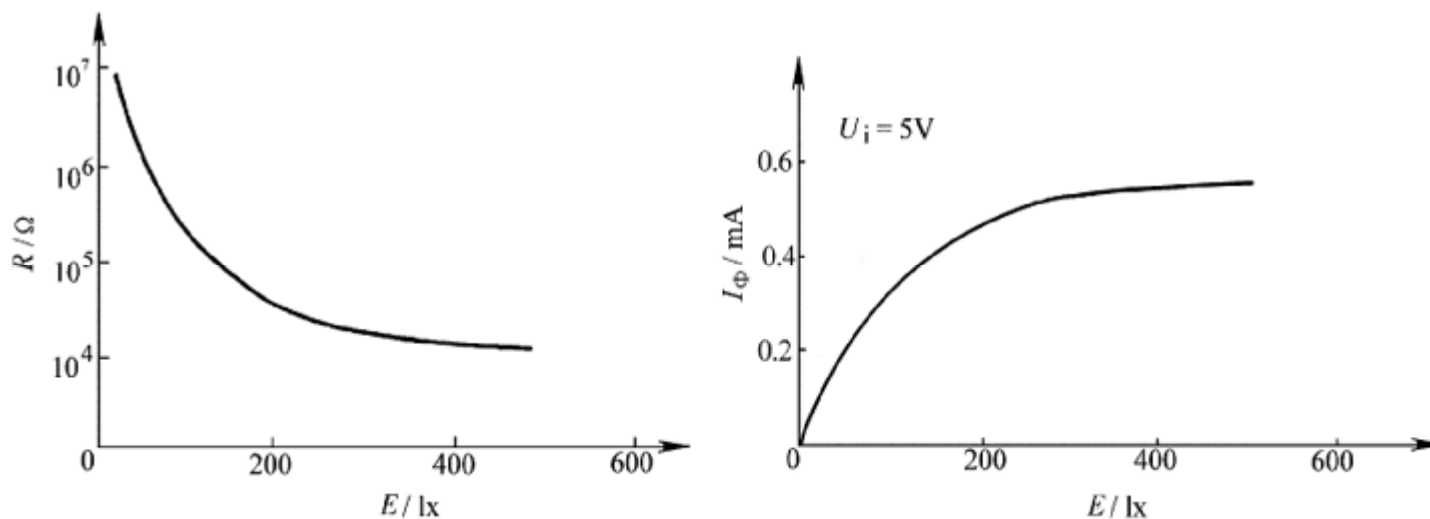
暗电流
(温度升高，暗电增大)



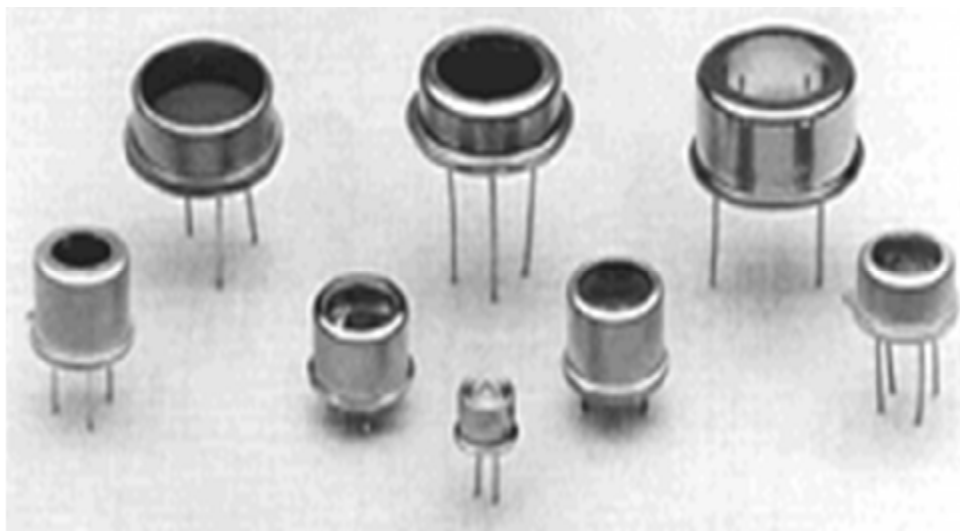
光敏电阻的特性和参数

1) 暗电阻：置于室温、全暗条件下测得的稳定电阻值称为暗电阻，通常大于 $1\text{M}\Omega$ 。光敏电阻受温度影响甚大，温度上升，暗电阻减小，暗电流增大，灵敏度下降，这是光敏电阻的一大缺点。

2) 光电特性：在光敏电阻两极电压固定不变时，光照度与电阻及电流间的关系称为光电特性(非线性严重)



3) 响应时间: 光敏电阻受光照后, 光电流需要经过一段时间(上升时间)才能达到其稳定值。同样, 在停止光照后, 光电流也需要经过一段时间(下降时间)才能恢复到其暗电流值, (时延特性)。光敏电阻的上升响应时间和下降响应时间约为 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{s}$, 光敏电阻不能用在要求快速响应的场合。

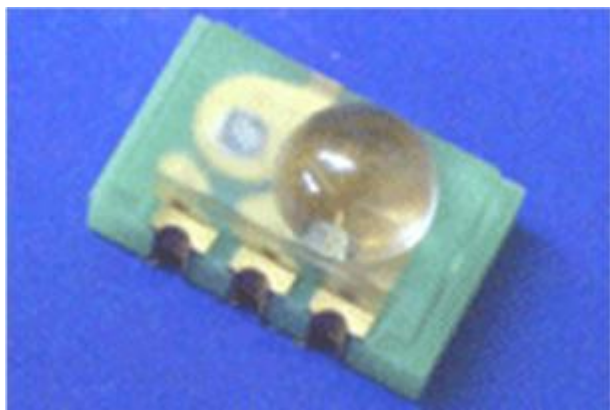


部分光敏电阻的特性参数

规格	型号	最大电压 (VDC)	最大功耗 (mW)	环境温度 (℃)	光谱峰值 (nm)	亮电阻 (10Lux) (KΩ)	暗电阻 (MΩ)	响应时间 mS	
								上升	下降
Φ3 系列	GL3516	100	50	-30~ +70	540	5-10	0.6	30	30
	GL3526	100	50	-30~ +70	540	10-20	1	30	30
	GL3537-1	100	50	-30~ +70	540	20-30	2	30	30
	GL3537-2	100	50	-30~ +70	540	30-50	3	30	30
	GL3547-1	100	50	-30~ +70	540	50-100	5	30	30
	GL3547-2	100	50	-30~ +70	540	100-200	10	30	30

二、光敏管

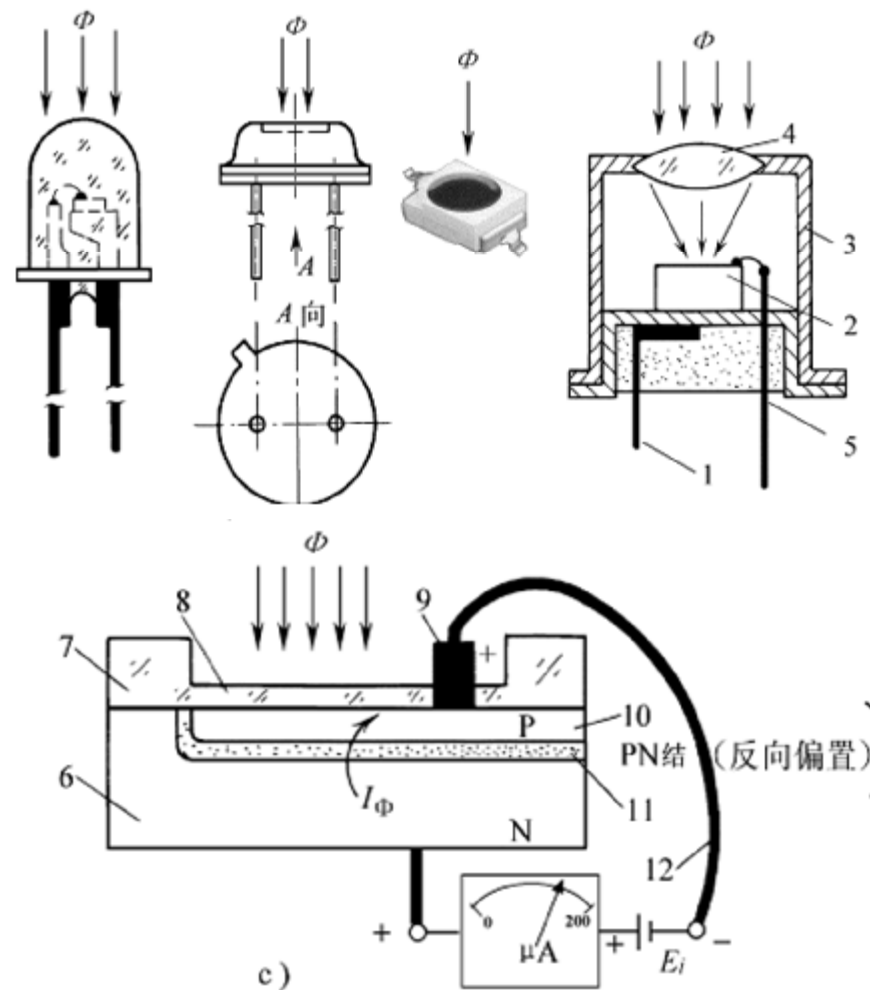
光敏二极管、光敏晶体管、光敏晶闸管等统称为光敏管，它们的工作原理是基于内光电效应。光敏晶体管的灵敏度比二极管高，但频率特性较差，暗电流也较大。目前还研制出光敏晶闸管，它的导通电流比光敏晶体管大得多，工作电压有的可达数百伏，因此输出功率大，主要用于光耦合器（俗称光电耦合器）中。



光敏二极管的结构

光敏二极管的PN结被设置在透明管壳顶部的正下方，可以直接受到光的照射。

- 1—负极引脚 2—管芯
- 3—外壳 4—玻璃聚光镜
- 5—正极引脚 6—N型衬底
- 7— SiO_2 保护圈
- 8— SiO_2 透明保护层
- 9—铝引出电极
- 10—P型扩散层
- 11—耗尽层 12—金丝引出线



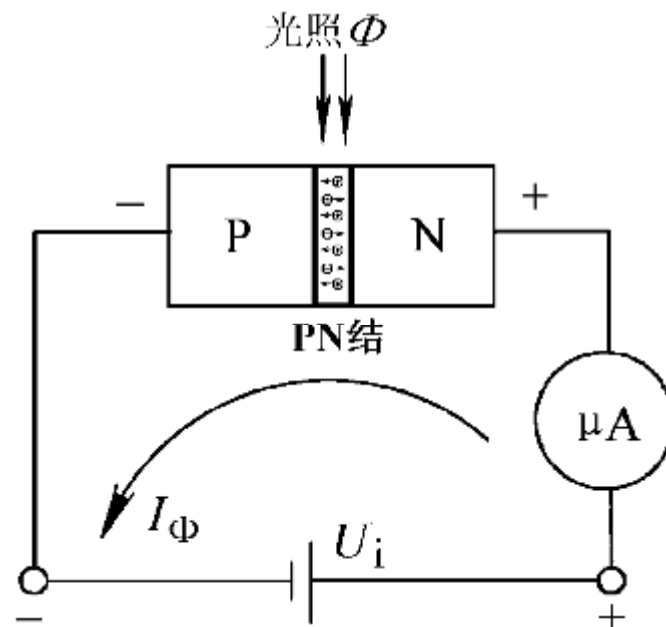
光敏二极管的工作原理

没有光照时，由于二极管反向偏置，所以反向电流很小，称为暗电流，相当于普通二极管的反向饱和漏电流。

当合适波长的光照射在光敏二极管的PN结（又称耗尽层）

上时，原子中的电子吸收光子的能量，变成自由光子。相应地，产生同样数量的空穴。

光照增强，产生的电子-空穴对数量也随之增加，在外加的反向电压的作用下，电子漂移到N区，空穴漂移到P区，从而产生反向电流电流（称为光电流），光电流与照度成正比。



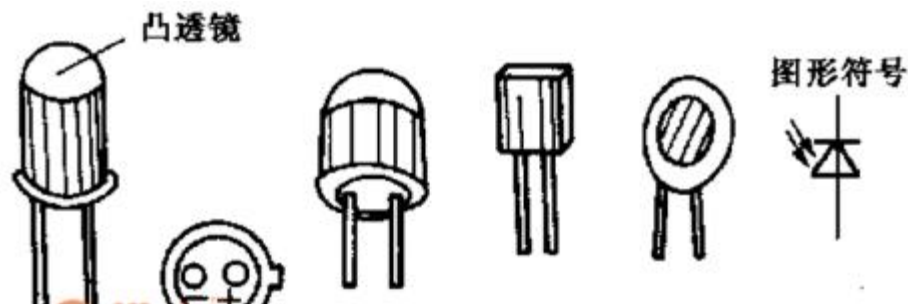
部分光敏二极管特性参数

1) 2DU (A)型、方型光通有效面积 $1\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 。

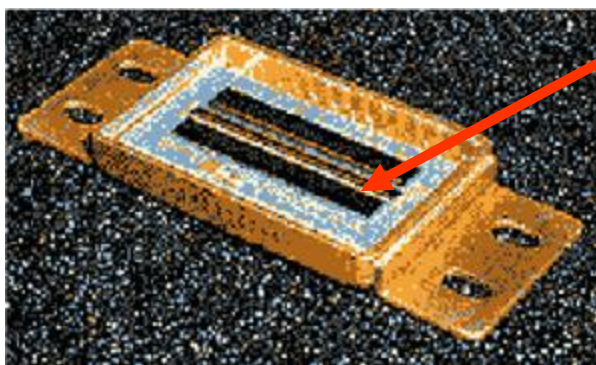
参 数	中 心 暗 电 流	环 电 流	光 电 流	灵 敏 度	响 应 时 间	结 电 容	正 向 压 降
单 位	μA	μA	μA	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$	s	pF	V
测 试 条 件 型 号	- 50V	- 50V	- 50V 在 1000lx 照 度 下	- 50V 入 射 光 波 长 0.9μ	- 50V $R_L =$ 1k Ω	- 50V 测 试 频 率 $f_c = 1\text{kHz}$	正 向 电 流 10mA
2DU1A	< 0.1	< 3	6	≥ 0.4	10^{-7}	2 ~ 3	< 10
2DU2A	0.1 ~ 0.3	3 ~ 10	6	≥ 0.4	10^{-7}	2 ~ 3	< 10
2DU3A	0.3 ~ 1.0	10 ~ 30	6	≥ 0.4	10^{-7}	2 ~ 3	< 10

光敏二极管实物照片

将光敏二极管的PN结设置在透明管壳顶部的正下方，光照射到光敏二极管的PN结时，电子-空穴对数量增加，光电流与照度成正比。



光敏二极管外形



包含1024个InGaAs元件的线性光电二极管阵列，可用于分光镜等。



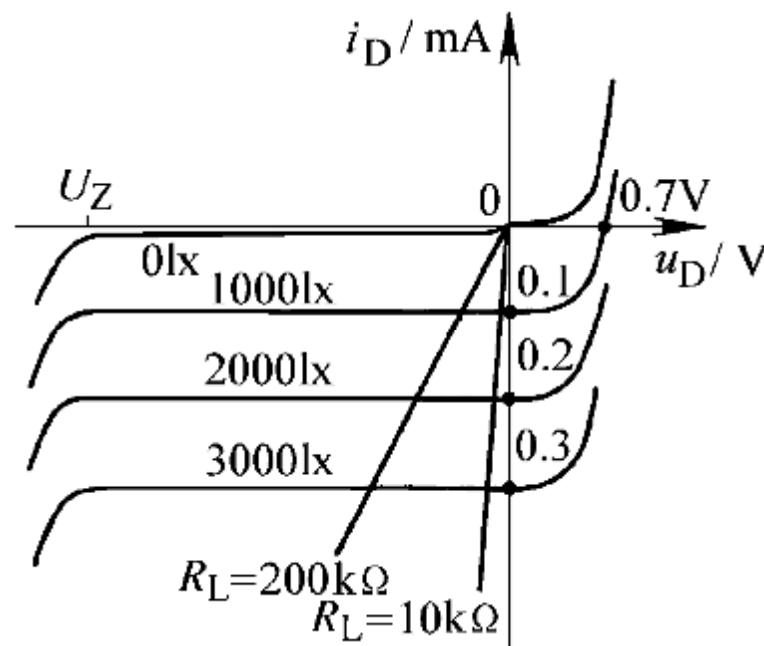
光敏二极管伏安特性及红外发射、接收对管



红外发射管



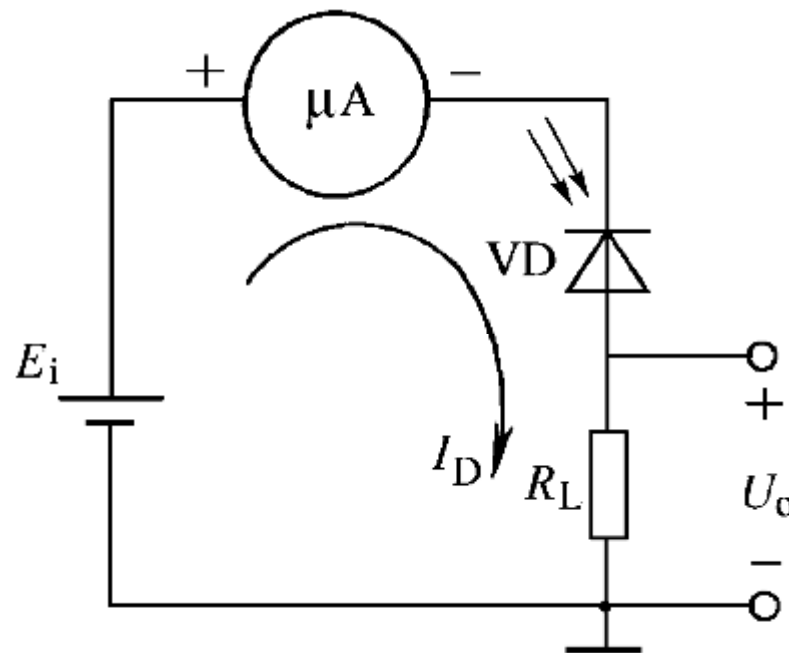
红外接收管



光敏二极管的伏安特性

光敏二极管的反向偏置接法

在没有光照时，由于二极管反向偏置，所以反向电流很小，这时的电流称为暗电流，相当于普通二极管的反向饱和漏电流。当光照射在二极管的PN结（又称耗尽层）上时，在PN结附近产生的电子-空穴对数量也随之增加，光电流也相应增大，光电流与照度成正比。

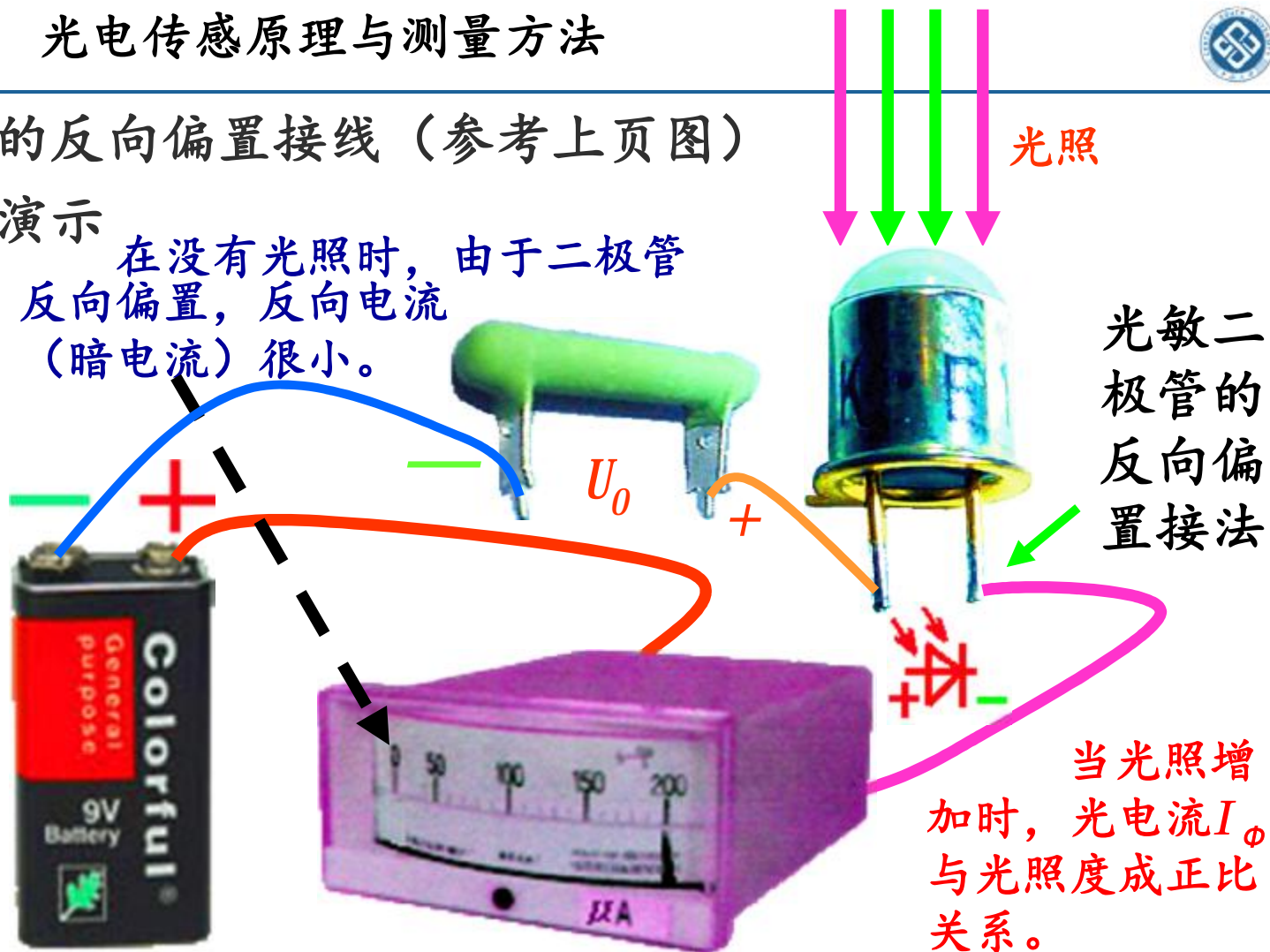


电路的输出电压 U_o 与光电流 I_D 成正比，在一定范围内，与光照度 E 成正比。

光敏二极管的反向偏置接线（参考上页图）

及光电特性演示

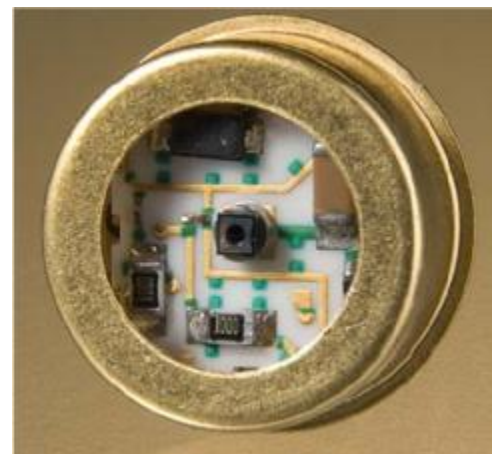
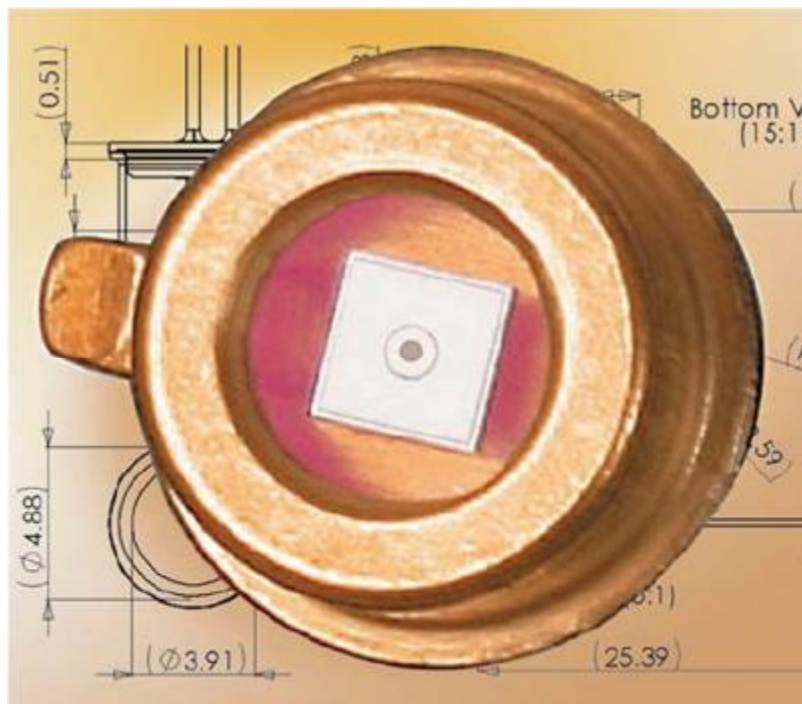
在没有光照时，由于二极管反向偏置，反向电流（暗电流）很小。



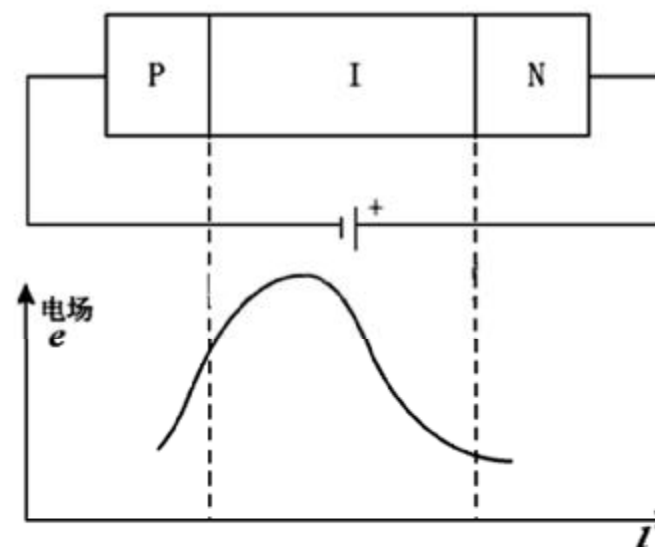
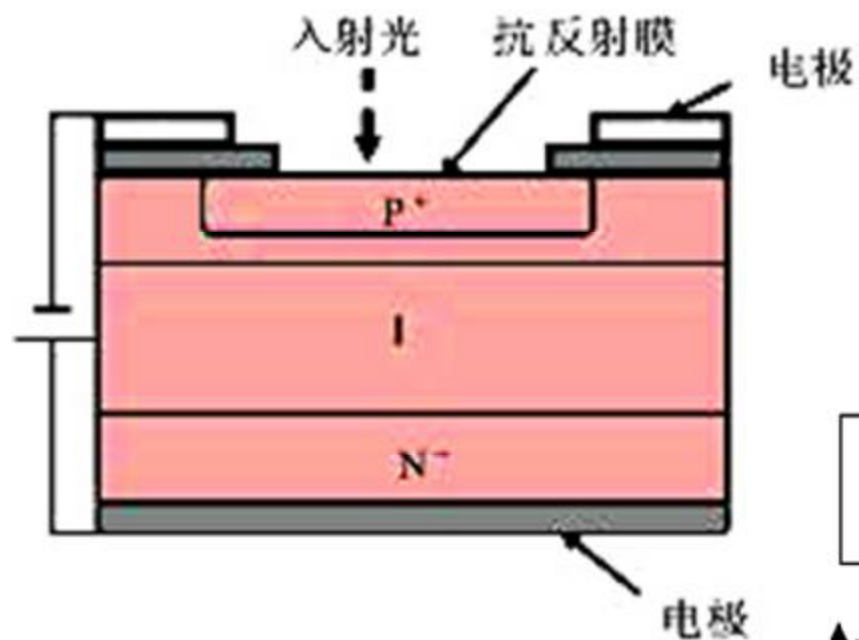
特殊光敏二极管——PIN二极管

PIN光敏二极管是在P区和N区之间插入一层较厚的I本征半导体层，从而使PN结的间距加宽，结电容变小(几个pF)。因此，PIN光敏二极管的频带较宽，可达GHz数量级。PIN光敏二极管的工作电压（反向偏置电压）只需十几伏，光电转换效率较高，灵敏度比普通的光敏二极管高得多。特殊结构的PIN二极管可用于测量紫外线、X射线或 γ 射线。PIN光敏二极管的缺点是I层电阻较大，输出电流较小，一般多为微安数量级，没有倍增效应。目前已将PIN管与前置运算放大器集成在同一硅片上，并封装于一个管壳内，用于较短距离的光纤通信。

PIN二极管



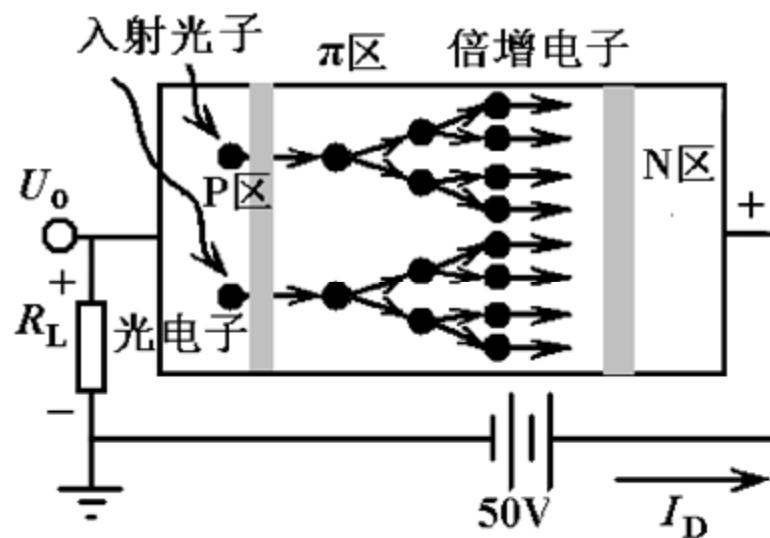
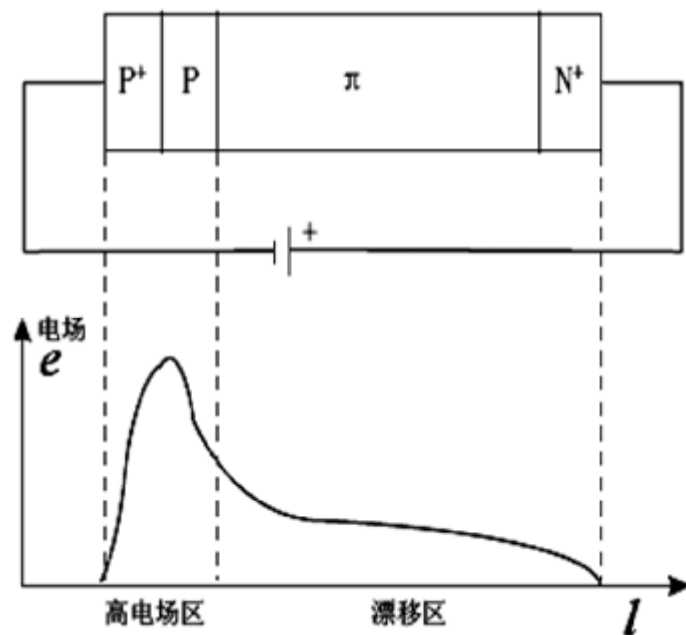
PIN二极管的PN结与内部电场



特殊光敏二极管——APD二极管

APD光敏二极管(雪崩光敏二极管)是一种具有内部倍增放大作用的光敏二极管,灵敏度比PIN大几百倍。当有一个光子从外部射入到其PN结上时,将产生一个电子空穴对。由于PN结上施加了较高的工作电压(约100V),接近于反向击穿电压。PN结中的电场强度可达 10^4V/mm 数量级,因此能将光子所产生的光电子加速到具有很高的动能,撞击其他原子,产生新的电子空穴对,如此多次碰撞,以致最终造成载流子按几何级数剧增的“雪崩”效应,形成对原始光电流的放大作用,增益可达几千倍,而雪崩产生和恢复所需的时间可小于10ns,适用于微光信号检测以及长距离光纤通信,可以取代光电倍增管。APD光敏二极管的主要缺点:噪声大。若有用光电信号只有几个毫微瓦(nW),就会被噪声淹没。

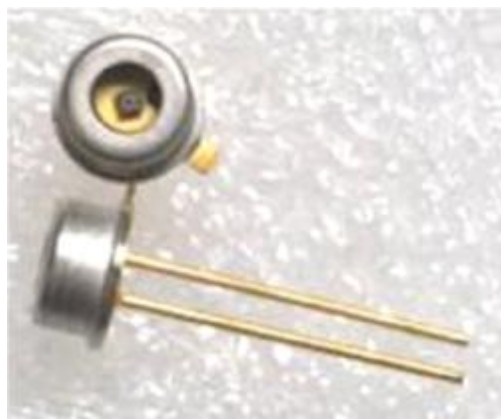
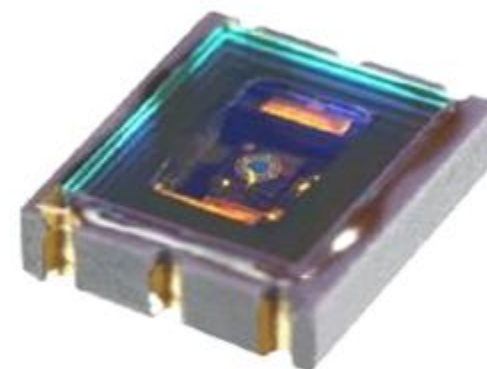
APD光敏二极管的PN结、内部电场分布 及电子倍增



APD载流子雪崩式倍增示意图

APD光敏二极管的 外形及用途

APD二极管适用于微光测量和光纤通信。



GD3250系列硅雪崩光电二极管的特性参数

参数	单位	GD3250-A	GD3250-B	GD3250-C
光敏面直径	mm	0.2	0.5	0.8
工作电压	V	100~150	100~150	150~250
暗电流	nA	≤15	≤25	≤35
响应度	V/w	60	60	60
上升时间	ns	≤1	≤3	≤4
噪声等效功率	Pw/Hz ^{1/2}	0.05	0.07	0.09
结电容	pF	≤1	≤1.5	≤2
使用温度范围	°C	-20~+40	-20~+40	-20~+40
封装形式		TO型 光纤型	TO型	TO型

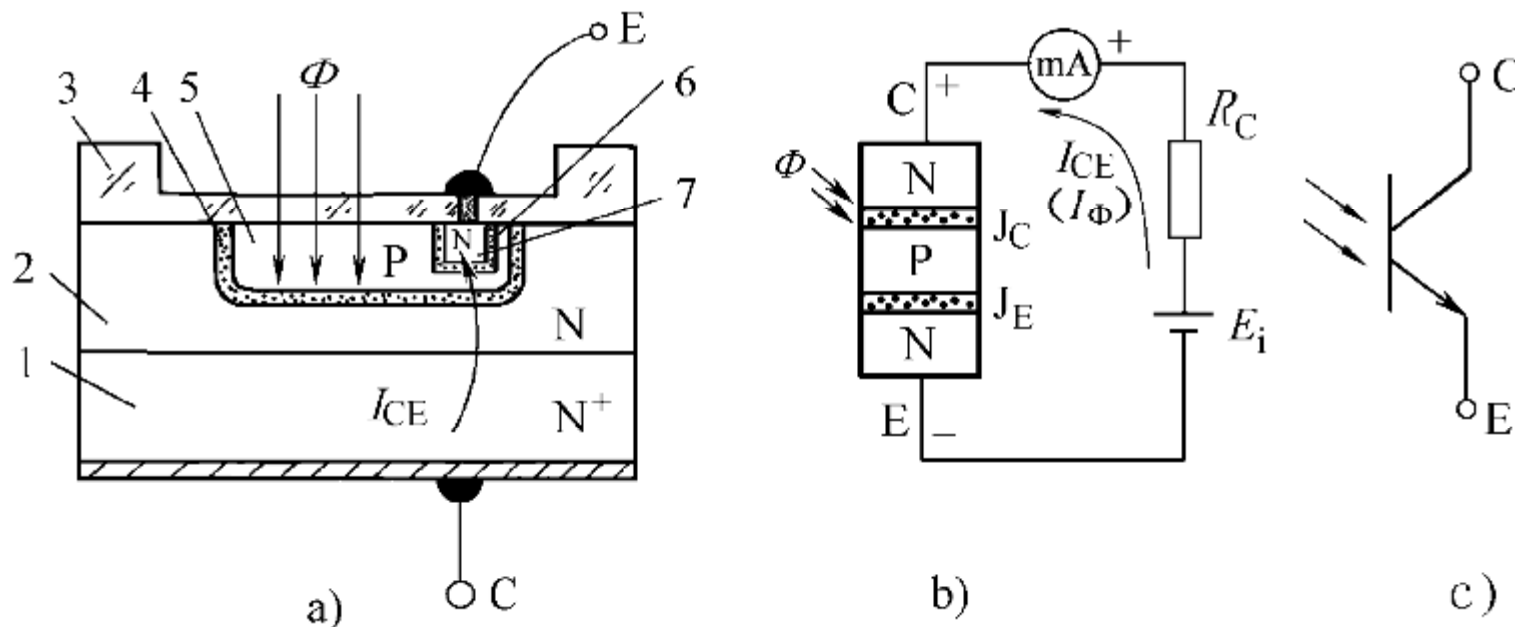
InGaAs近红外增强雪崩二极管特性

材料	InGaAs-APD
工作波长/ μm	1.55
量子效率/%	75
响应度/ AW^{-1}	0.94
暗电流/nA	20
检测带宽/GHz	3.0
附加电容/pF	0.5
典型应用	2.5Gb/s

光敏晶体管

光敏晶体管又称“光敏三极管”，它有两个PN结。与普通晶体管相似，有电流增益，灵敏度比光敏二极管高。多数光敏晶体管的基极没有引出线，只有正负（C、E）两个引脚，所以其外型与光敏二极管相似，从外观上很难区别。

光敏晶体管的结构

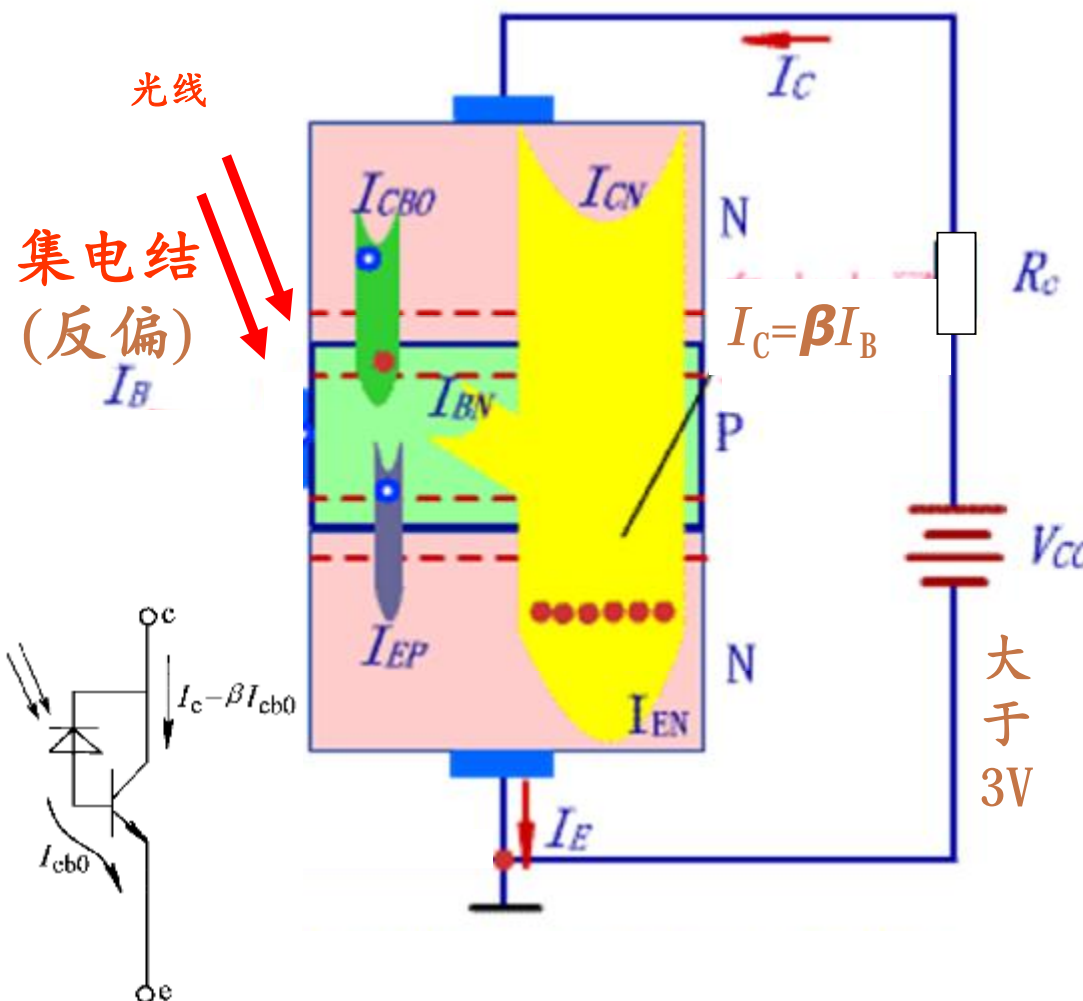


a) 管芯结构 b) 结构简化图 c) 光敏晶体管图形符号 1—N⁺衬底 2—N型集电区
3—透光SiO₂保护圈
4—集电结J_C 5—P型基区 6—发射结J_E 7—N型发射区

NPN型光敏晶体管的电流增益

光敏晶体管的集电结反偏，发射结正偏，有电流增益。

入射光子在集电结附近产生电子-空穴对，集电极电流 I_C 是原始光电流的 β 倍。



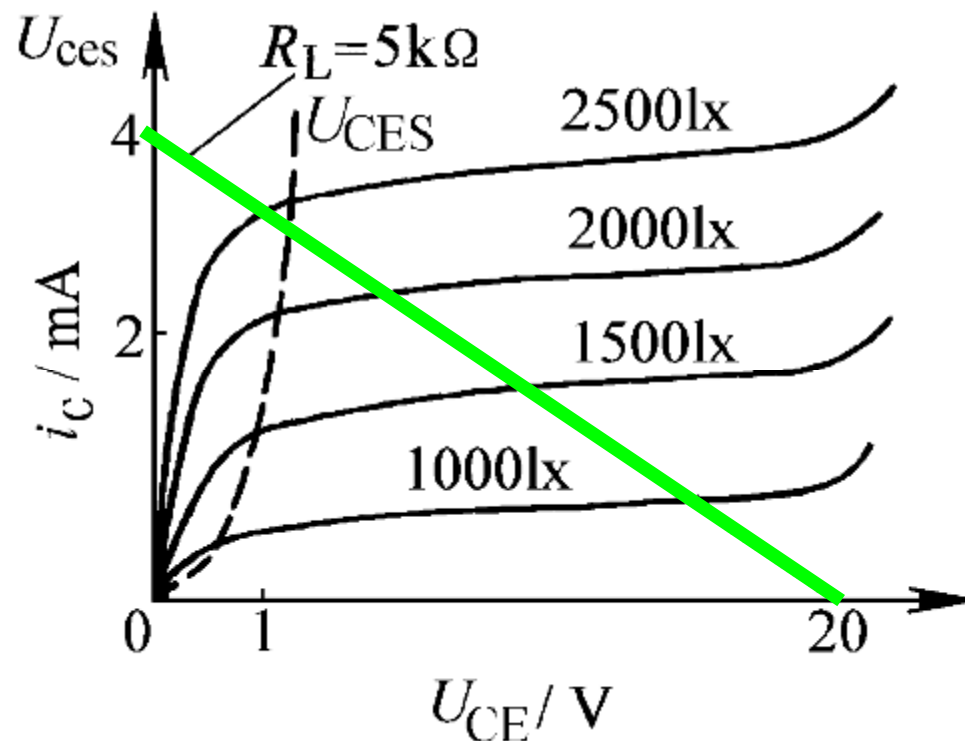
光敏三极管的外形

多数只有C、E
两个电极



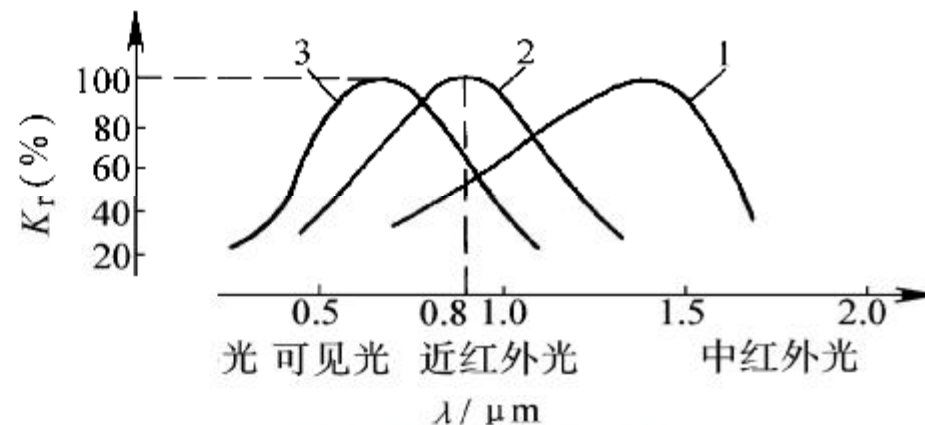
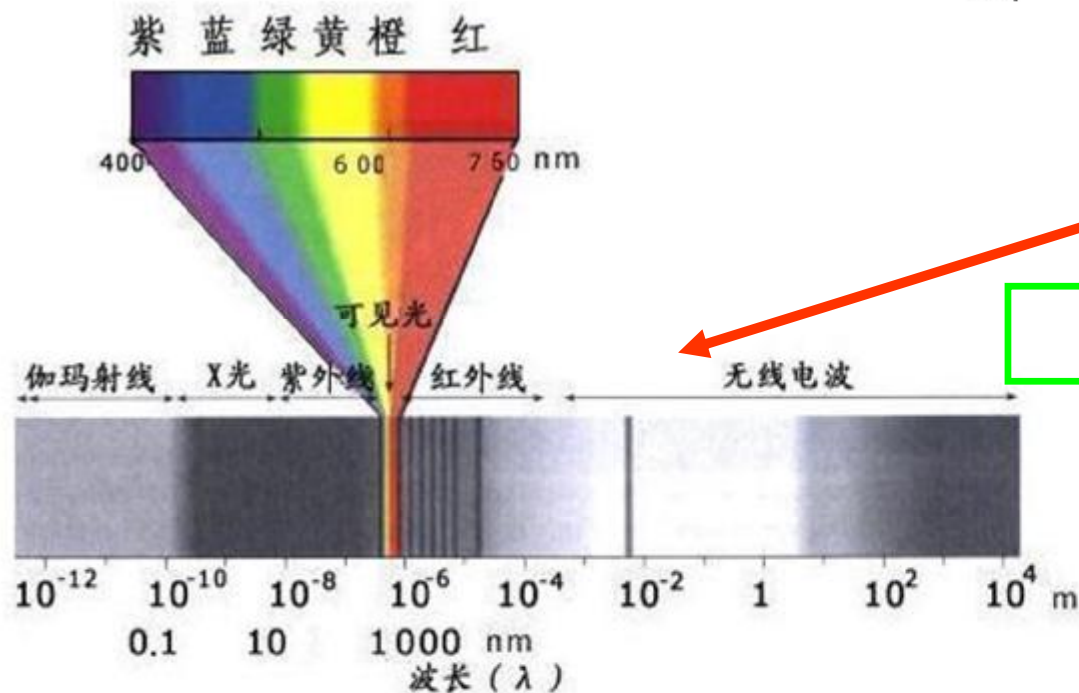
硅光敏晶体管的伏安特性

光敏晶体管在不同照度下的伏安特性与一般晶体管在不同基极电流下的输出特性相似。光敏晶体管的工作电压一般应大于3V。若在伏安特性曲线上作负载线，便可求得某光强下的输出电压 U_{CE} 。



硅光敏晶体管

的光谱特性



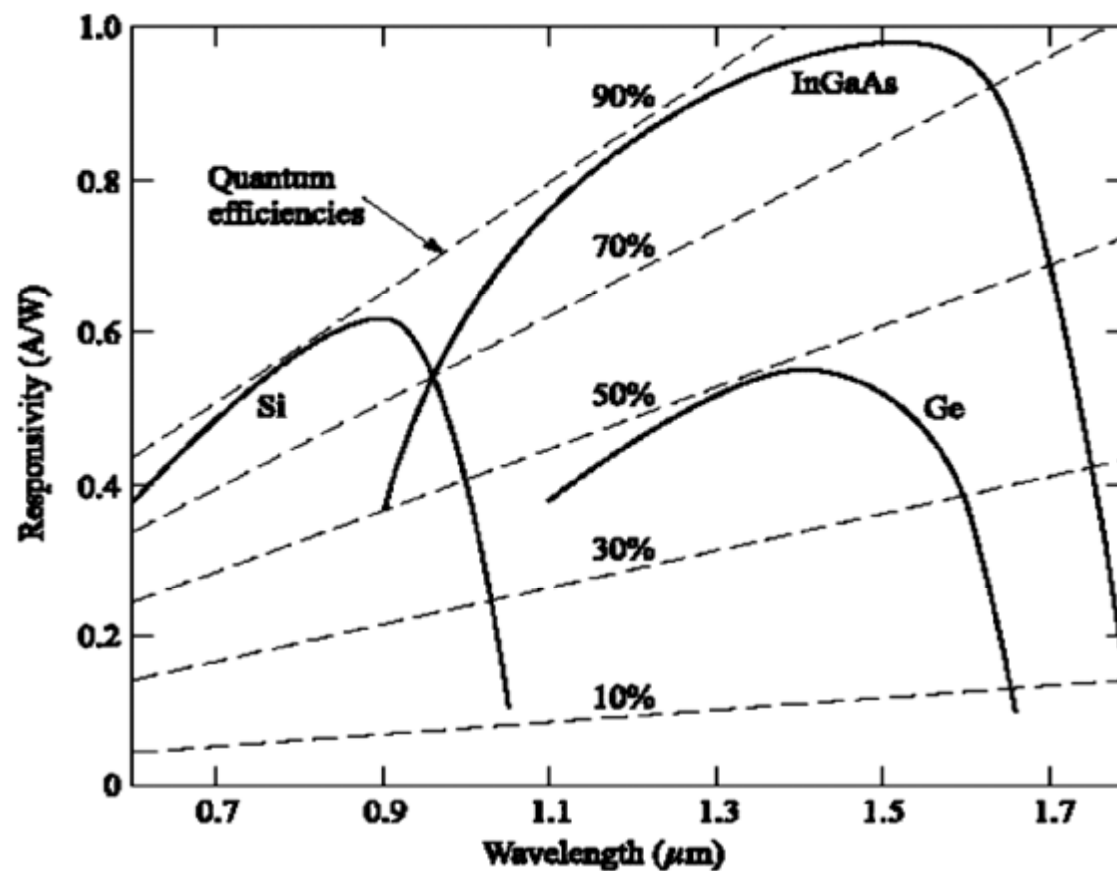
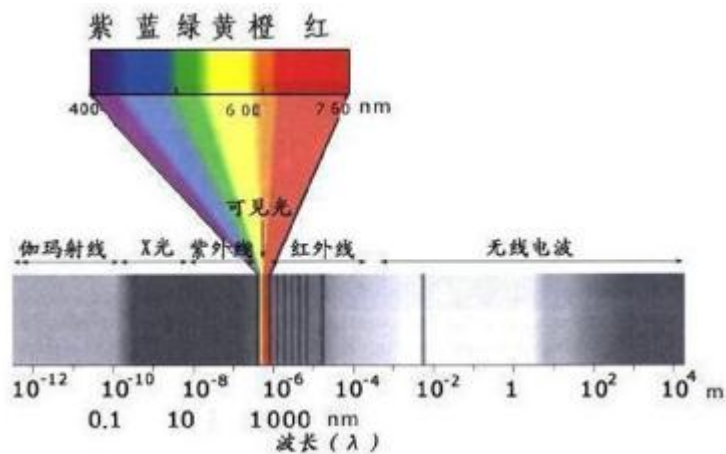
电磁波频谱

光的辐射基础

硅光敏

晶体管的光谱特性

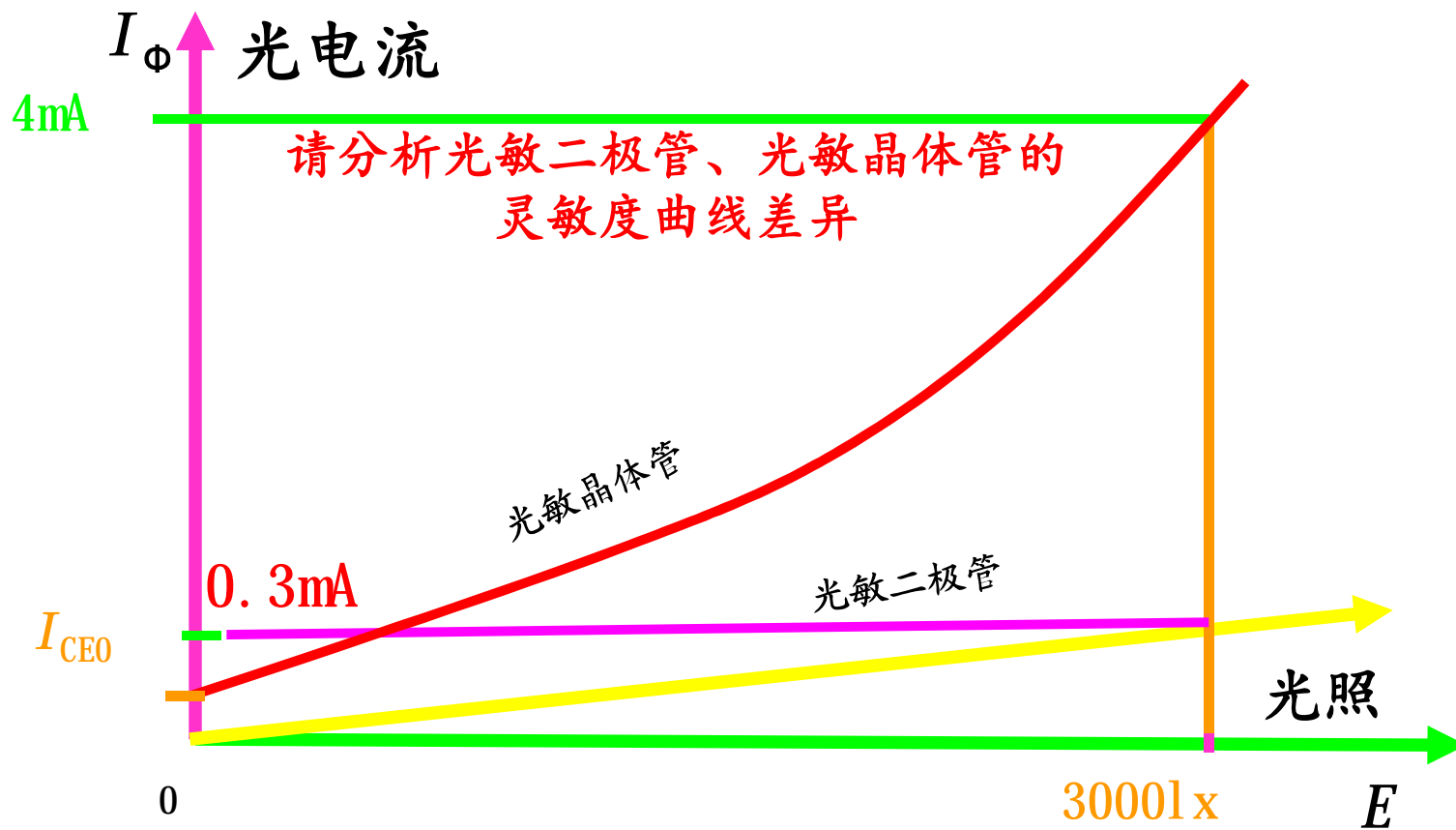
电磁波频谱



几种光敏材料的光谱峰值波长

材料名称	GaAsP	GaAs	Si	HgCdTe	Ge	GaInAsP	AlGaSb	GaInAs	InSb
峰值波长/ μm	0.6	0.65	0.8	1~2	1.3	1.3	1.4	1.65	5.0

光敏二极管、晶体管的光电特性比较



请作图、计算当 $E=1000\text{lx}$ 时，光敏二极管的光电流 I_ϕ

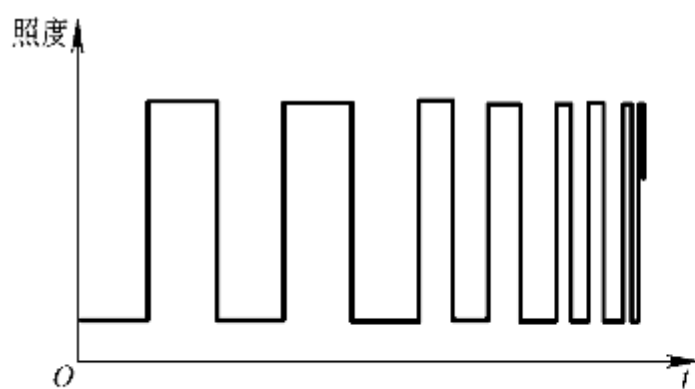
光敏管的特性（续）

温度特性：温度变化对亮电流影响不大，但对暗电流的影响非常大，并且是非线性的，将给微光测量带来误差。硅光敏晶体管的温漂比光敏二极管大许多，虽然硅光敏晶体管的灵敏度较高，但在要求准确度测量中却必须选用硅光敏二极管，并采用低温漂、高准确度的运算放大器来提高检测灵敏度。

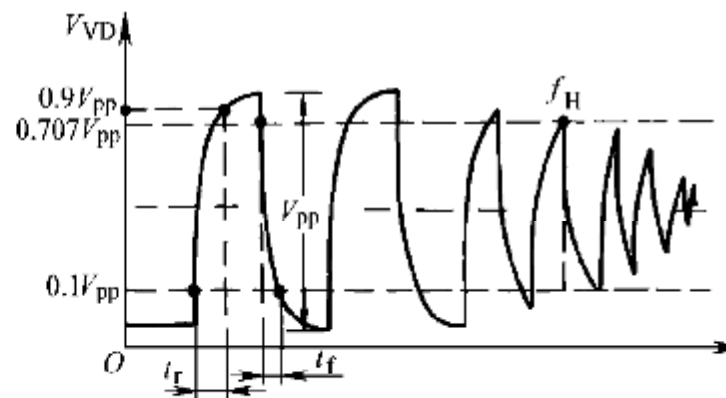
响应时间：工业级硅光敏二极管的响应时间为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ s左右，光敏晶体管的响应时间比相应的二极管约慢一个数量级，因此在要求快速响应或入射光调制频率（明暗交替频率）较高时，应选用硅光敏二极管。

光敏管的频率特性

当光脉冲的重复频率提高时，光敏二极管的输出电流的变化无法立即跟上光脉冲的变化，输出波形产生失真。当光敏二极管的输出电流或电压脉冲幅度减小到低频时的 $1/\sqrt{2}$ （0.707倍）时，该光脉冲的调制频率就是光敏二极管的最高工作频率 f_H ，又称截止频率。 t_r 为上升时间， t_f 为下降时间。



a)



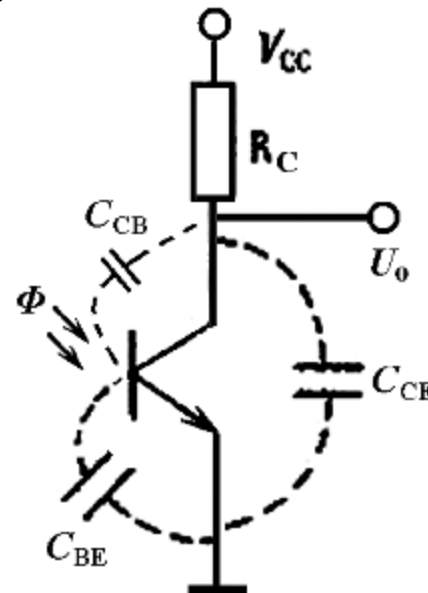
b)

a) 输入调制光脉冲 b) 光敏二极管脉冲响应

光敏晶体管的频率特性

由于光敏晶体管基区的电荷存储效应，所以在强光照和无光照切换时，光敏晶体管的饱和与截止需要更多的时间，所以它对入射调制光脉冲的响应时间比光敏二极管慢，最高工作频率 f_H 也比光敏二极管低。

光敏晶体管的基极与集电极之间虽然只有几个pF的极间电容 C_{CB} ，但是，由于存在密勒效应，等效于在集电极与发射极之间存在一个被“放大”了的极间电容 $C_{CE} = \beta C_{CB}$ ，集射电容减缓了集电极电流的突变速度，导致光敏晶体管的频率特性变差。

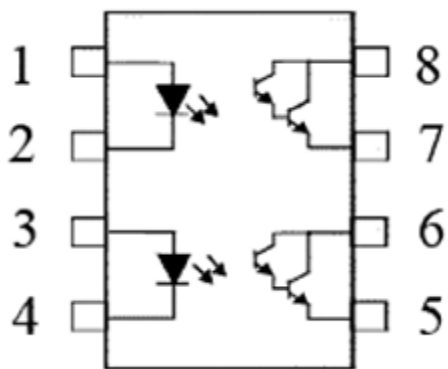


3DU光敏三极管特性参数

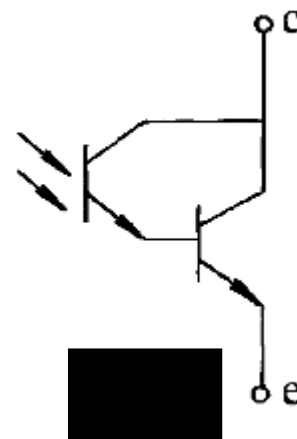
型 号	反向击穿 电压 V_{CE} (V)	最高工作 电压 V_{RM} (V)	暗电流 I_D (μA)	光电流 I_L (mA)	峰值波长 λ_p (\AA)	最大功耗 P_M (mW)	开关时间(μs)				环境温度 ($^{\circ}C$)
							t_r	t_d	t_i	t_s	
3DU11	≥ 15	≥ 10	≤ 0.3	0.5 ~ 1.0	8800	30	≤ 3	≤ 2	≤ 3	≤ 1	- 40 ~ + 125
3DU12	≥ 45	≥ 30				50					
3DU13	≥ 75	≥ 50				100					
3DU21	≥ 15	≥ 10		1.0 ~ 2.0		30					
3DU22	≥ 45	≥ 30				50					
3DU23	≥ 75	≥ 50				100					
3DU31	≥ 15	≥ 10		> 2.0		30					
3DU32	≥ 45	≥ 30				50					
3DU33	≥ 75	≥ 50				100					

光敏达林顿管

将光敏三极管与另一个普通三极管制作在同一个管芯里，连接成复合管型式，称为达林顿型光敏三极管。它的灵敏度更高（ $\beta = \beta_1 \beta_2$ ），且允许输出较大的电流。但是达林顿光敏三极管的漏电（暗电流）也较大，频响较差，温漂也较大。



达林顿型光耦合器
输出电流可达50mA



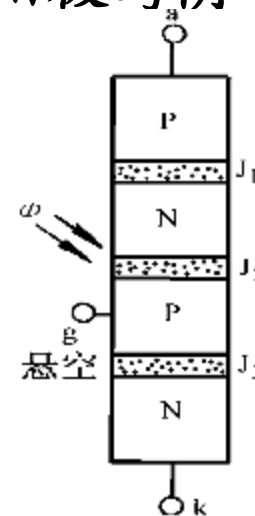
光敏达林顿三极管图形符号

光敏晶闸管

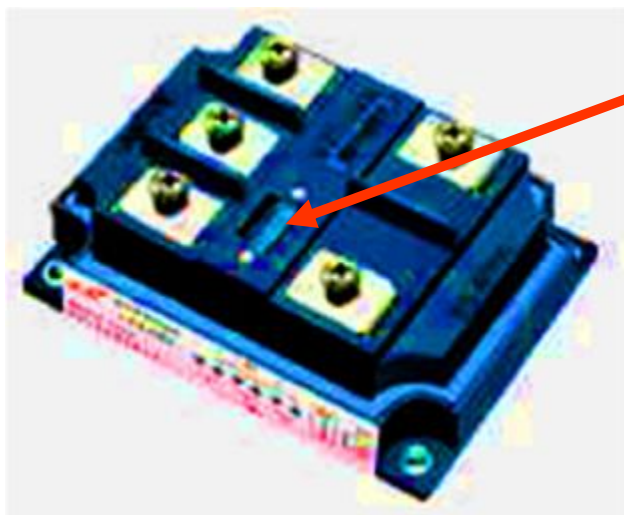
光敏晶闸管有三个引出电极，即阳极a、阴极k和门极g。它的顶部有一个玻璃透镜，光敏晶闸管的阳极与负载串联后接电源正极，阴极接电源负极，门极可悬空。当有一定照度的光信号通过玻璃窗口照射到正向阻断的PN结上时，将产生门极电流，从而使光敏晶闸管从阻断状态变为导通状态。导通后，即使光照消失，光敏晶闸管仍维持导通。使阳极与阴极的电压反向，或使负载电流小于其维持电流，晶闸管截止。

光敏晶闸管的特点是：

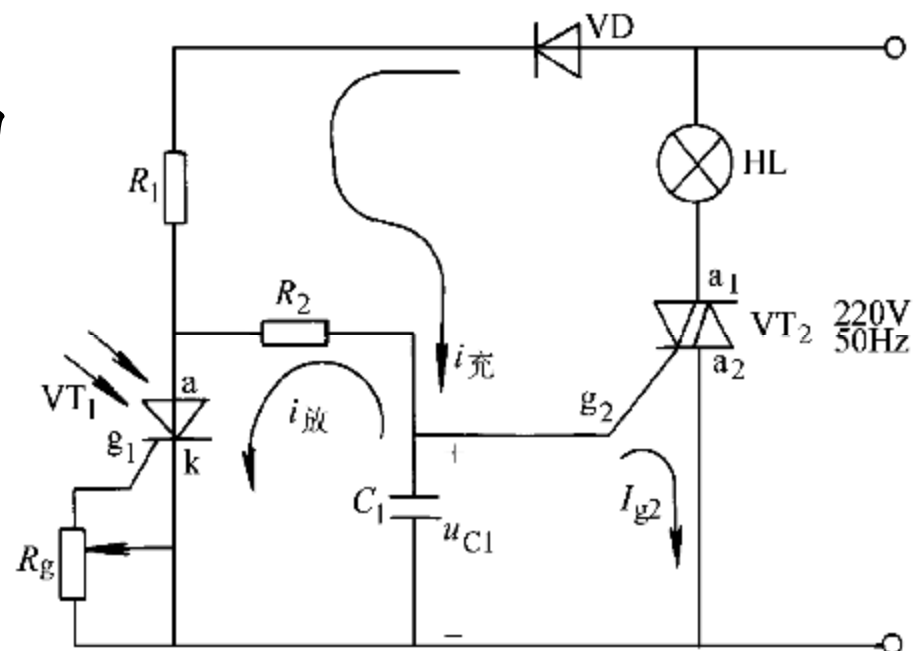
导通电流比光敏三极管大得多，工作电压可达近千伏，因此输出功率大，可用于工业自动检测控制。



光敏晶闸管用于光控路灯电路

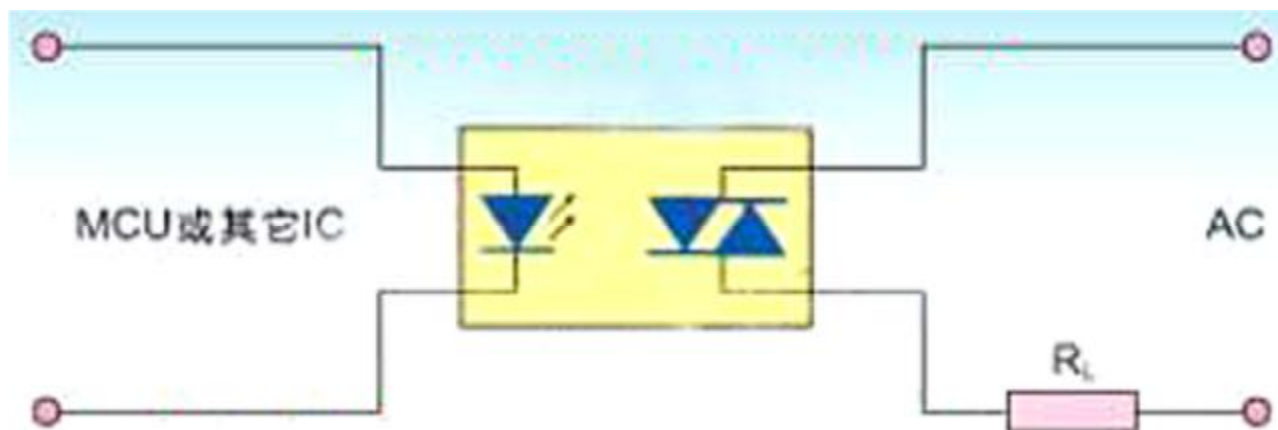


光敏面



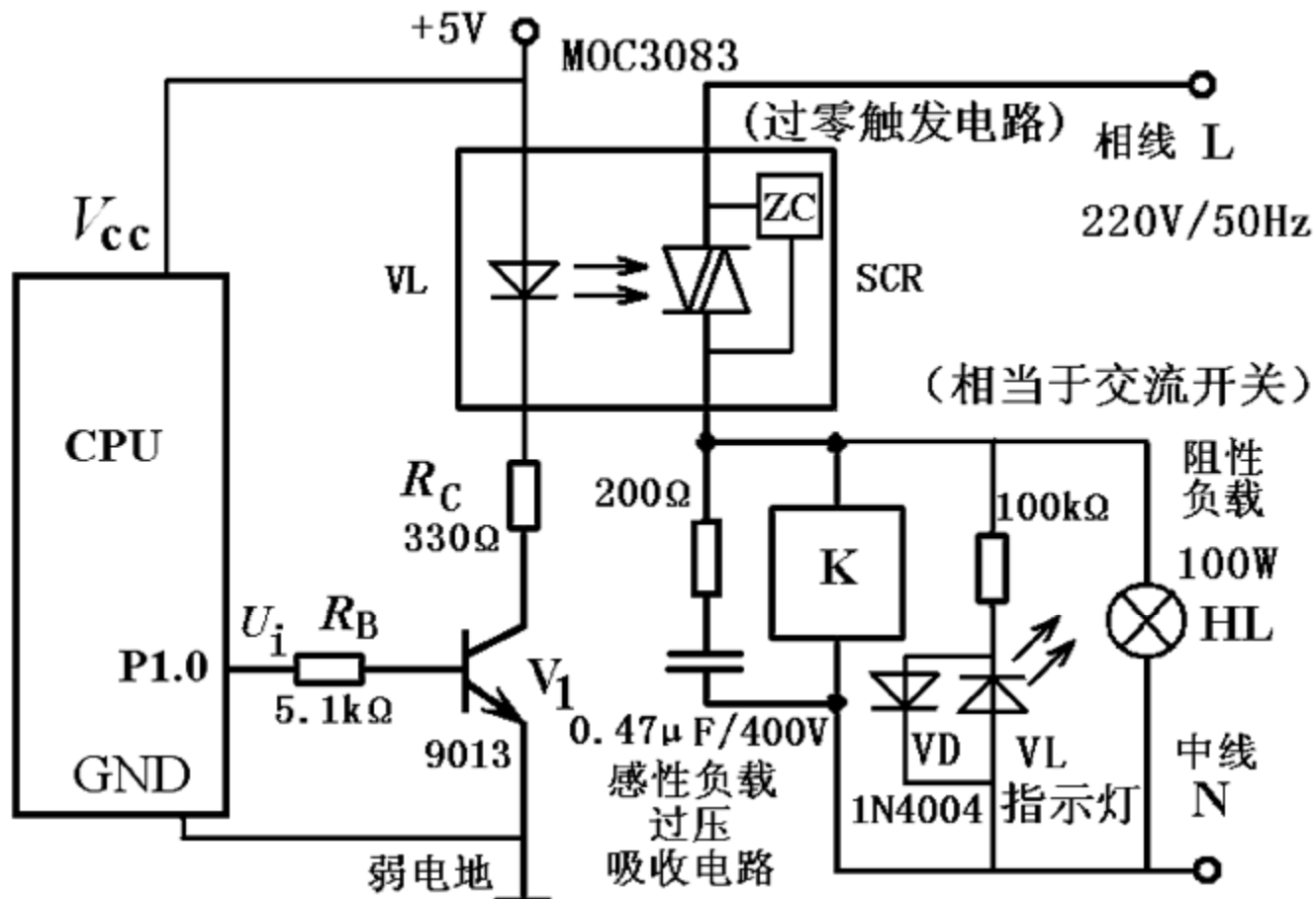
光照小于设定值时, VT_1 截止, VT_2 的门极电流 I_{g2} 增大, VT_2 导通, 电灯 HL 亮。减小 R_g , 门极电流被旁路, 灵敏度降低。

光敏晶闸管多用于弱电控制强电的光耦电路



双向过零触发晶闸管光耦 MOC30系列

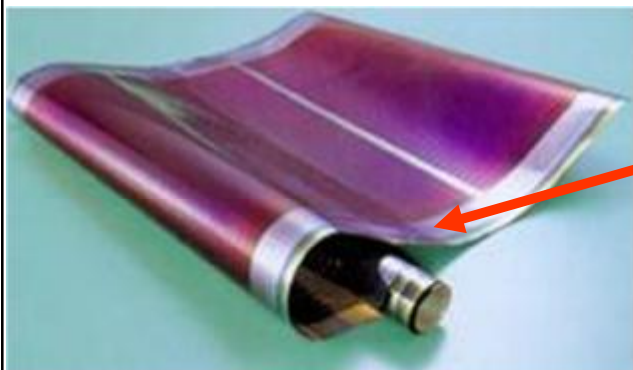
单片机控制灯光或交流继电器电路



三、基于光生伏特效应的光电元件

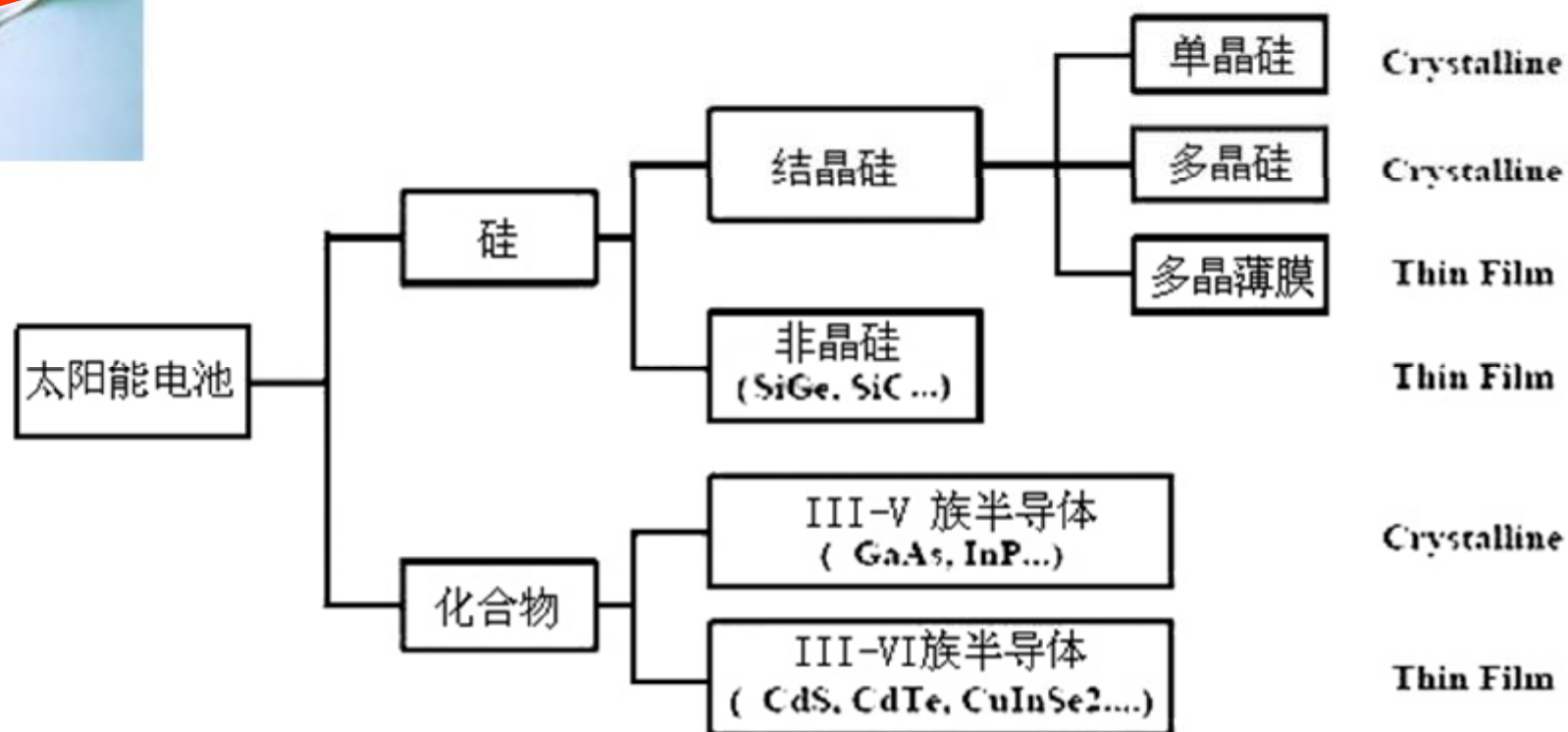
——光电池

在P型衬底上制造一很薄、透明的N型层作为光照敏感面，就构成最简单的光电池。当入射光子的能量足够大时，PN结每吸收一个光子就产生一对光生电子-空穴对，光生电子-空穴对的扩散运动使电子通过漂移运动被拉到N型区，空穴漂移到P区，所以N区带负电，P区带正电。如果光照是连续的，经短暂的时间，PN结两侧就有一个稳定的光生电动势输出，这就是光生伏特效应。

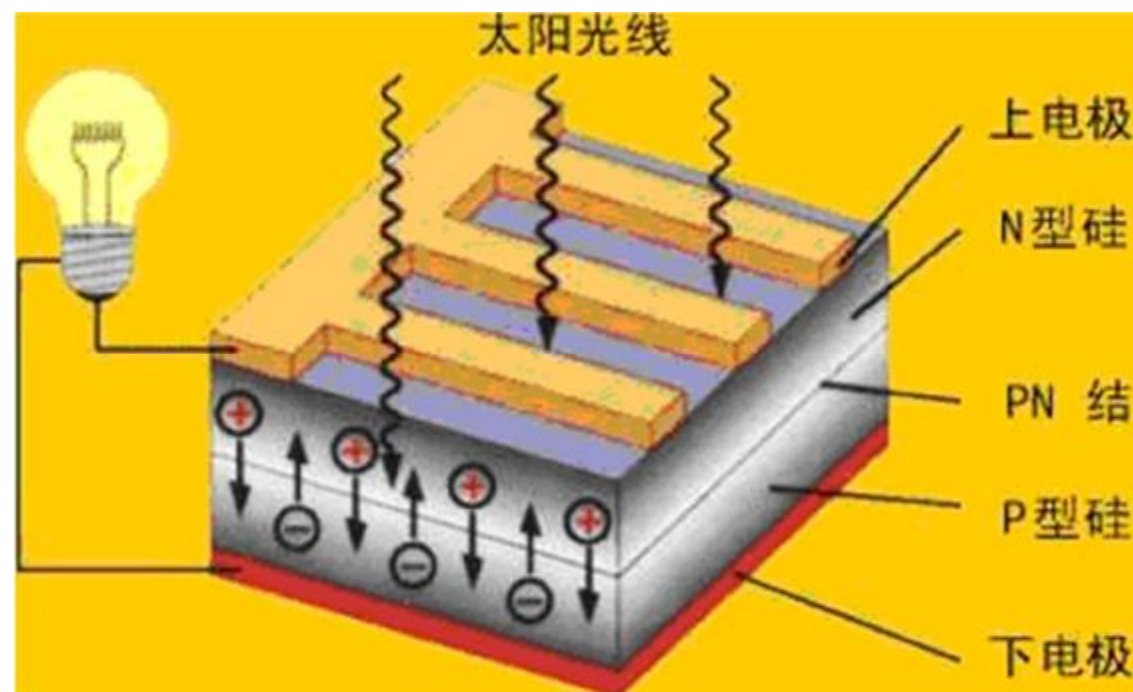
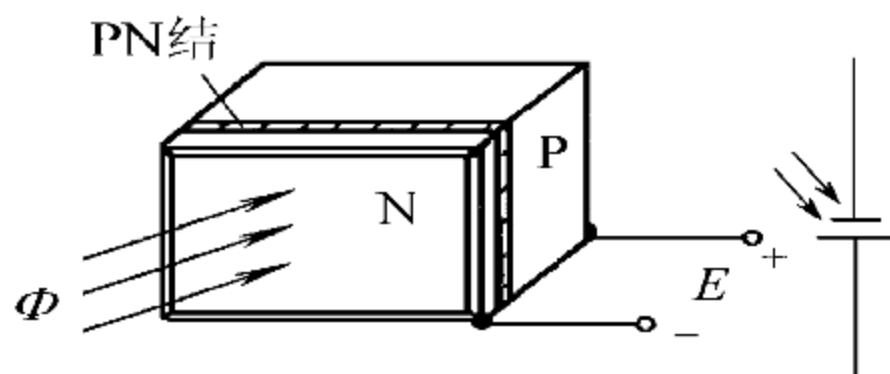


非晶硅可挠式

太阳能电池的种类

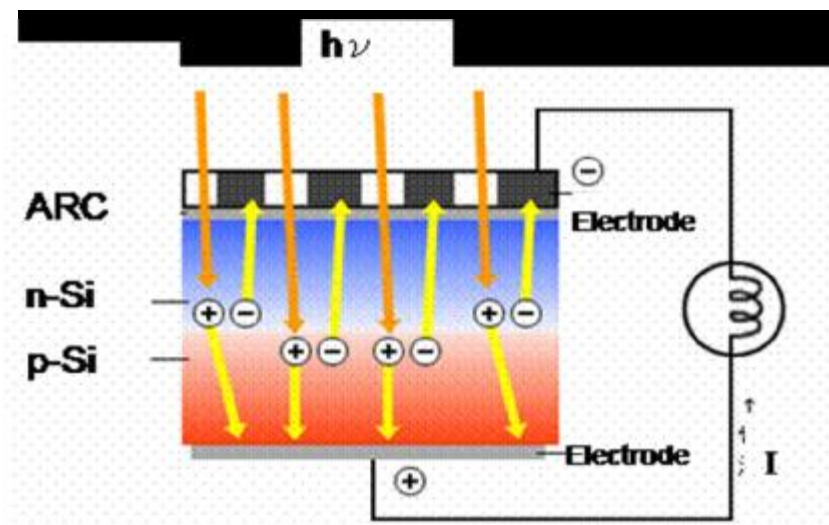
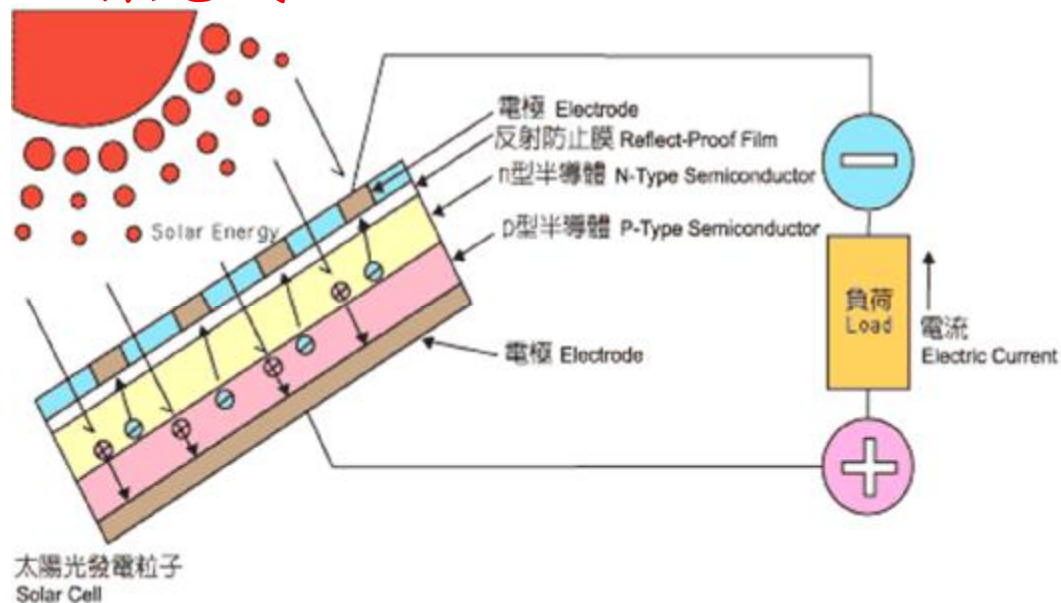


光电池的结构及工作原理示意图

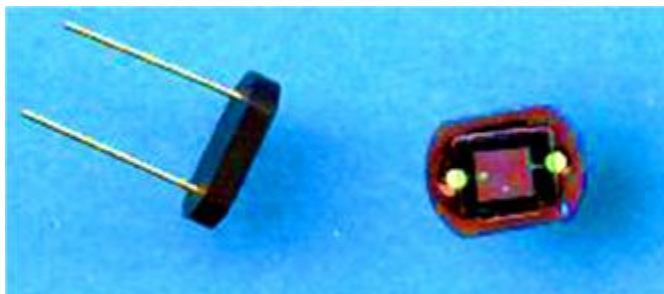


光電池內部載流子的漂移示意图

入射光线

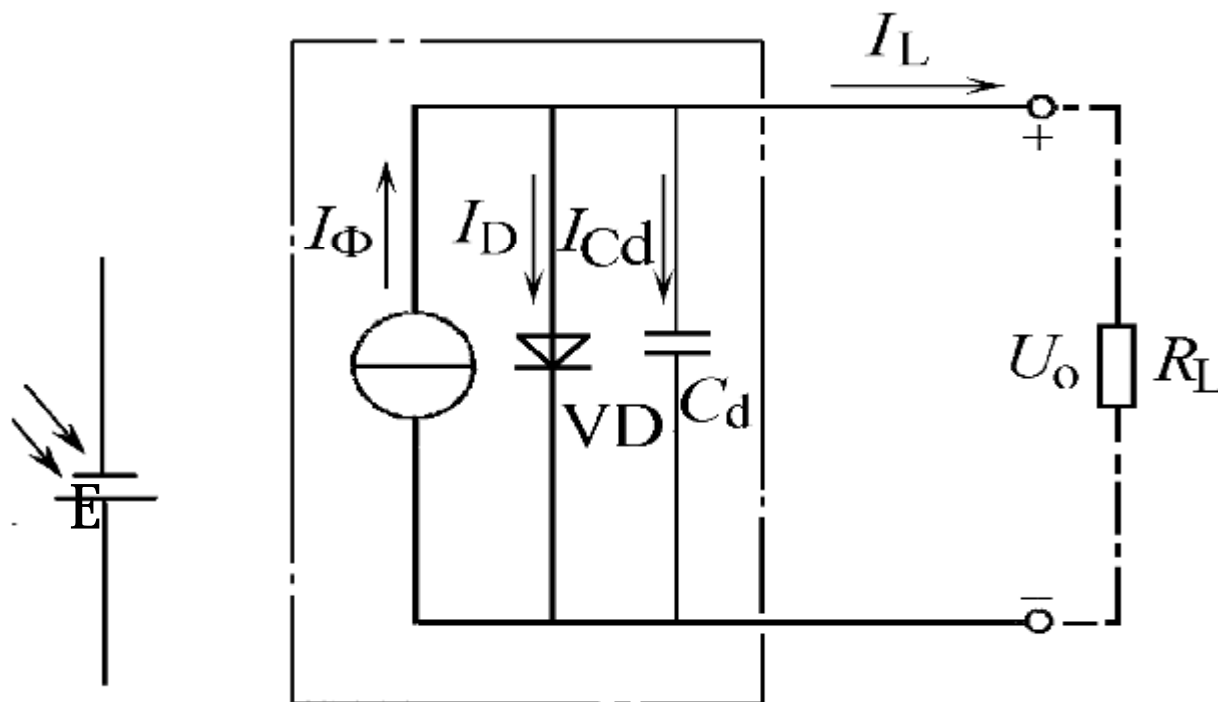


光电池外形



光敏面

1. 硅光电池的图形符号及等效电路



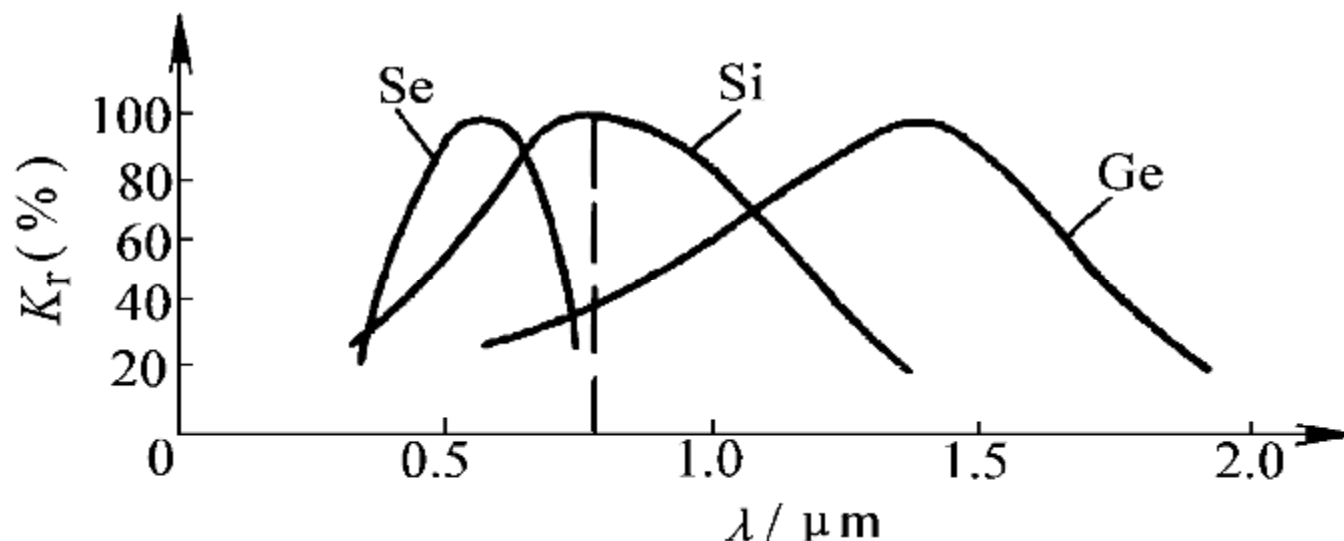
当光电池短路时，相当于电流源；
当光电池开路时，相当于电压源；

2. 硅光电池的主要特性

①开路电压 U_{oc} : 在一定光照下, 硅光电池两个输出端开路时, 所产生的电动势。②短路电流 I_{Sc} : 在一定光照下, 硅光电池所接负载电阻为零时, 流过硅光电池的电流。③暗电流 I_D : 在无光照的条件下, 在硅光电池两端施加额定反向电压时所产生的电流。④反向阻抗 R_ξ : 在无光照的条件下, 在硅光电池两端施加额定反向电压时所呈现的阻抗。⑤峰值波长 λ_0 : 响应光谱转换效率最大处的波长。⑥上、下限波长 λ_1 、 λ_2 : 响应光谱中转换峰值的50%处所对应的上、下限波长。⑦最大反向电压 U_{RM} : 使用硅光电池时所允许加的极限反向电压(由串联的其他电池产生)。⑧转换效率 η : 硅光电池输出电能与输入光能量的比值。

光谱特性：

硅光电池对近红外敏感。硒光电池对可见光敏感。随着制造技术的进步,硅光电池已具有从蓝紫到近红外的宽光谱特性。目前许多厂商已生产出峰值波长为 $0.7\mu\text{m}$ (可见光)的硅光电池,在紫光($0.4\mu\text{m}$)附近仍有40~60%的相对灵敏度。

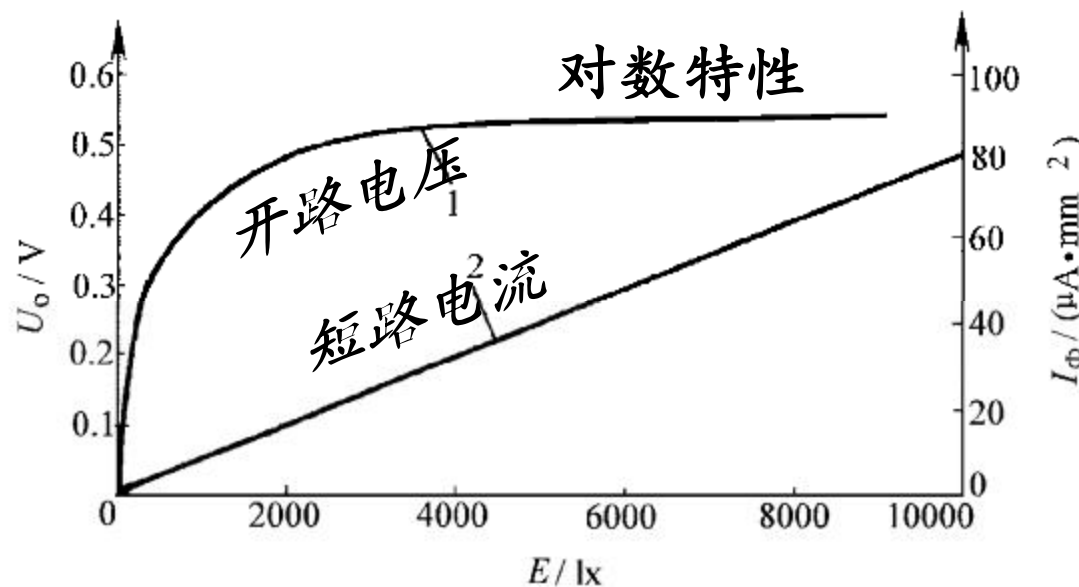


硒、硅、锗光电池的光谱特性比较

光电池的光电特性

光电池的负载电阻不同，输出电压和电流也不同。开路电压 U_0 与光照度的关系呈非线性，近似于对数关系，在2000lx照度以上就趋于饱和。负载电阻越小，光电流与照度之间的线性关系就愈好。当负载短路时，光电流在很大范围内与照度成线性关系，当希望光电池的输出与光照度成正比时，应把光电池作为电流源来使用。

当被测非电量是开关量时，也可以把光电池作为电压源来使用。



光电池的光电特性 演示

开路电压 U_{oc}

0.6V

0.55V

结论?

开路输出电压

短路输出电流

8mA

4mA

光照

0

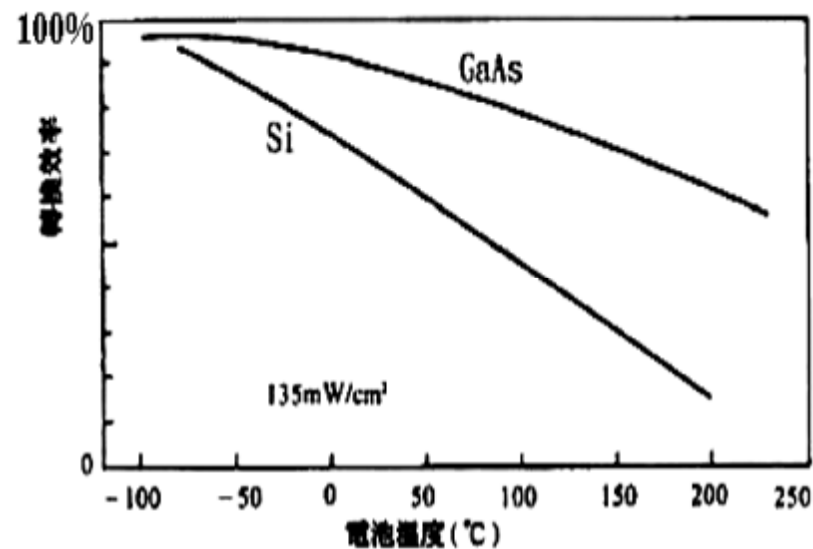
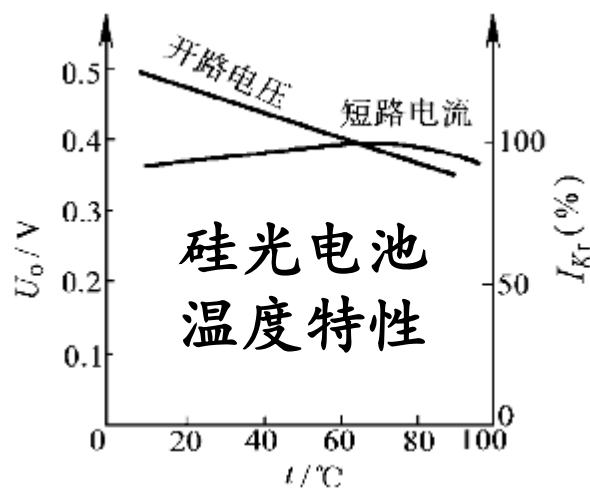
5000lx

10000lx

 E 请作图计算当 $E=10000\text{lx}$ 时, 光电池的电流 I_ϕ 和电压 U_{oc}

光电池的温度特性

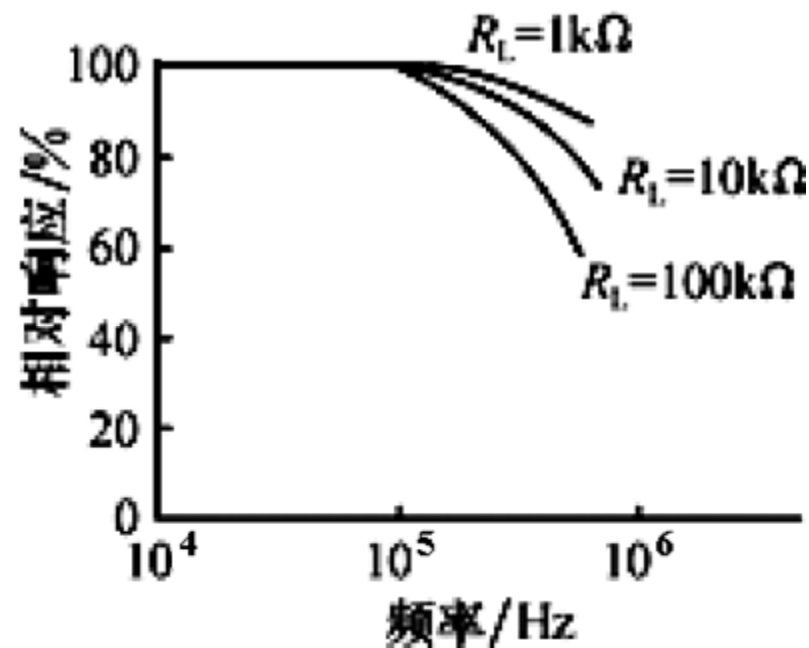
光电池的温度特性是描述光电池的开路电压 U_0 及短路电流 I_0 随温度变化的特性。开路电压随温度增加而下降，开路电压的温度系数约为 $-0.34\%/^{\circ}\text{C}$ ；短路电流温度系数： $+0.017\%/^{\circ}\text{C}$ 。工作温度范围： $-40\sim+90^{\circ}\text{C}$ 。当光电池作为检测元件时，应考虑温度漂移的影响，采取相应措施进行温度补偿。



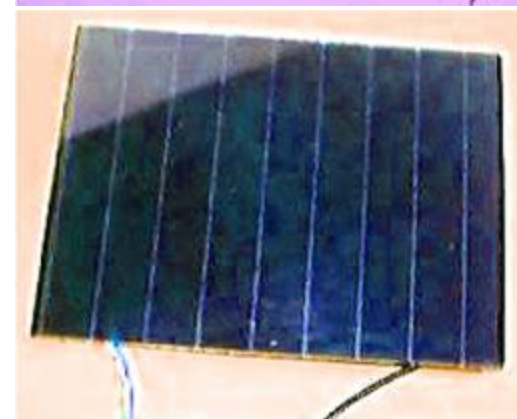
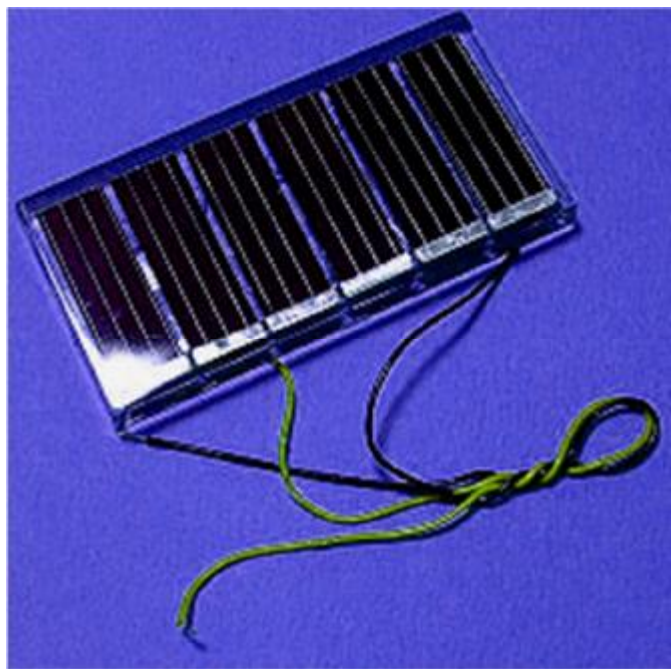
光电池的频率特性

频率特性是描述入射光的调制频率与光电池输出电流间的关系。由于光电池受照射产生电子-空穴对需要一定的时间，因此当入射光的调制频率太高时，光电池的输出光电流将下降。

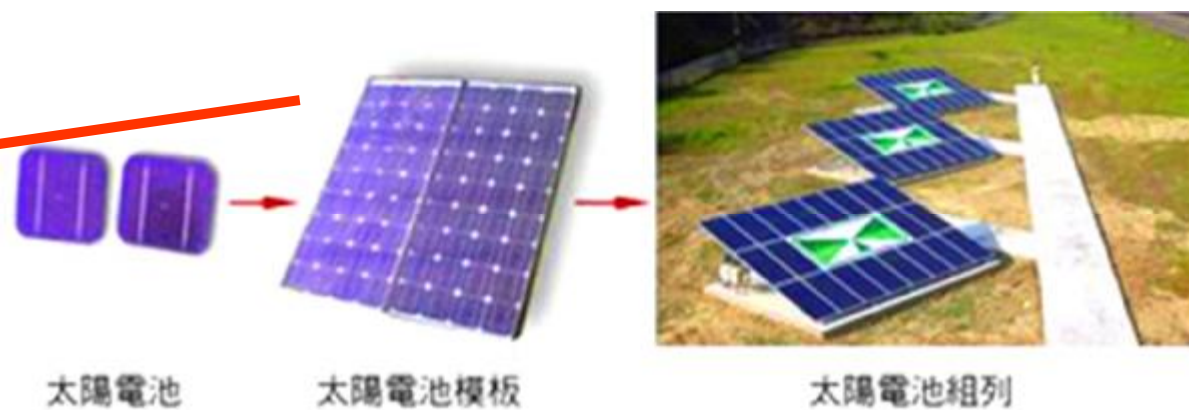
硅光电池的面积越小，PN结的极间电容也越小，高频转折频率就越高，硅光电池的频率响应可达数兆赫。



能提供较大电流的大面积光电池外形 (频率特性很差)



光电池组件



光电池在动力方面的应用

太阳能赛车

太阳能
硅光电池板

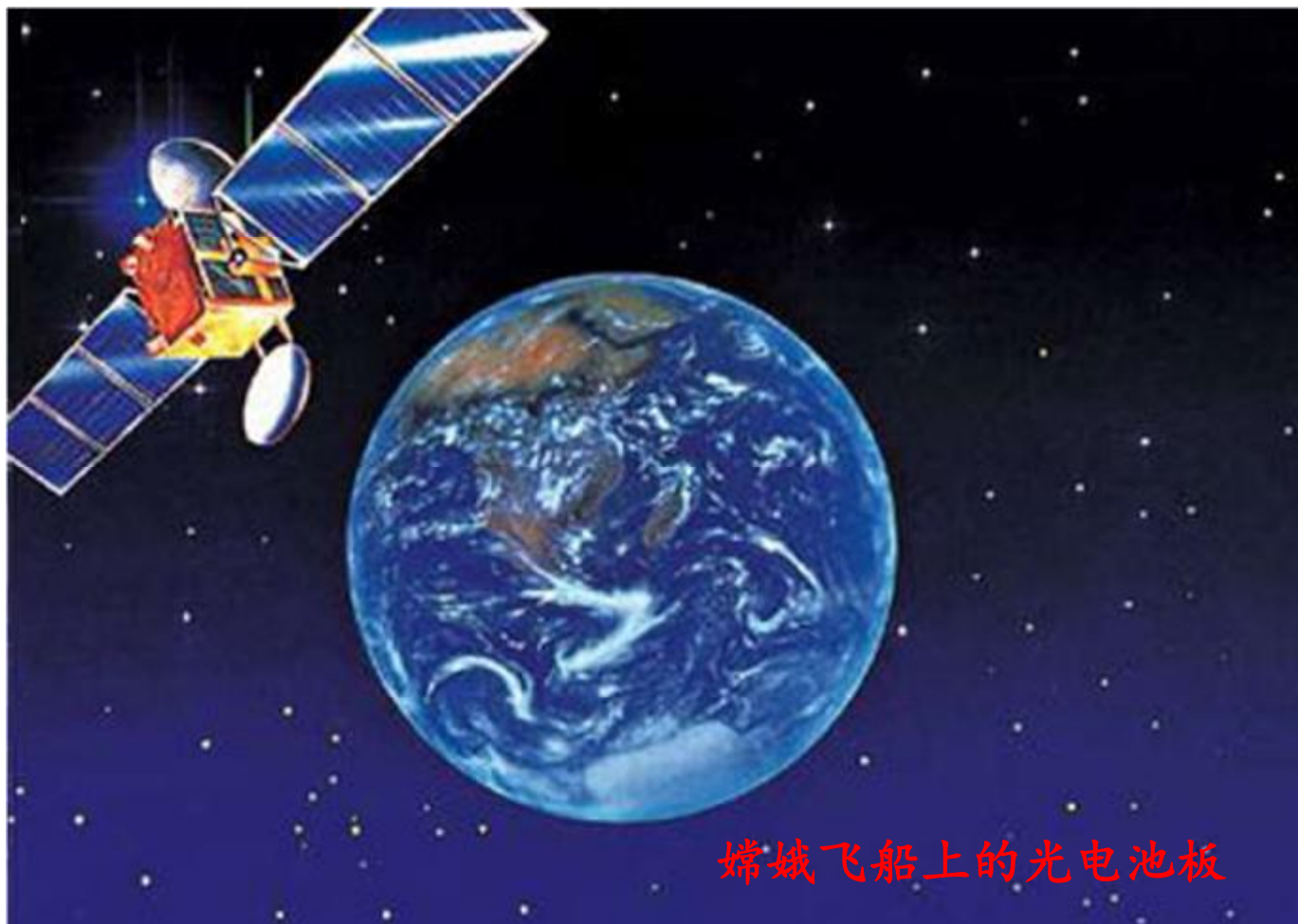


太阳能电风扇

光电池在动力方面的应用（续）



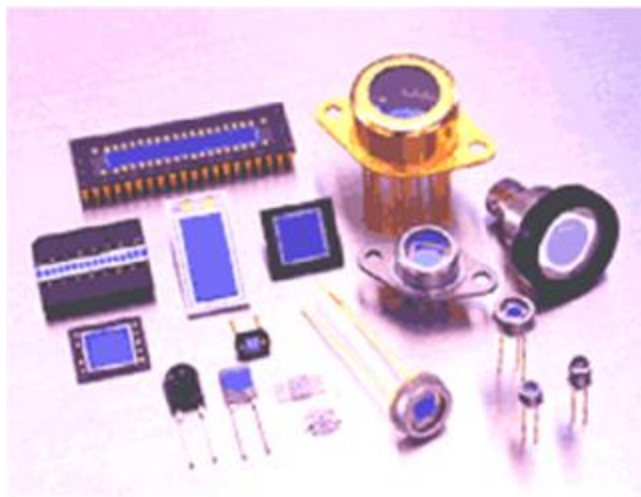
沙漠住宅太阳能供电



光电池在
动力方面
的
应用（续）

嫦娥飞船上的光电池板

各种光电池



柔光罩下面为圆形光电池



四象限探测器：完全对称的4个光敏元件置于光学系统焦平面上。当目标成像不在光轴上时，四个象限上探测器输出的光电信号幅度不相同。常用于激光制导、跟踪等。