

第七章 光辐射探测技术

7.1 光电探测器的物理效应

7.2 光电探测器

7.3 光电弱信号探测

光子效应分类

	效应	相应的探测器
外光电效应	(1)光阴极反射电子	光电管
	(2)光电子倍增 打拿极倍增 通道电子倍增	光电倍增管 像增强器
内光电效应	(1)光电导	光导管或光敏电阻
	(2)光生伏达 pn结和pin结（零偏） pn结和pin结（反偏） 雪崩 肖特基势垒	光电池 光电二极管 雪崩二极管 肖特基势垒光电二极管
	(3)光电磁 光子牵引	光电磁探测器 光子牵引探测器

7.1 光电探测器的物理效应

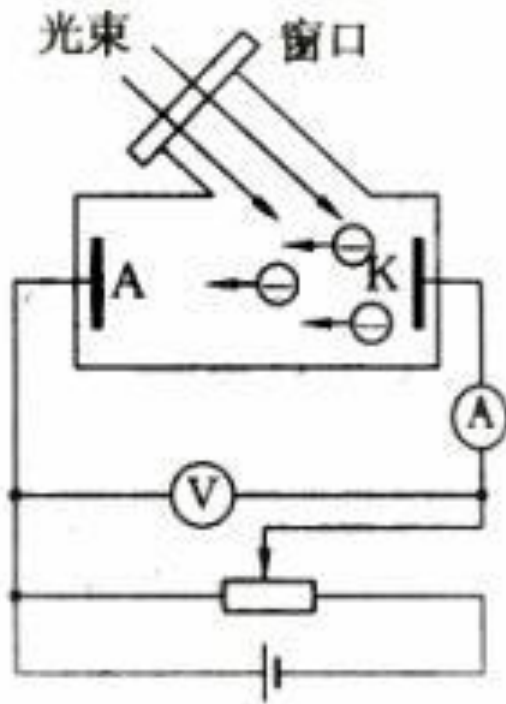
7.1.1 光电效应

7.1.2 光电导效应

7.1.3 光伏效应

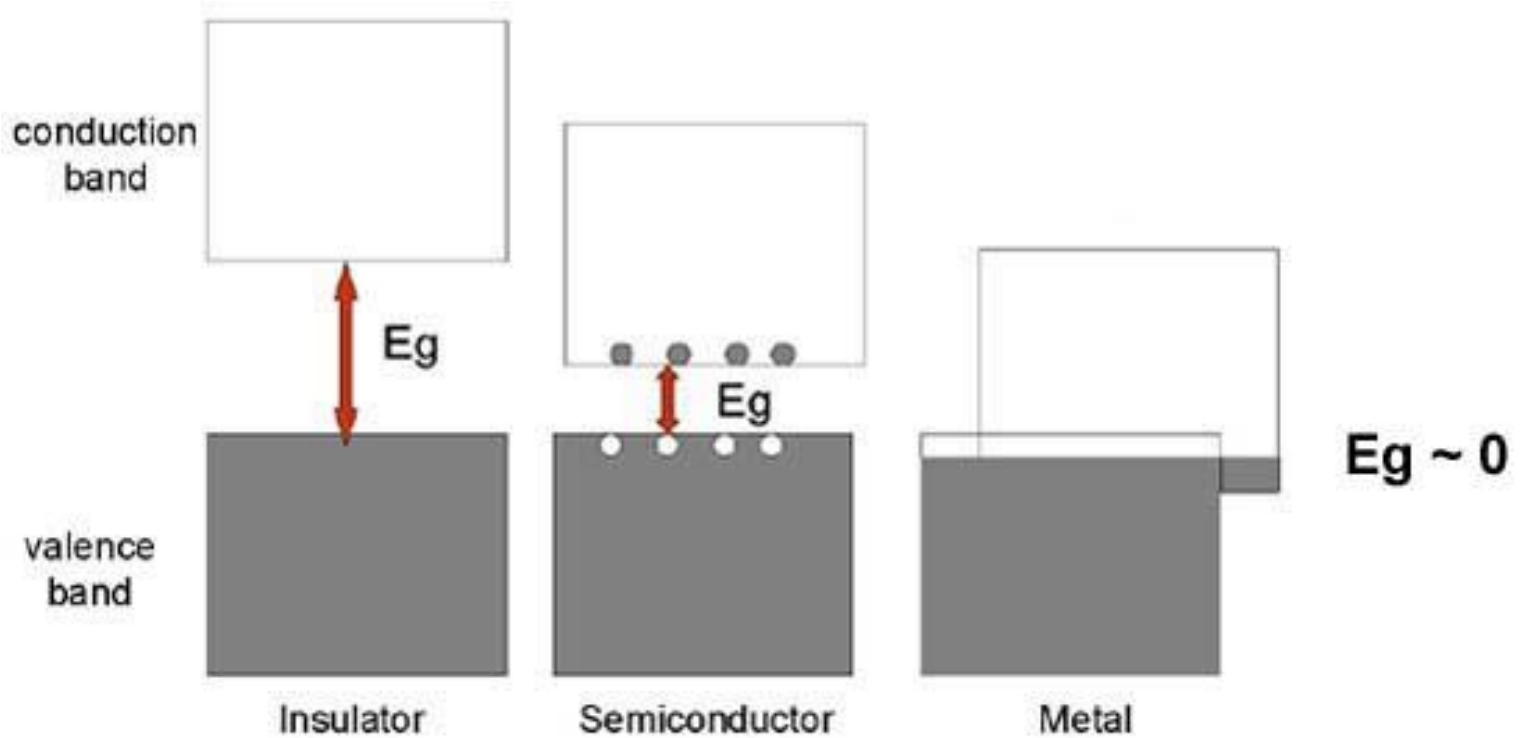
7.1.4 光电转换定律

7.1.1 光电效应

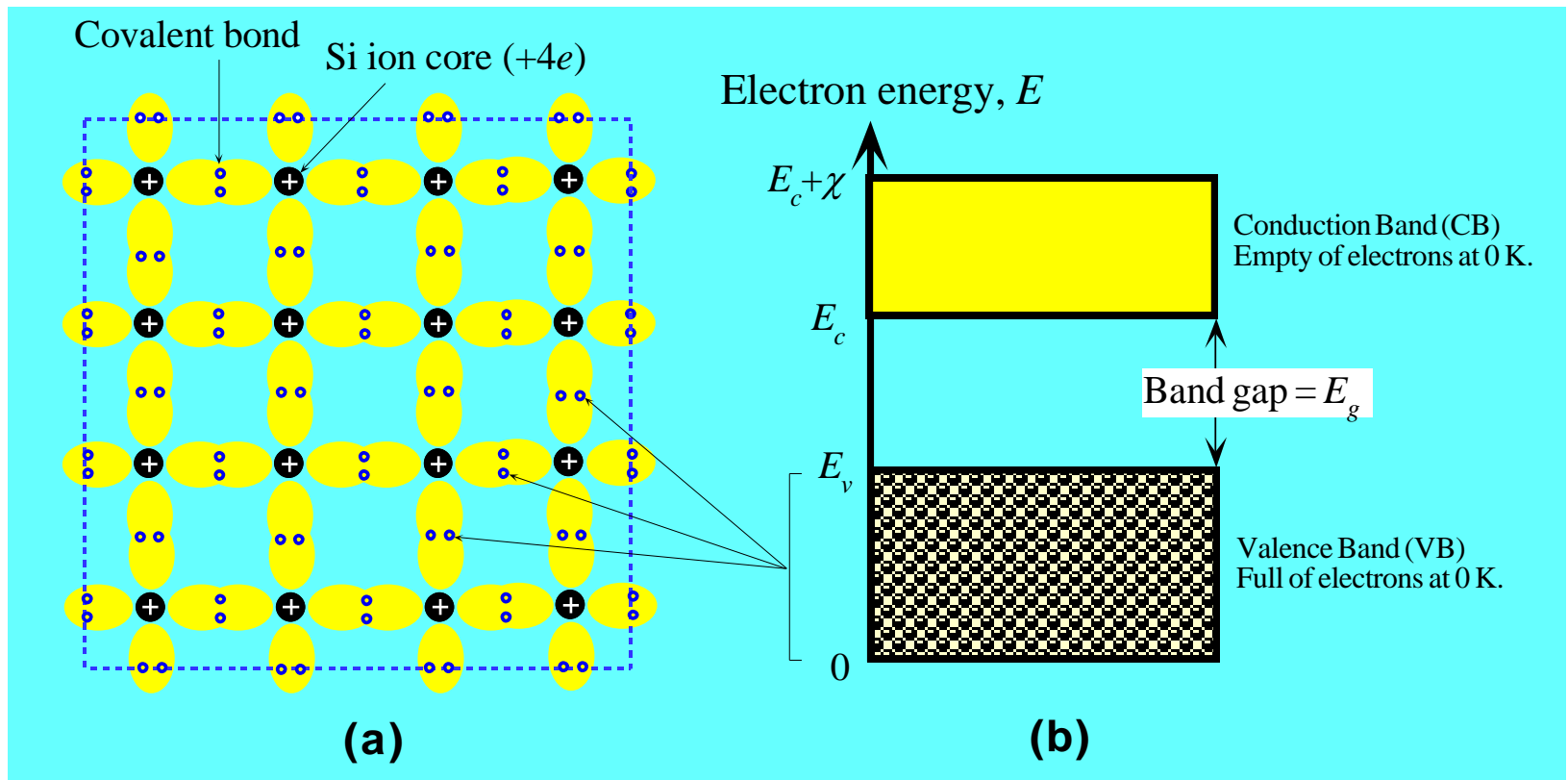


光电管的工作原理

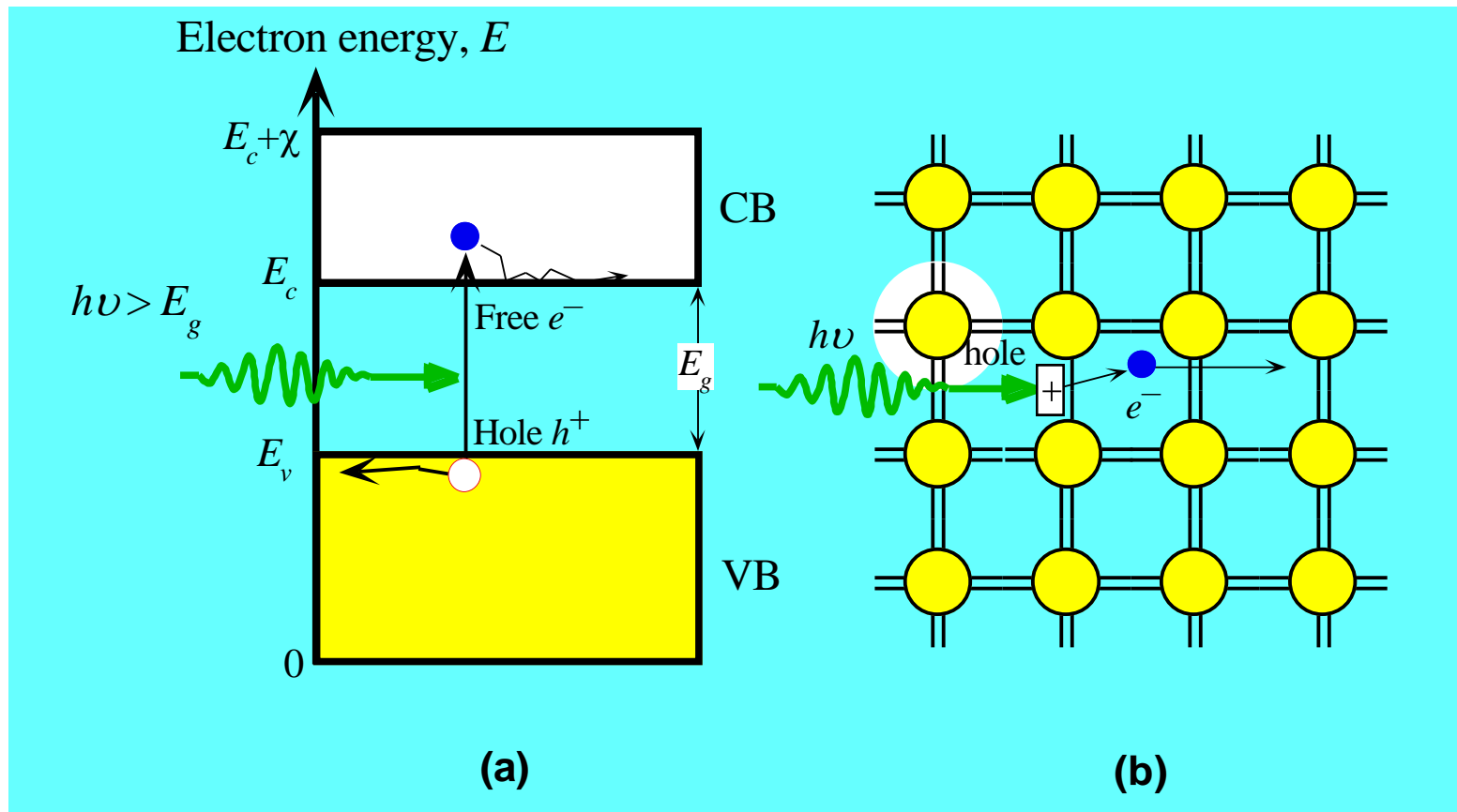
7.1.2 光电导效应



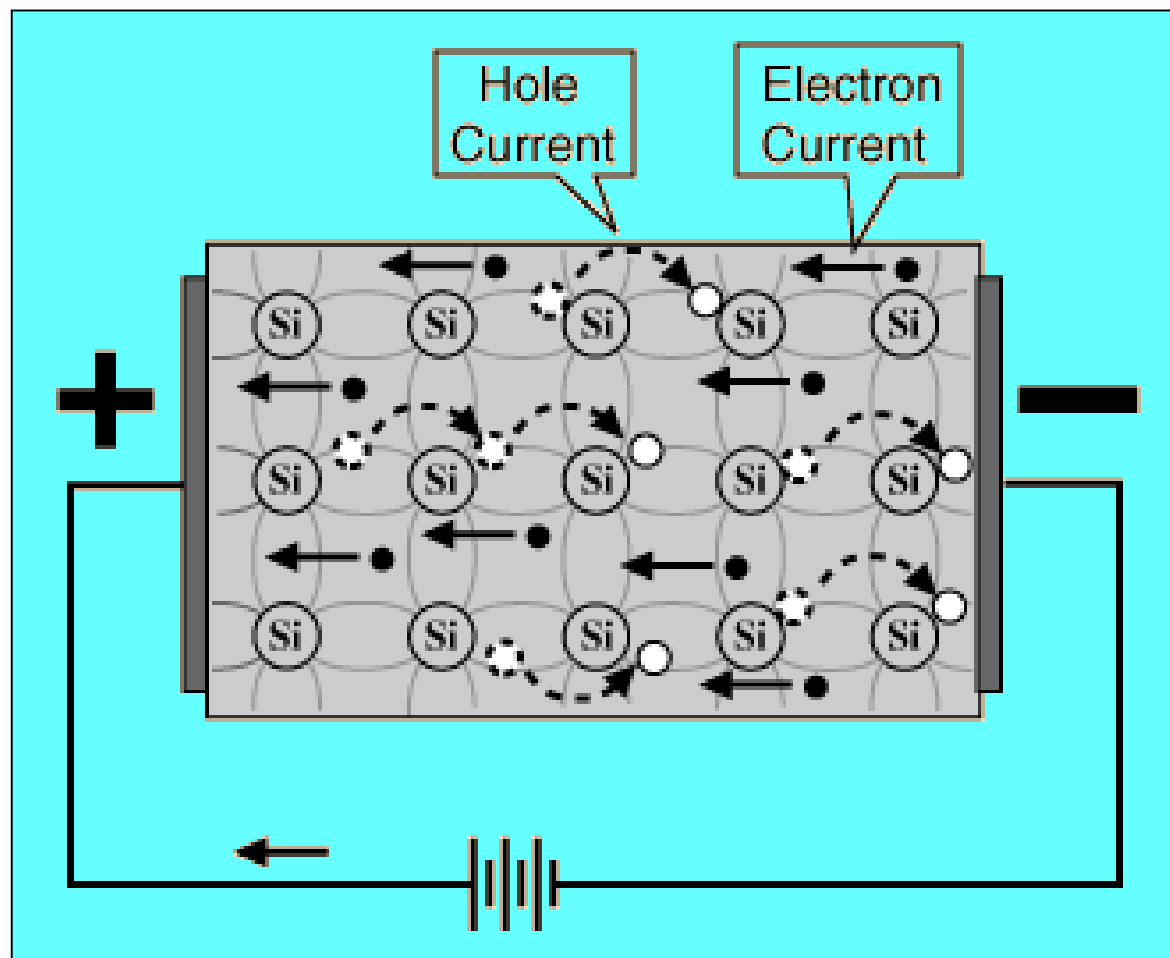
E_g : 禁带宽度



二维硅晶结构和0 K下的能带图



- (a) 能量大于禁带宽度的光子可以将电子从价带激发到导带
- (b) 当光子使得一个Si-Si键断裂，产生一个自由电子和一个空穴



光生载流子在电压作用下形成电流

热平衡以及无光照时：

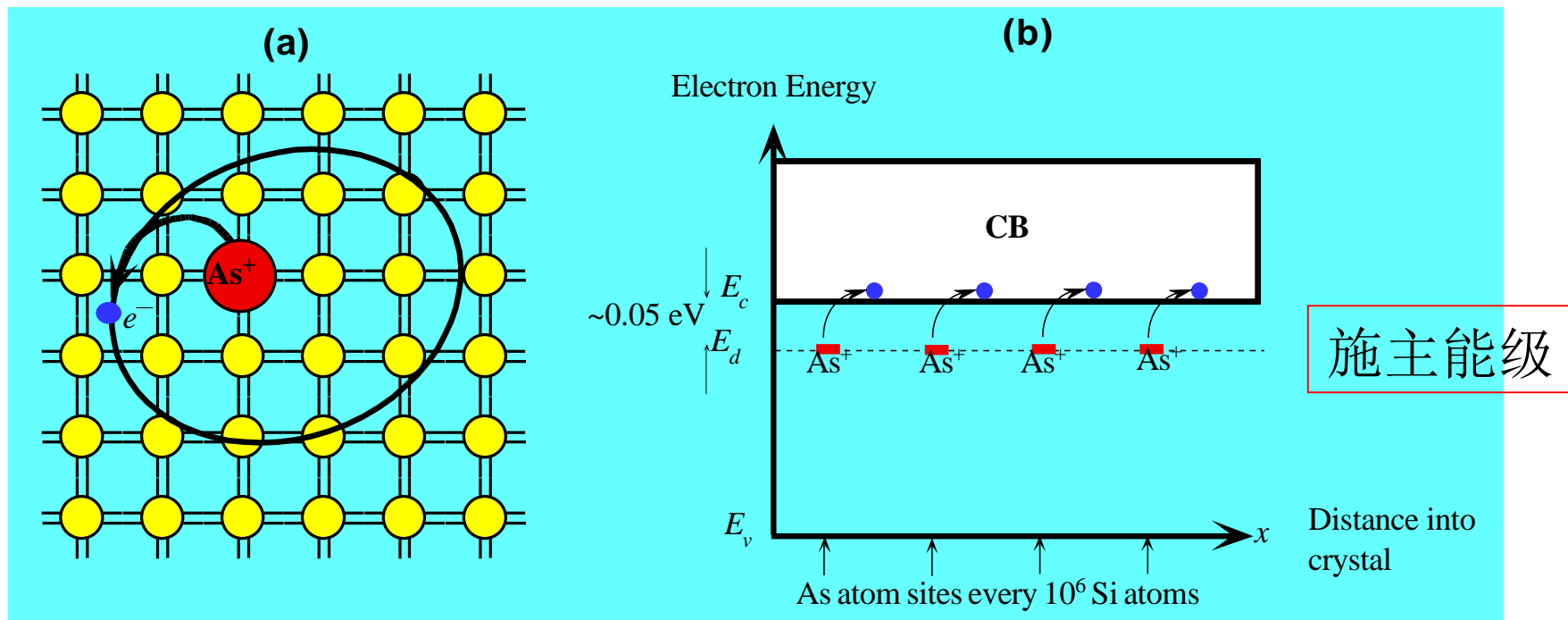
$$\text{Mass action law: } np = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) = n_i^2$$

$$\text{其中: } N_c = 2[2\pi m_e^* k_B T / h^2]^{3/2}$$

$$N_v = 2[2\pi m_h^* k_B T / h^2]^{3/2}$$

在纯（本征）半导体中， $n = p = n_i$ ， n_i 本征浓度

掺砷的n型硅和能带



非本征半导体：

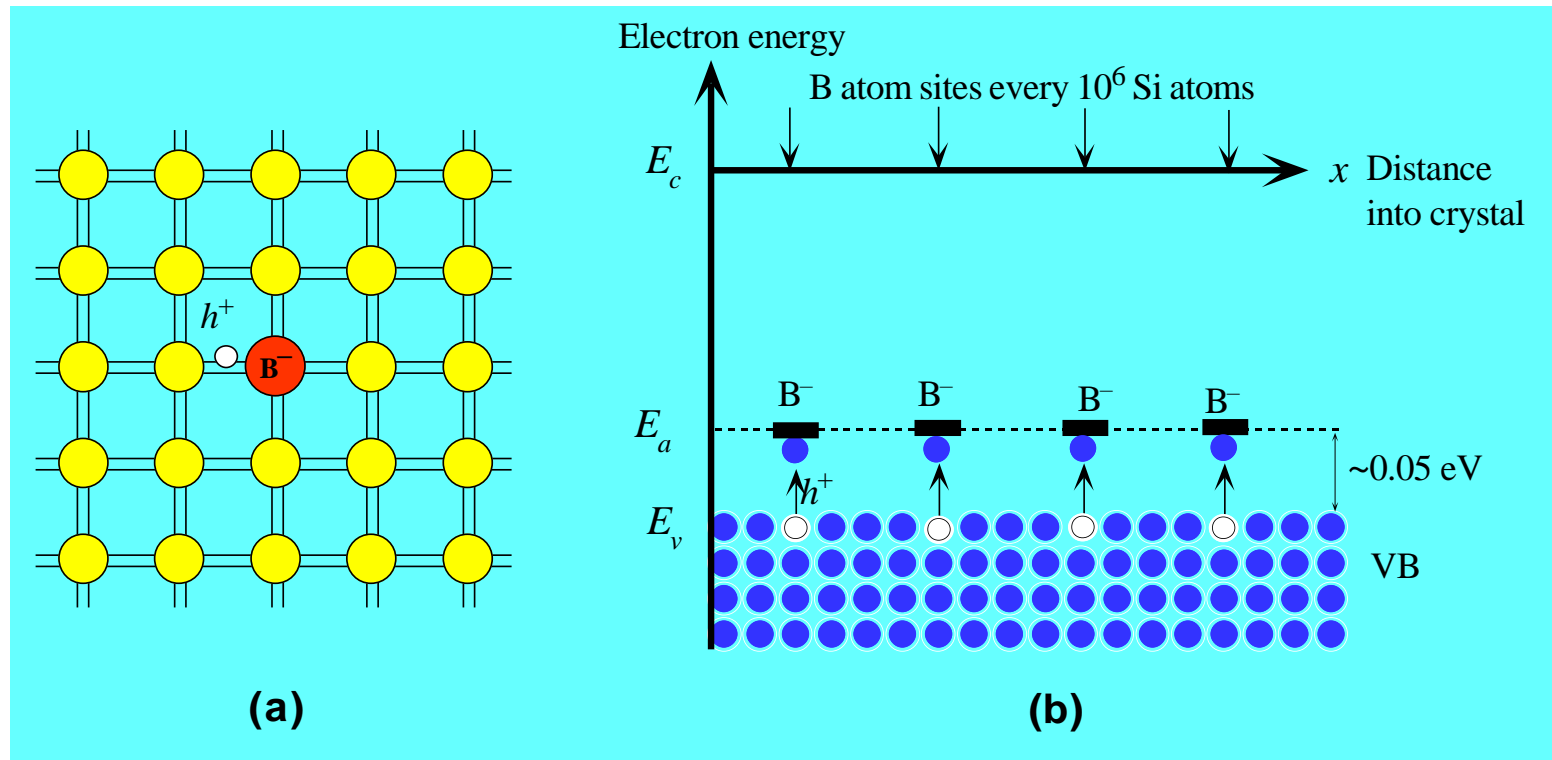
掺杂使某一种载流子浓度远远超过另外一种的浓度

室温下，导带中电子的浓度 $n \approx N_d$ ， N_d 施主的浓度

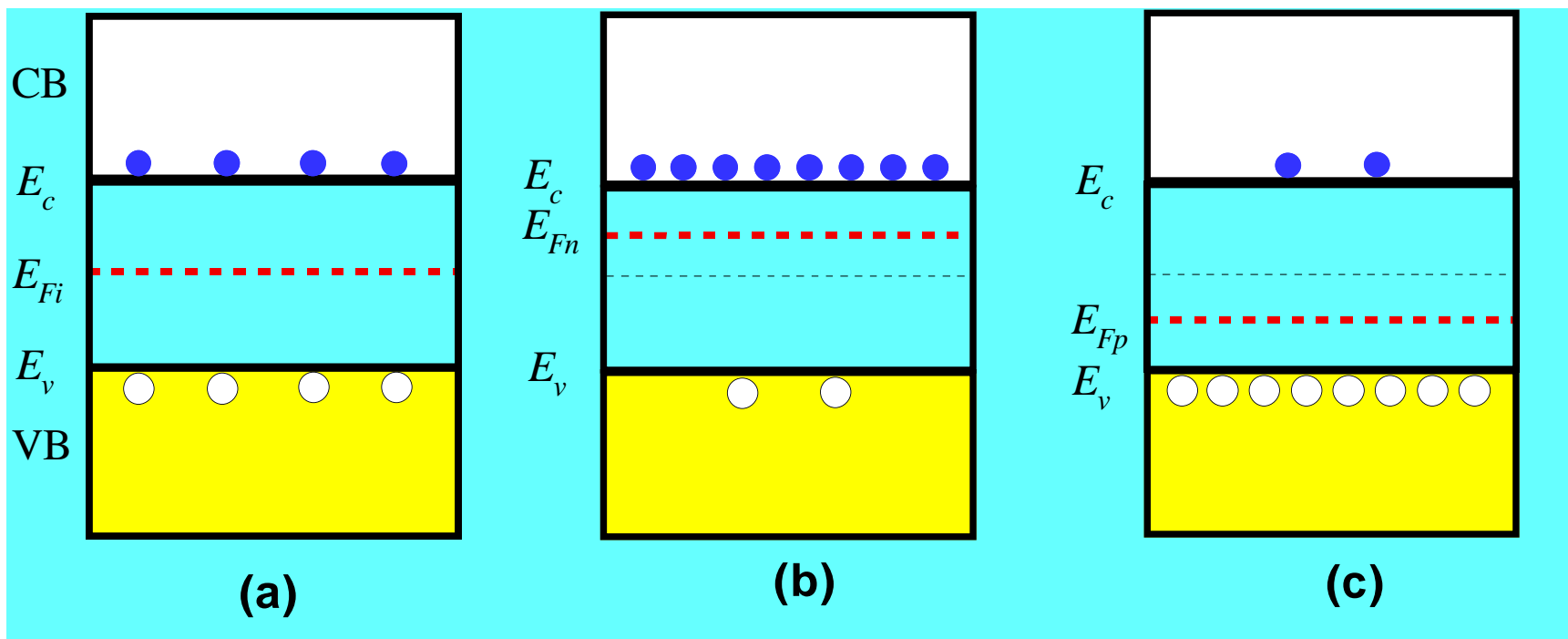
$$np = n_i^2, \text{ 空穴的浓度为 } p = n_i^2 / N_d,$$

(a) 硅中掺硼的二维结构

(b) p型硅的能带结构



受主能级在价带上面B-周围，受主能级接受价带的电子并在价带形成空穴



(a) 本征

(b) n型

(c) p型

能带图, $np = n_i^2$

定义载流子迁移率 μ 为漂移速度 v 和电场 E 之比：

$$\mu_n = \frac{v_n}{E} = \frac{v_n l}{V} \quad (cm^2 / V \cdot s)$$

$$\mu_p = \frac{v_p}{E} = \frac{v_p l}{V} \quad (cm^2 / V \cdot s)$$

V 是外电压， l 是电压
方向半导体的长度

$$J = ev_n n + ev_p p = \sigma E$$

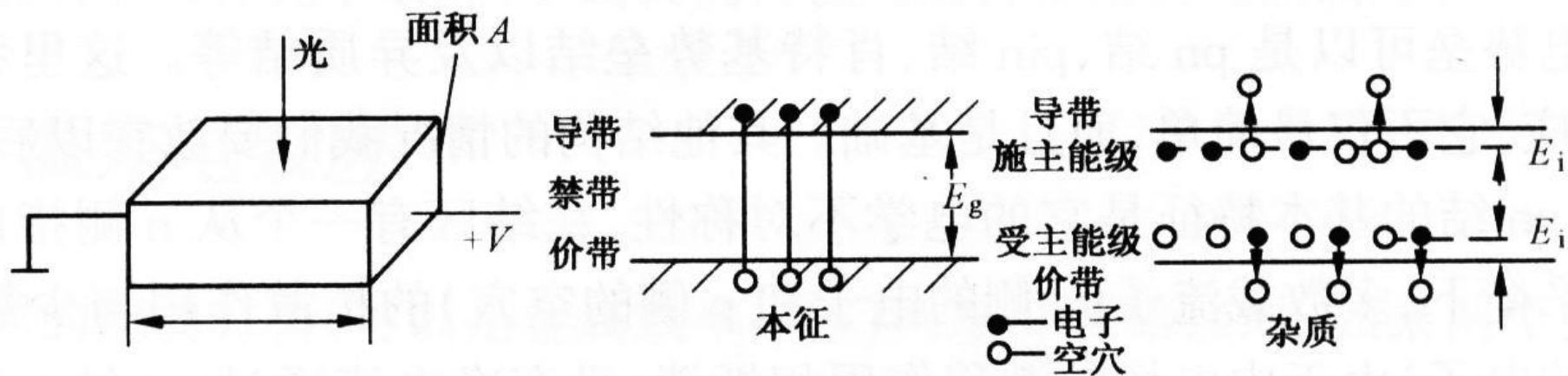
电导率 σ ： $\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (\Omega^{-1} \cdot cm^{-1})$

电导（亦称为热平衡暗电导）：

$$G = \sigma \frac{A}{l} \quad (\Omega^{-1})$$

截面积是 A

电阻 R_d （亦称暗电阻）： $R_d = \frac{l}{\sigma A} = \rho \frac{l}{A}$



产生光电导示意图

光辐射每秒产生的电子—空穴对数为N

光生载流子密度: $\Delta n = \frac{N}{Al} \cdot \tau_n$ Al 为半导体总体积

$\Delta p = \frac{N}{Al} \cdot \tau_p$ τ_n 和 τ_p 为平衡寿命

电导增加: $\Delta G = \Delta \sigma \cdot \frac{A}{l} = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) \frac{A}{l} = \frac{eN}{l^2} (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)$

电流增加: $\Delta i = V \Delta G = \frac{eNV}{l^2} (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \neq eN$
每秒光激发的电荷量

电流增益: $M = \frac{\Delta i}{eN}$

电流增益：
$$M = \frac{\Delta i}{eN} = \frac{V}{l^2} (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)$$

以N型半导体为例

$$M = \frac{V}{l^2} \mu_n \tau_n \quad \leftarrow \quad \mu_n = \frac{v_n l}{V}$$

$$M = \frac{v_n}{l} \tau_n = \frac{\tau_n}{t_n}$$

↑
渡越时间

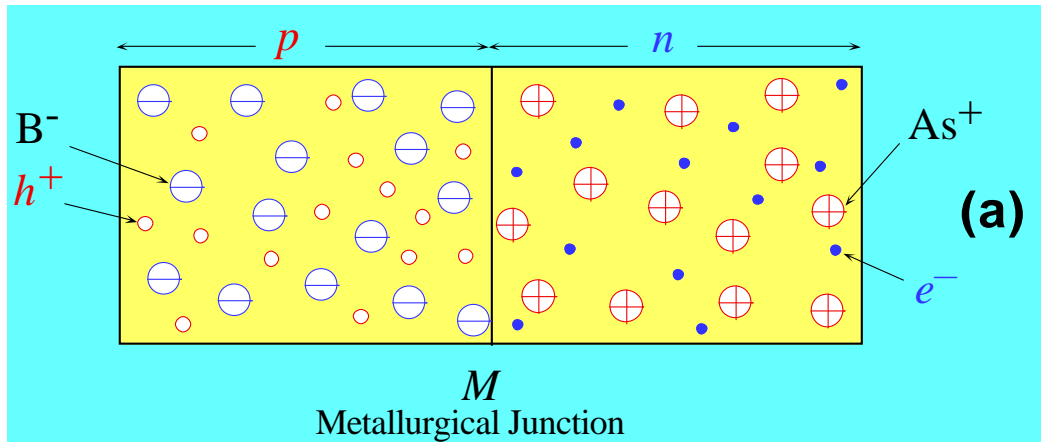
光电导效应：多数载流子形成电流

7.1.3 光伏效应

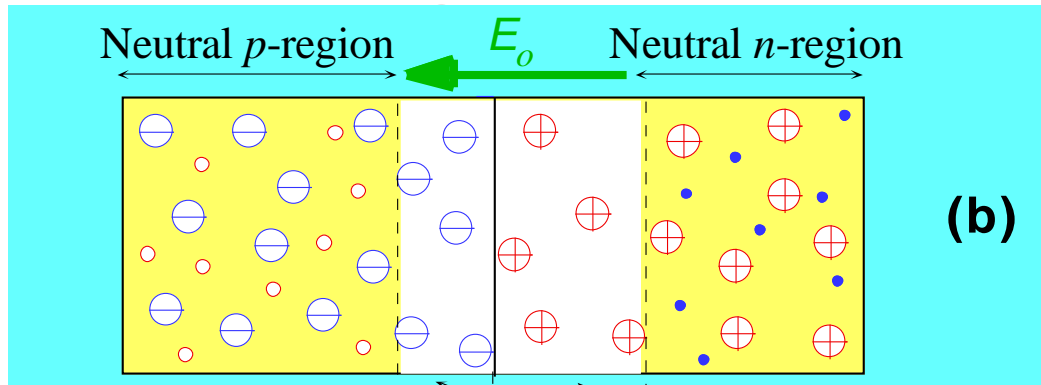
光生伏特效应 —— 如果半导体中存在内部势垒，当光激发电子—空穴对时，电势垒的内建电场将把电子—空穴对分开，从而在势垒两侧形成电荷堆积。

内部势垒：pn结、pin结、肖特基势垒结、异质结等

pn结的性质

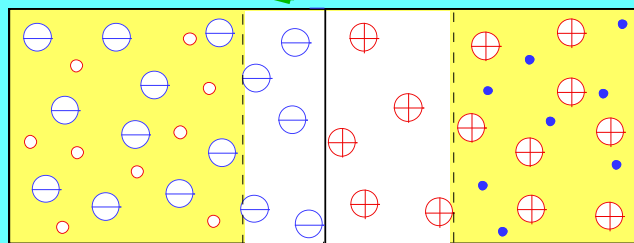


p区空穴向n区扩散
n区电子向p区扩散
产生的内电场阻止扩散



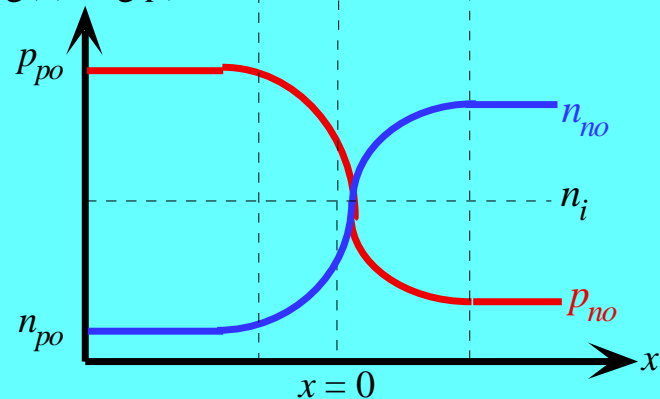
↑
SCL或耗尽层：载流子浓度低

Neutral p -region $\xleftarrow{E_o}$ Neutral n -region

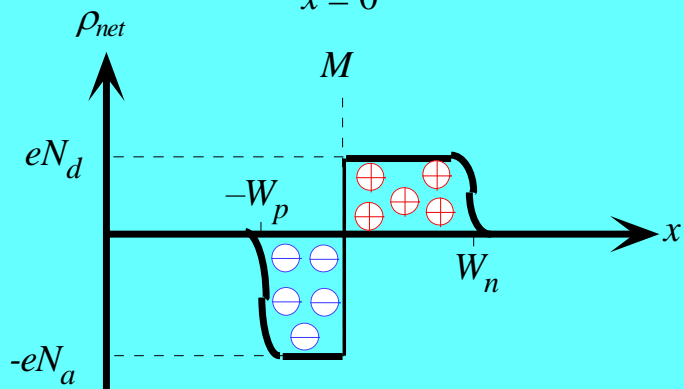


(b)

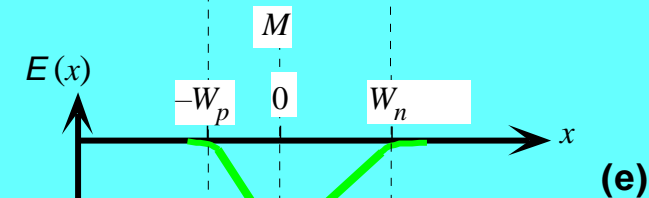
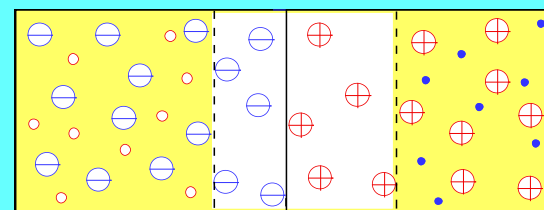
$\log(n), \log(p)$
 p_{po}
 n_{no}
 n_i
 n_{po}
 p_{no}
 $x = 0$
 ρ_{net}
 M
 $-W_p$
 W_n
 Space charge region



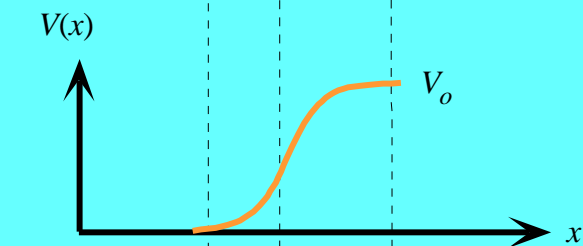
(c)



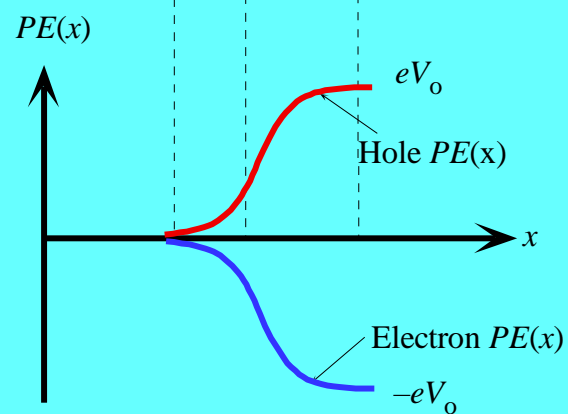
(d)



(e)

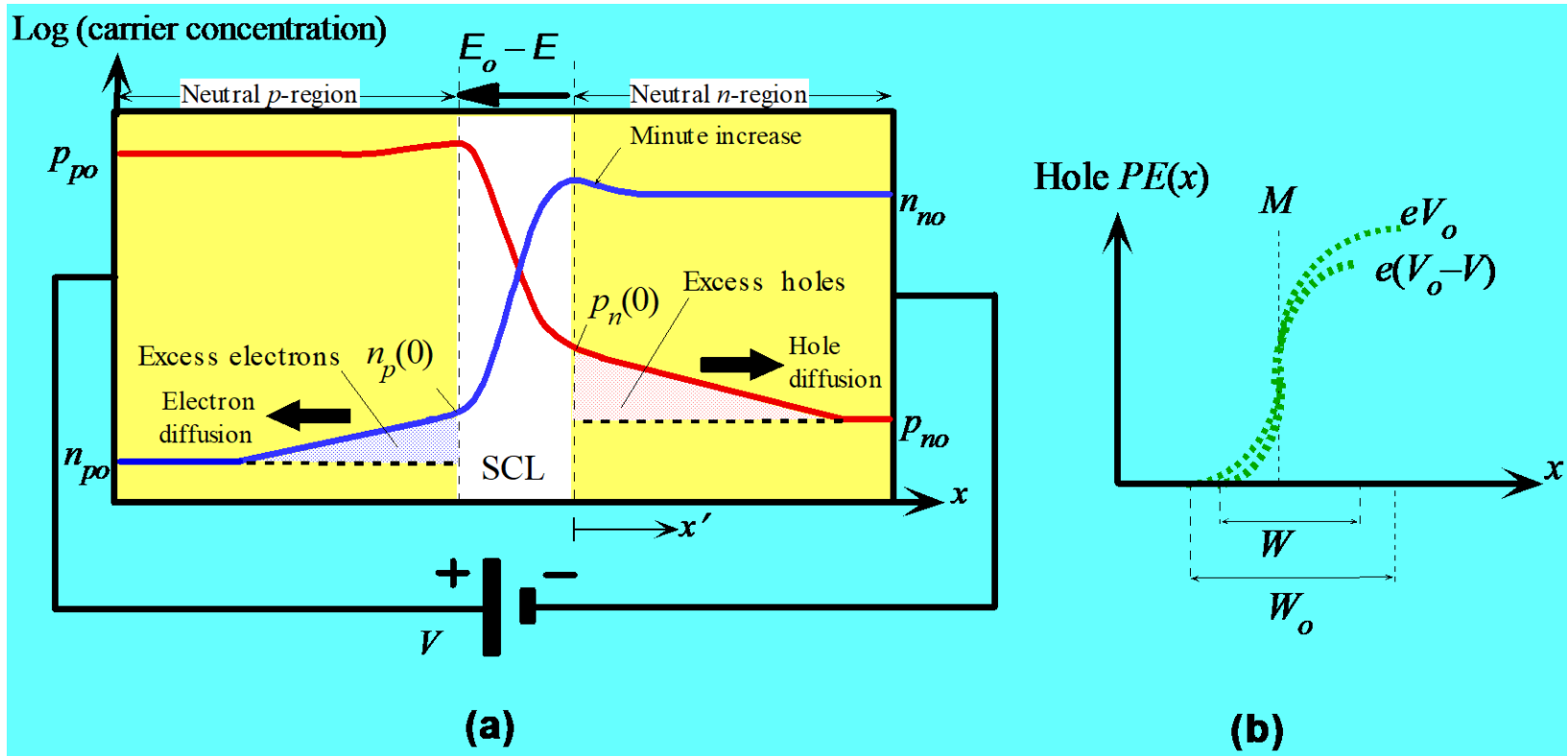


(f)



(g)

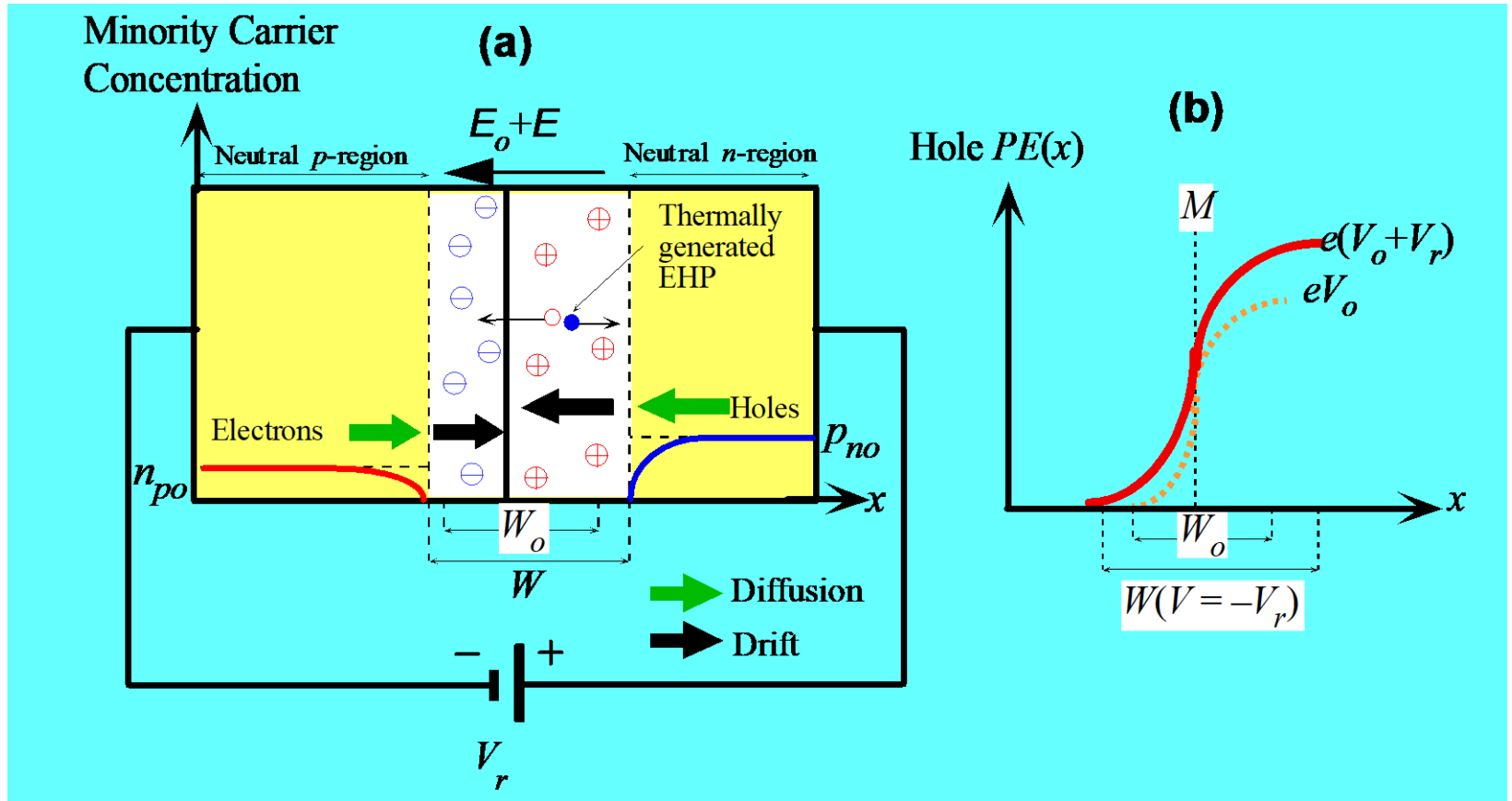
pn结正向偏压



SCL层电场（势垒）下降 → 空穴扩散到n区的几率增加
电子扩散到p区的几率增加

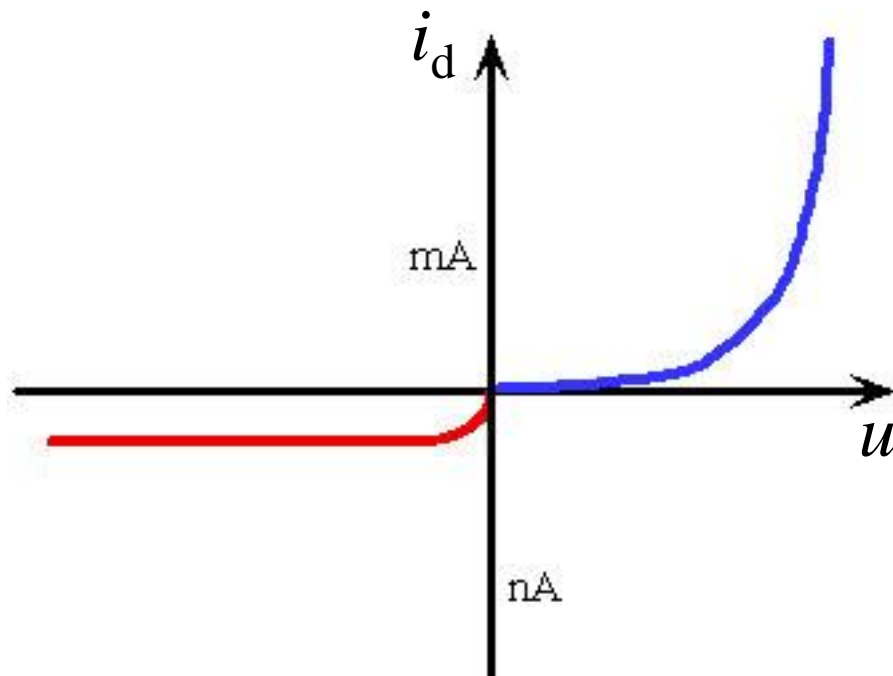
多数载流子的扩散形成电流

pn结反向偏压



负极使p区耗尽层边沿的空穴离开耗尽层，
正极使n区耗尽层边沿的电子离开耗尽层，导致耗尽层变宽

少数载流子的扩散形成电流

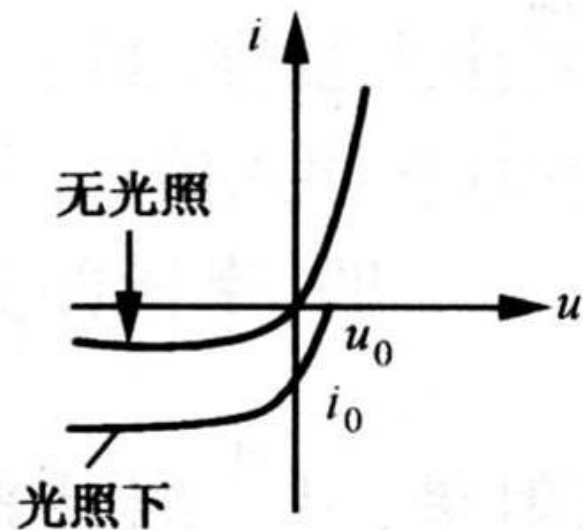
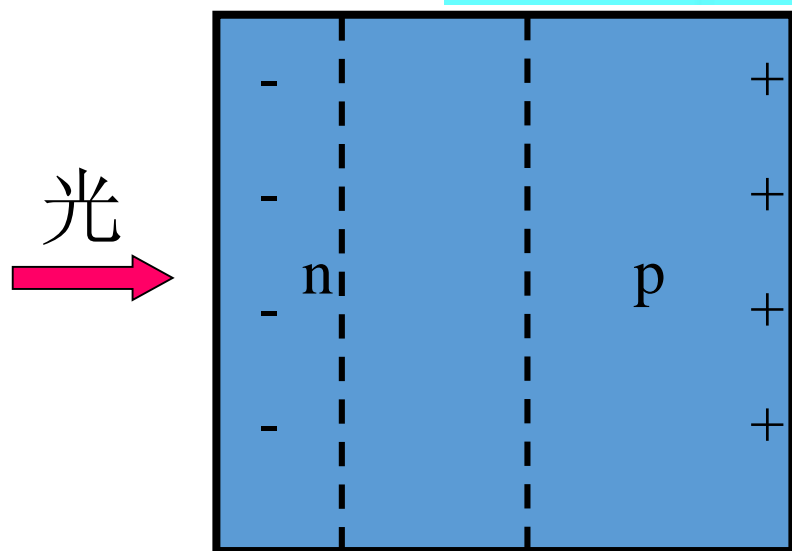
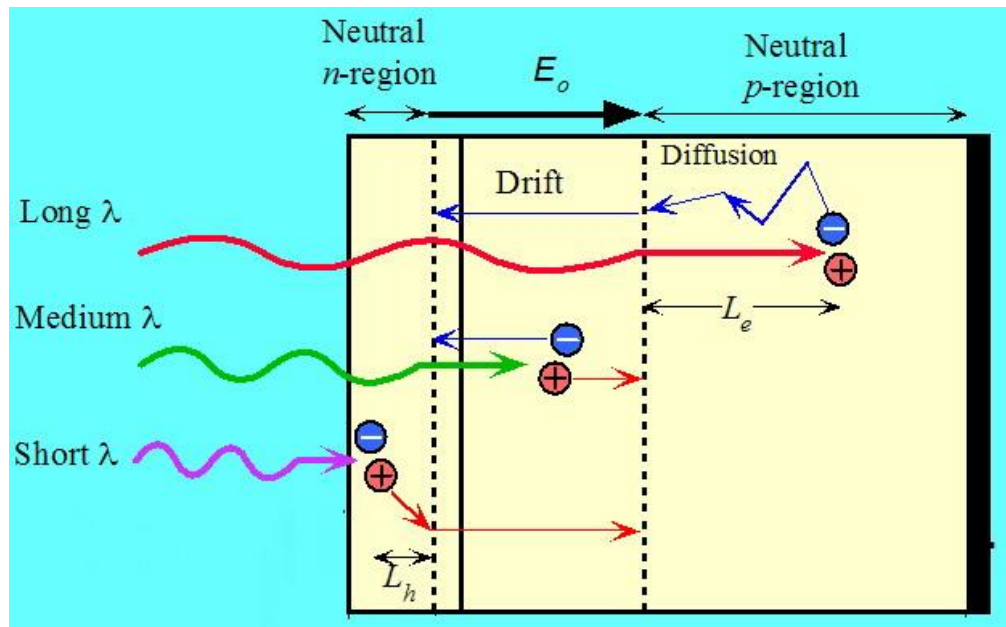


pn结及其伏安特性

伏安特性:
$$i_d = i_{s0} (e^{eu/k_B T} - 1)$$

pn结的电阻:
$$R_0 = \left. \frac{du}{di} \right|_{u=0} = \frac{k_B T}{e i_{s0}}$$

光伏效应



少数载流子形成电流

7.1 光电探测器的物理效应

7.1.1 光电效应

7.1.2 光电导效应

7.1.3 光伏效应

7.1.4 光电转换定律

$$P(t) = h\nu \frac{dn_{\text{photon}}}{dt}$$

n_{photon} : 光子数

$$i(t) = e \frac{dn_{\text{electron}}}{dt}$$

n_{electron} : 电子数

量子效率: $\eta = \frac{dn_{\text{electron}}}{dt} / \frac{dn_{\text{photon}}}{dt}$

$$\eta \frac{e}{h\nu} = \frac{dn_{\text{electron}}}{dt} \cdot e / \frac{dn_{\text{photon}}}{dt} \cdot h\nu$$

$$i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} P(t) \quad \text{光电转换定律}$$

光电转换因子: $D = \frac{e}{h\nu} \eta$

7.2 光电探测器

7.2.1 光电倍增管

7.2.2 电荷耦合器件 (CCD)

7.2.3 微通道板 (MCP)

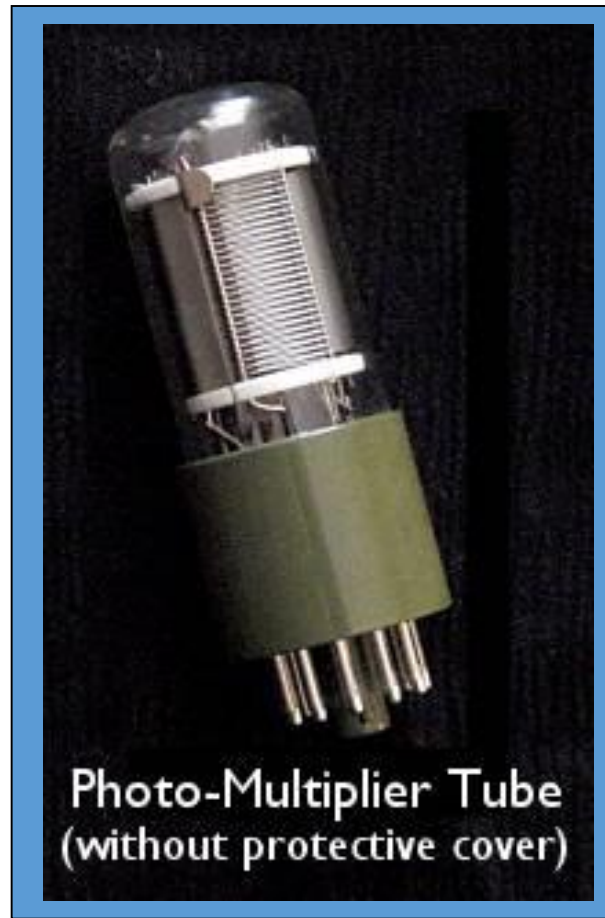
7.2.4 硅光电池

7.2.5 光电二极管

7.2.6 pin光电二极管

7.2.7 雪崩光电二极管

7.2.1 光电倍增管



$\Delta\varepsilon$: 逸出功

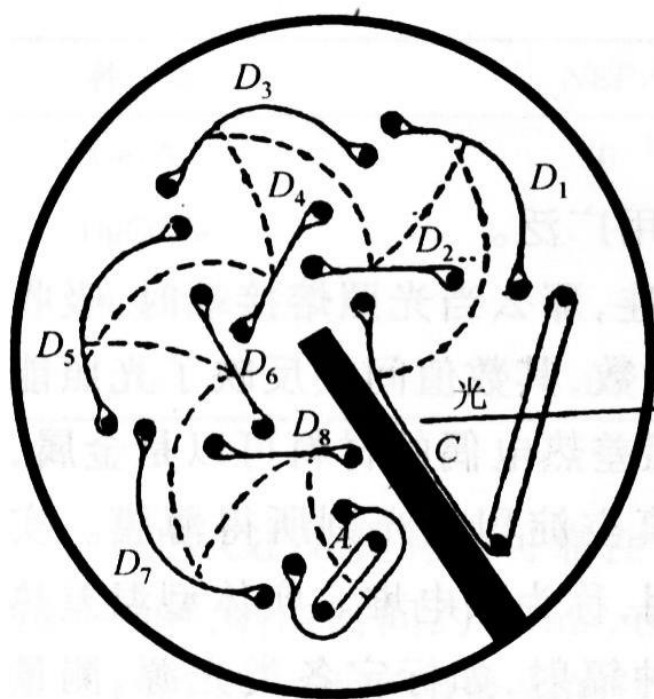
临界频率:

$$\nu_c = \Delta\varepsilon/h$$

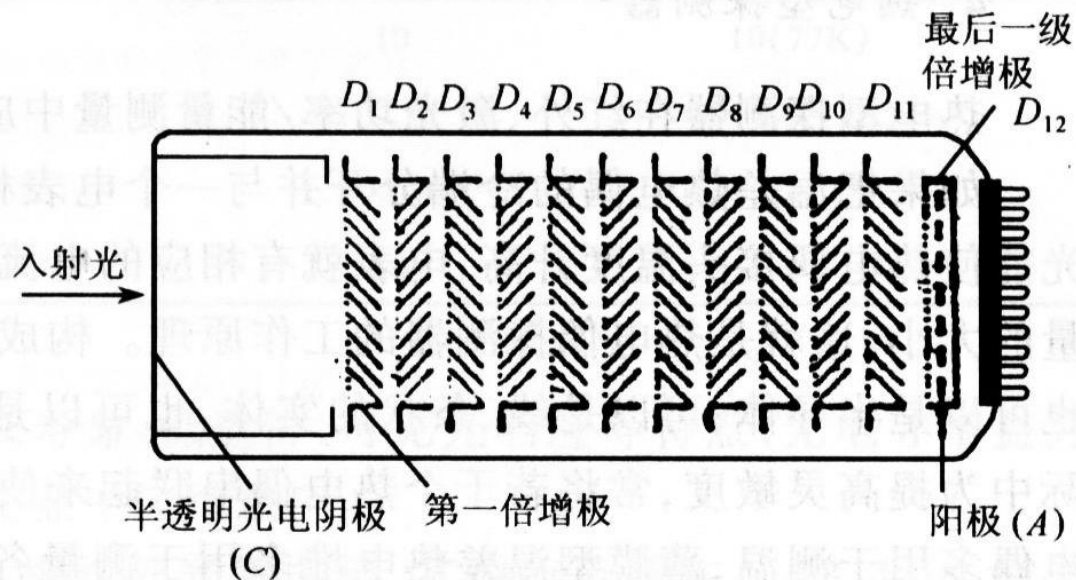
光电倍增管的外形

发射电子的动能

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \Delta\varepsilon$$

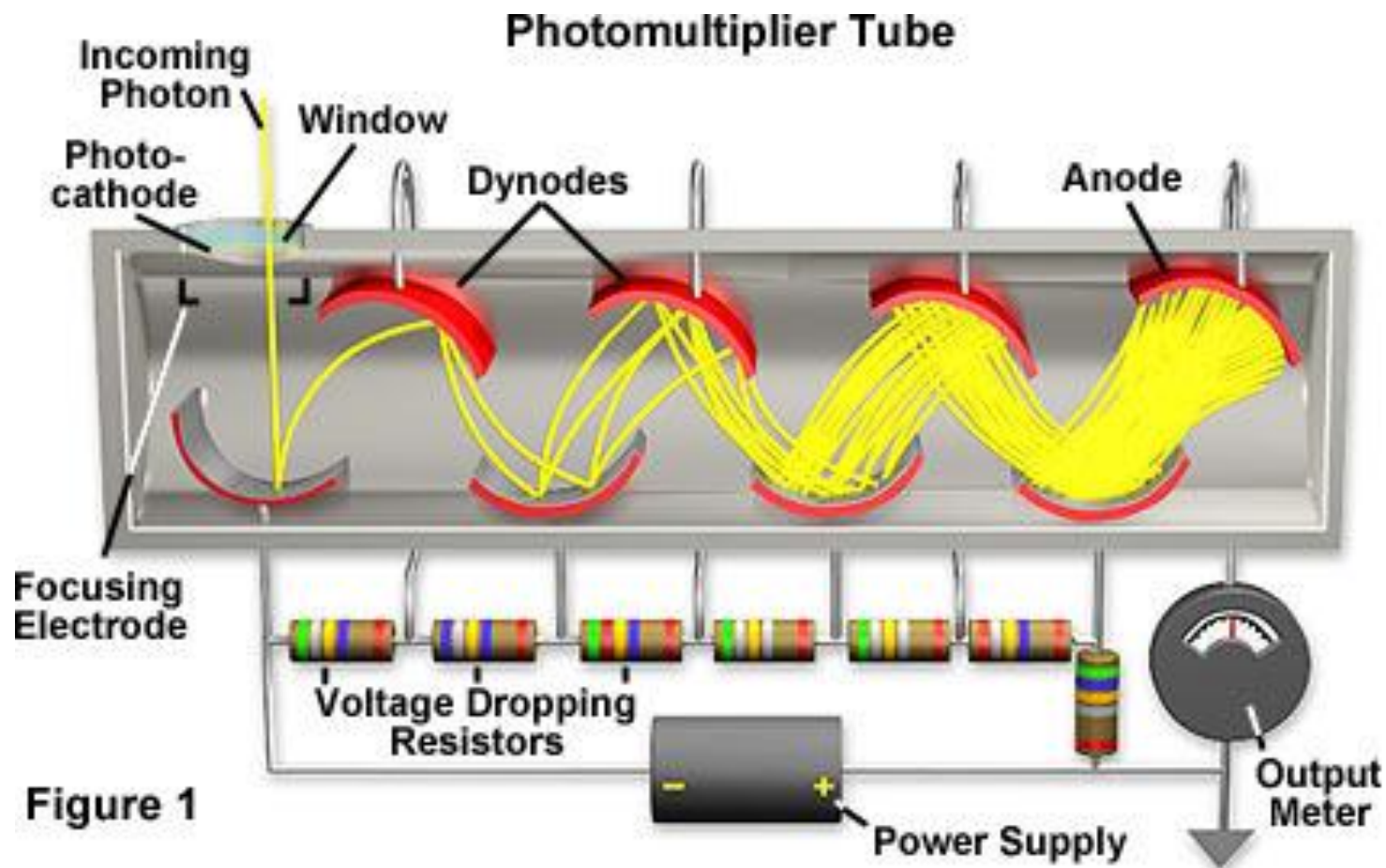


(a)圆环瓦片式

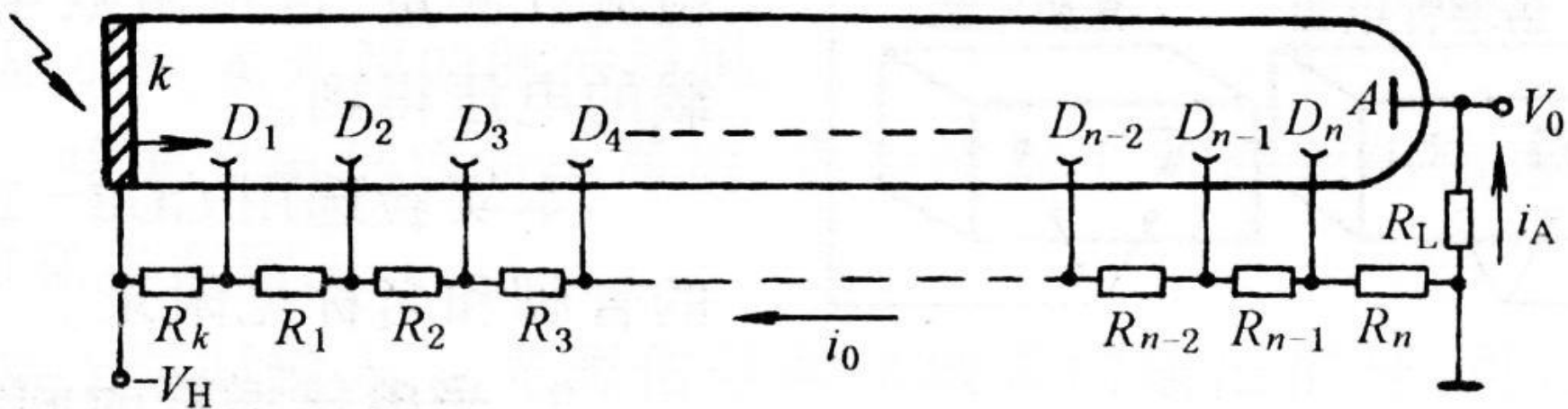


(b)百叶窗式

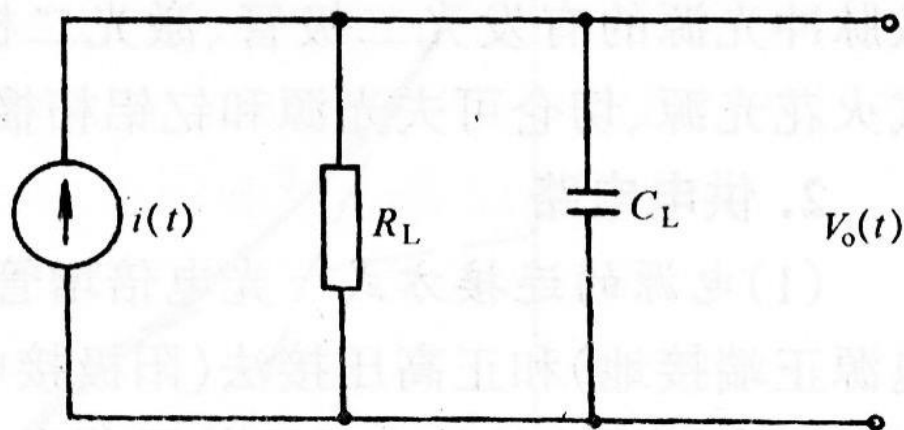
两种不同结构光电倍增管



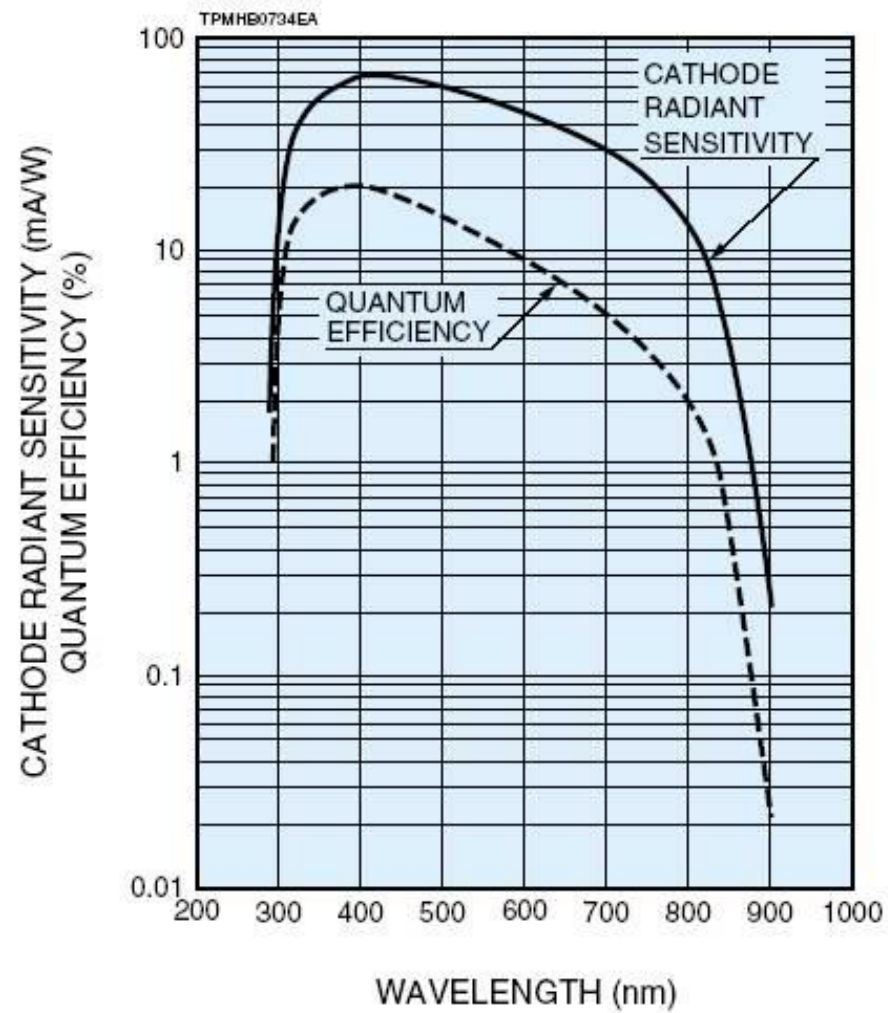
光电倍增管原理示意图



光电倍增管的分压电路



光电倍增管的输出等效电路



HAMAMATSU的R5070A光电倍增管光谱灵敏度
和量子效率分布曲线

7.2.2 电荷耦合器件（CCD）

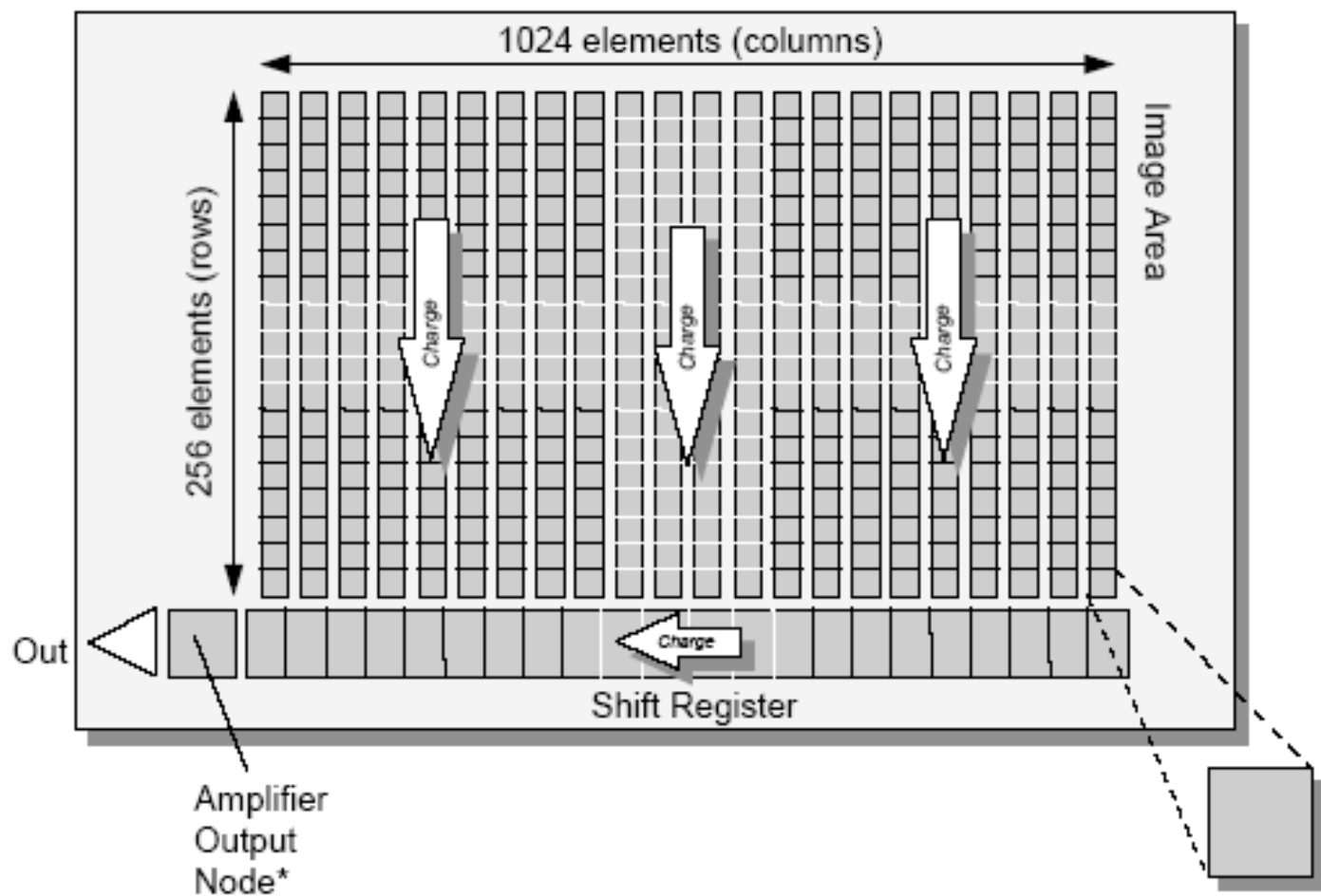
2009年诺贝尔物理学奖



威拉德·博伊尔和乔治·史密斯
发明电荷耦合器件(CCD)图像传感器1969年

Typical CCD Chip

Specification (no./size of pixels, etc.) varies according to chip model



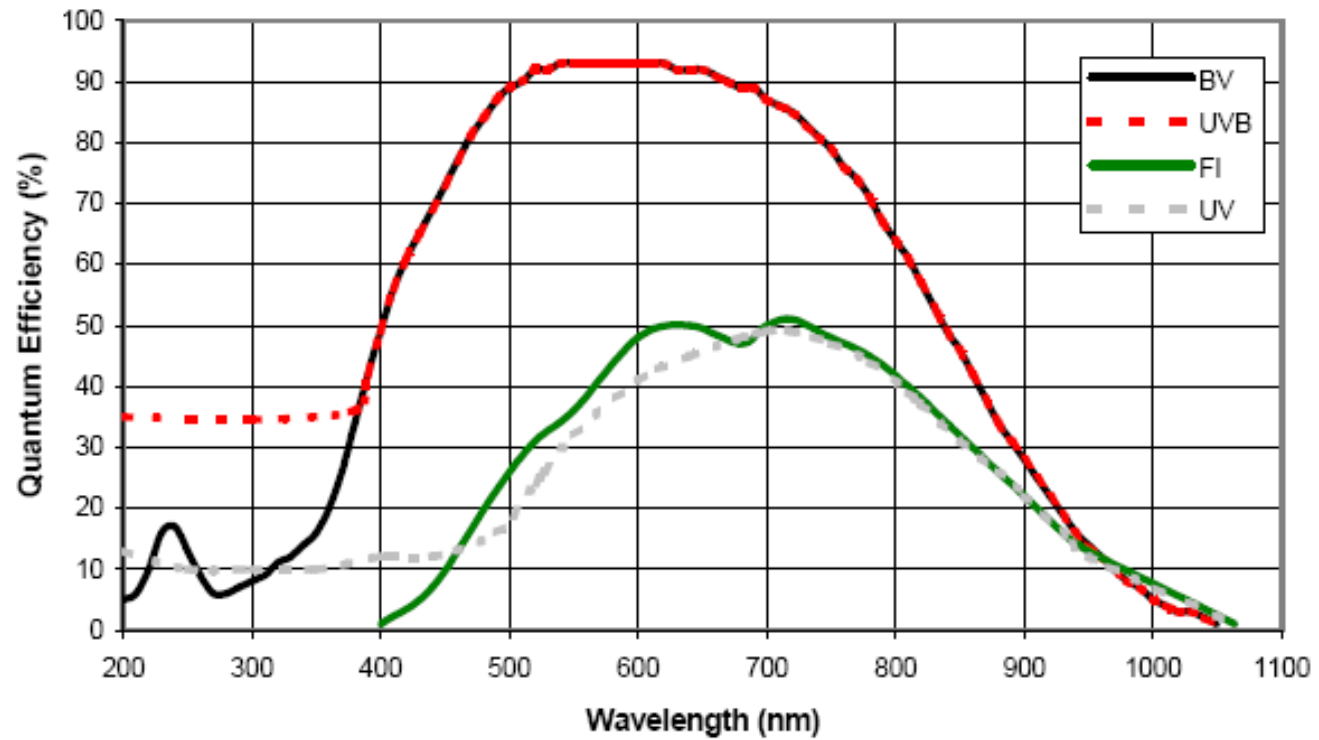
**Charge that is output from the shift register may be summed either on- or off-chip, depending on the chip model.*

优点： 线性范围大
损伤阈值高
量子效率高
灵敏度高（ICCD、EMCCD）
具有空间分辨（1-25 μm ）

噪声： 热噪声（在-70°很小）
读出噪声

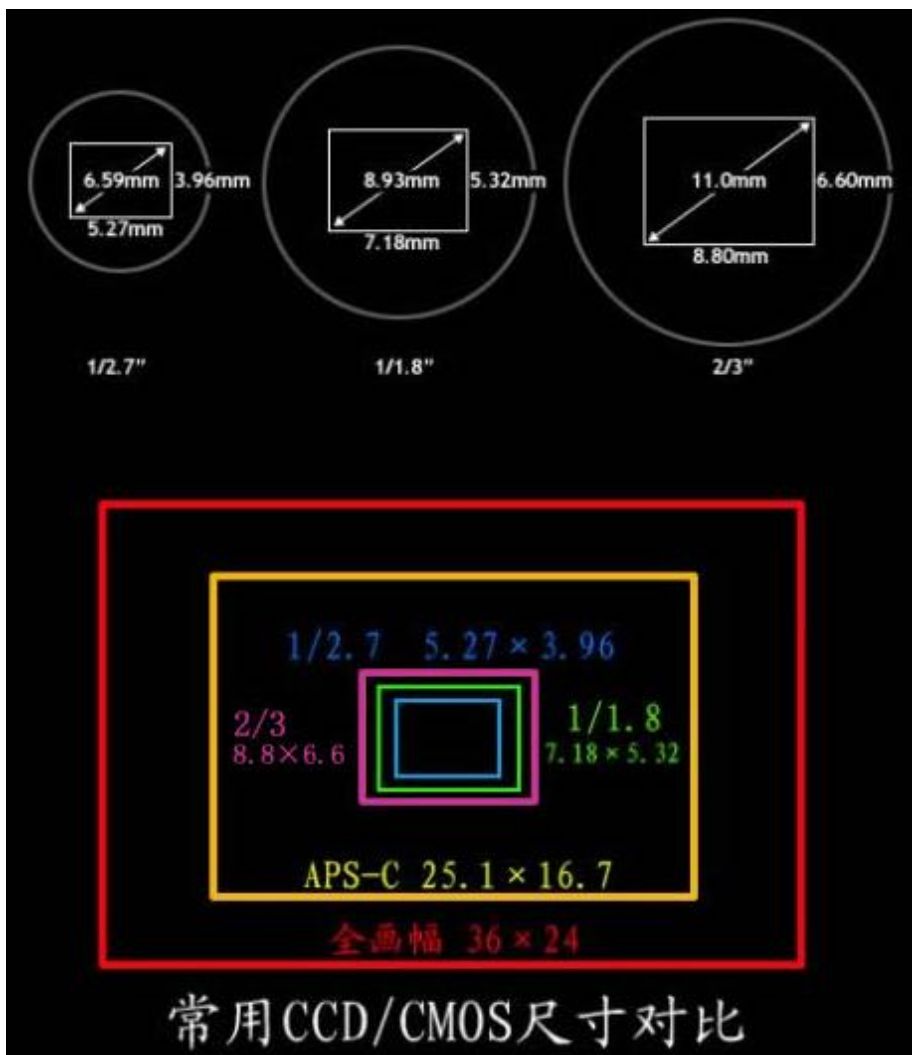


EMCCD外观



零下100度时的量子效率

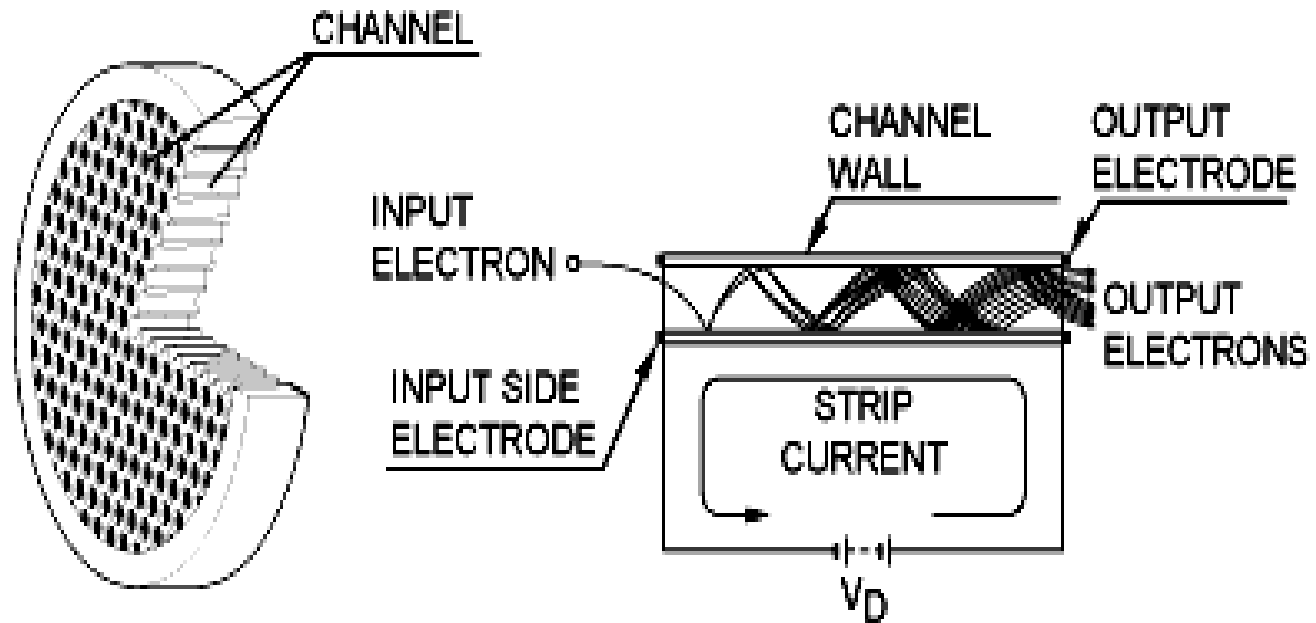
CCD尺寸比较



型号	尺寸比例	感应部分 (mm)			
		组件直径	对角线	宽	高
1/3.6"	4:3	7.056	5.000	4.000	3.000
1/3.2"	4:3	7.938	5.680	4.536	3.416
1/3"	4:3	8.467	6.000	4.800	3.600
1/2.7"	4:3	9.407	6.592	5.270	3.960
1/2"	4:3	12.700	8.000	6.400	4.800
1/1.8"	4:3	14.111	8.933	7.176	5.319
2/3"	4:3	16.933	11.000	8.800	6.600
1"	4:3	25.400	16.000	12.800	9.600
4/3"	4:3	33.867	22.500	18.000	13.500
APS-C	3:2	n/a	30.100	25.100	16.700
35 mm	3:2	n/a	43.300	36.000	24.000
645	4:3	n/a	69.700	56.000	41.500

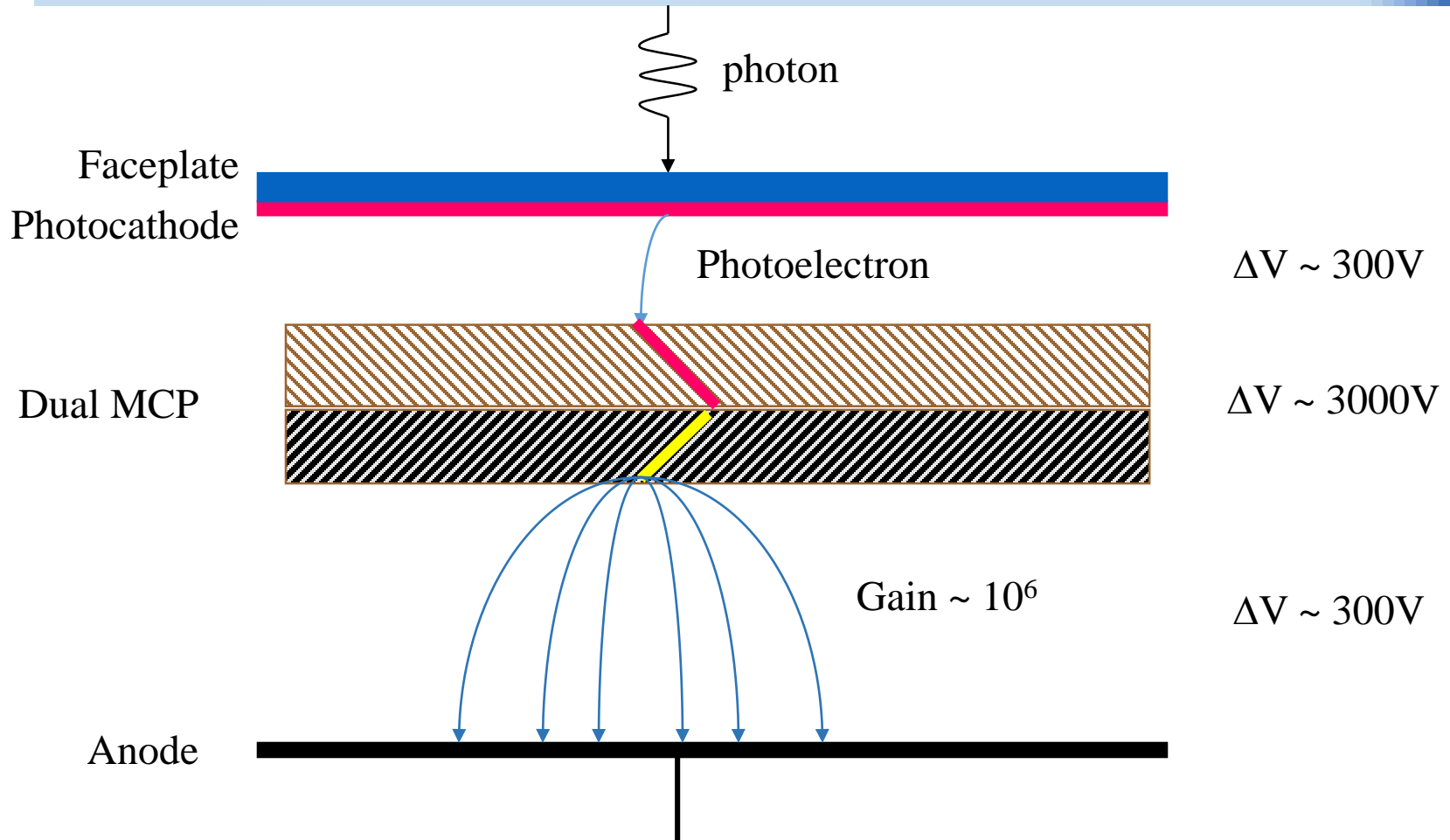
7.2.3 微通道板 (MCP)

直径
6~20
微米

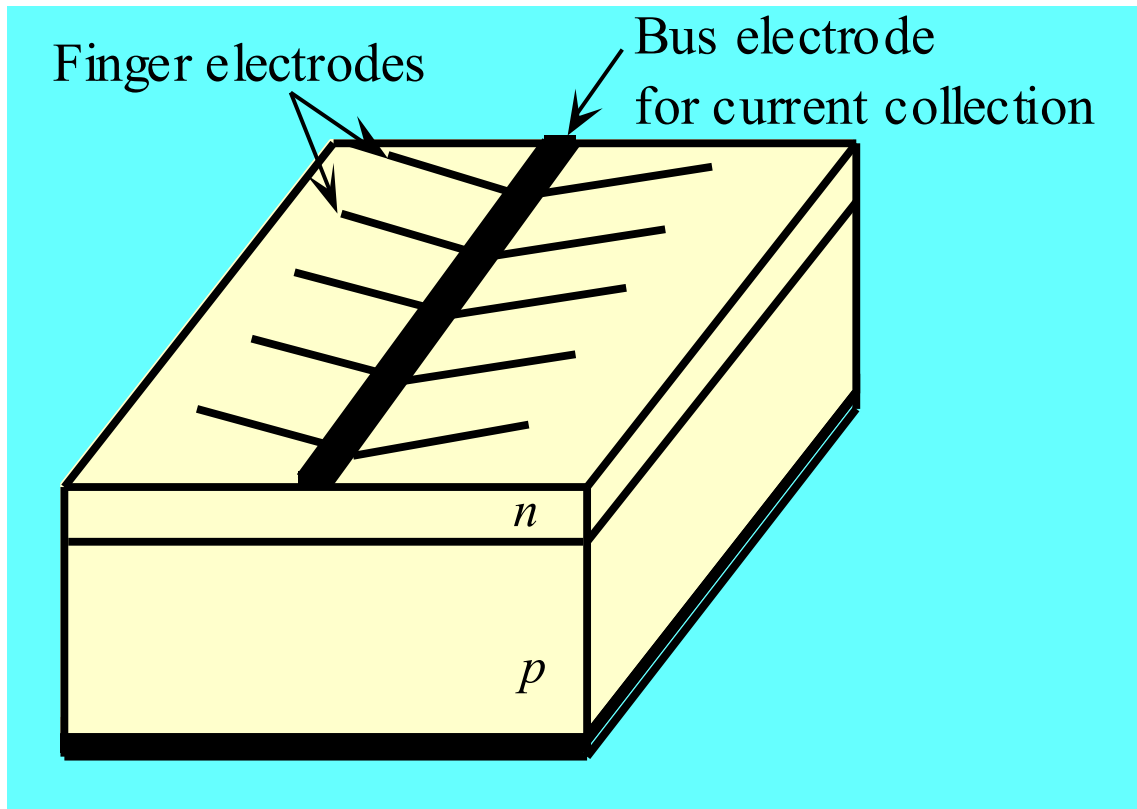


微通道板示意图

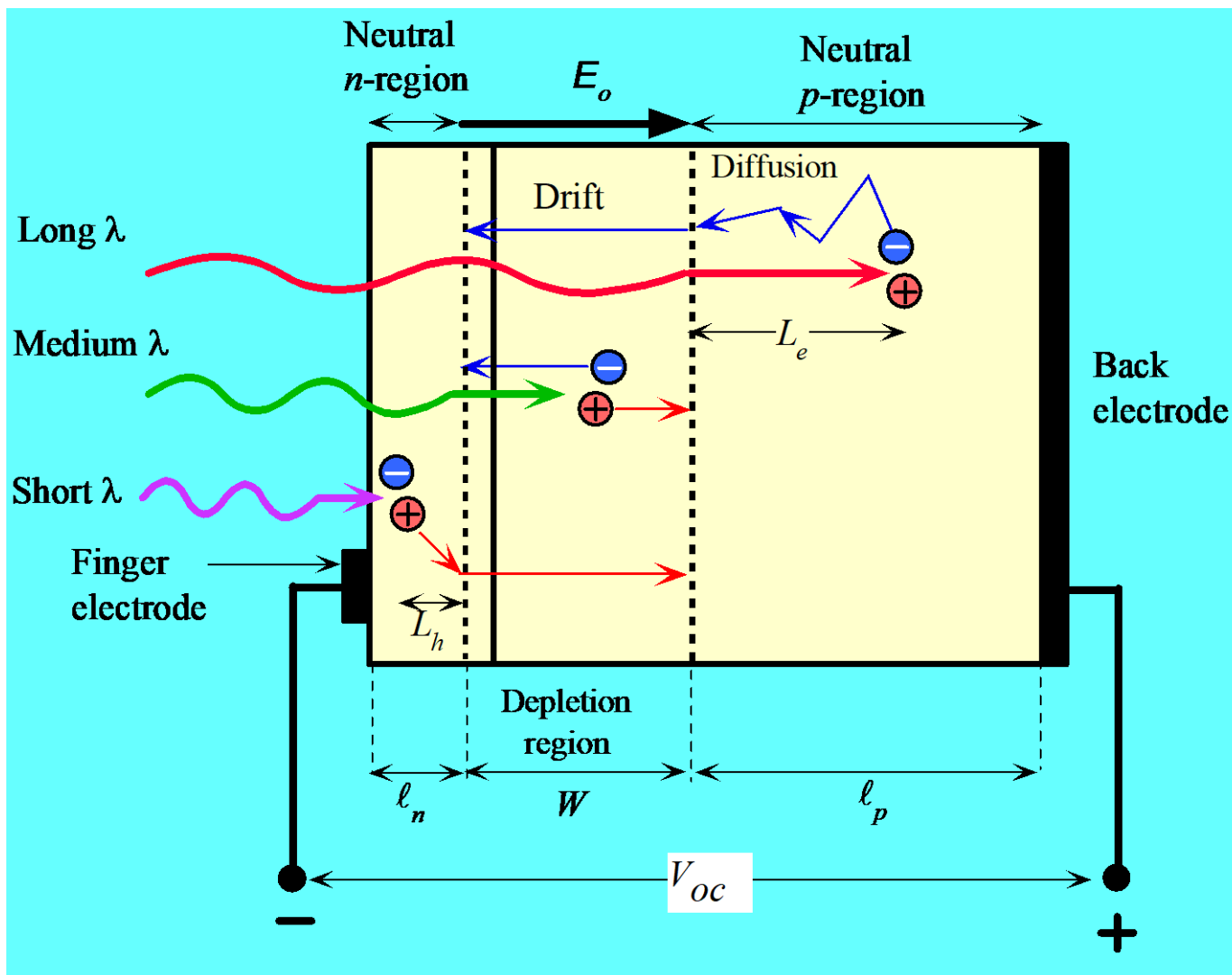
MCP-PMT Operation



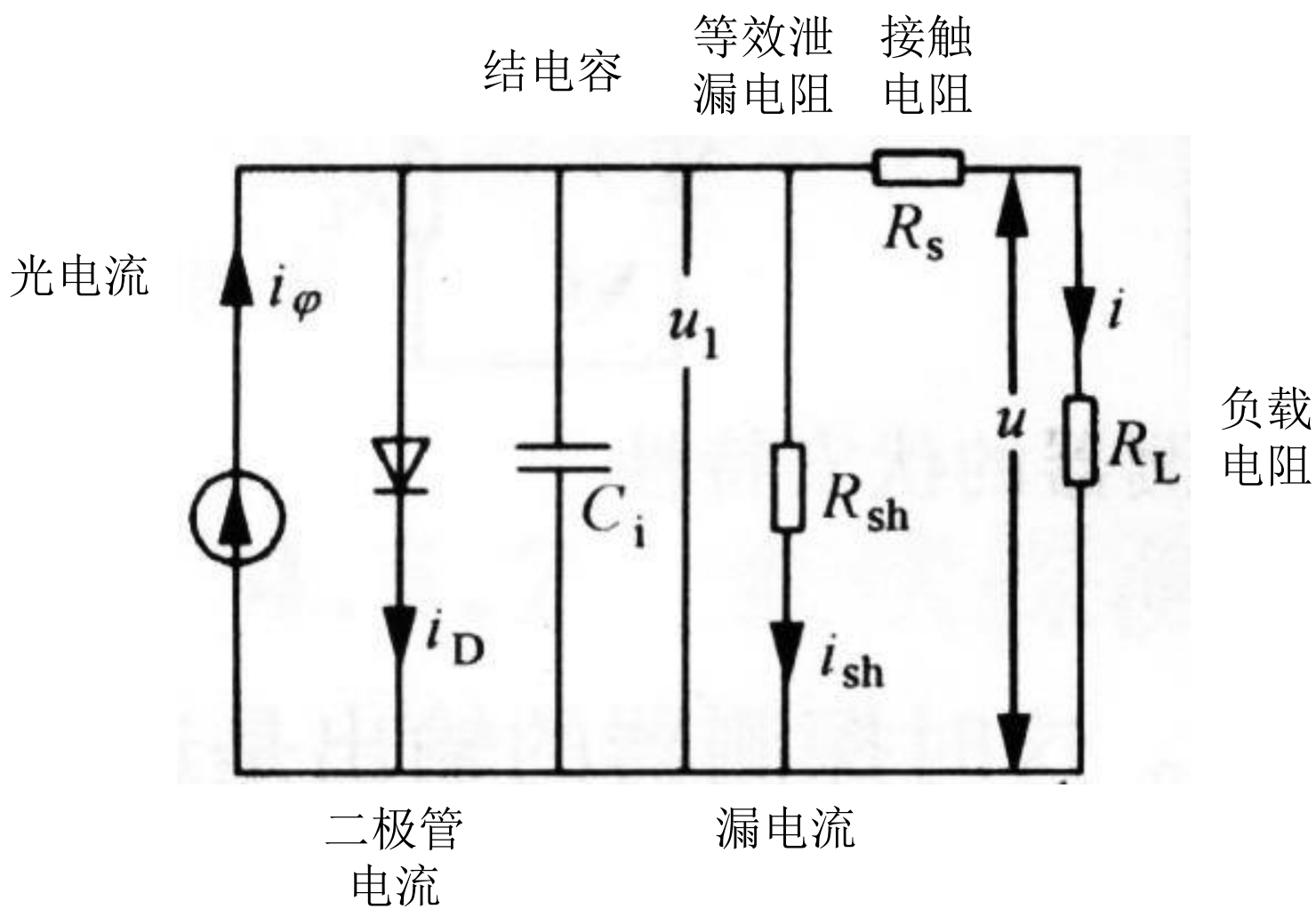
7.2.4 硅光电池



光电池结构示意图



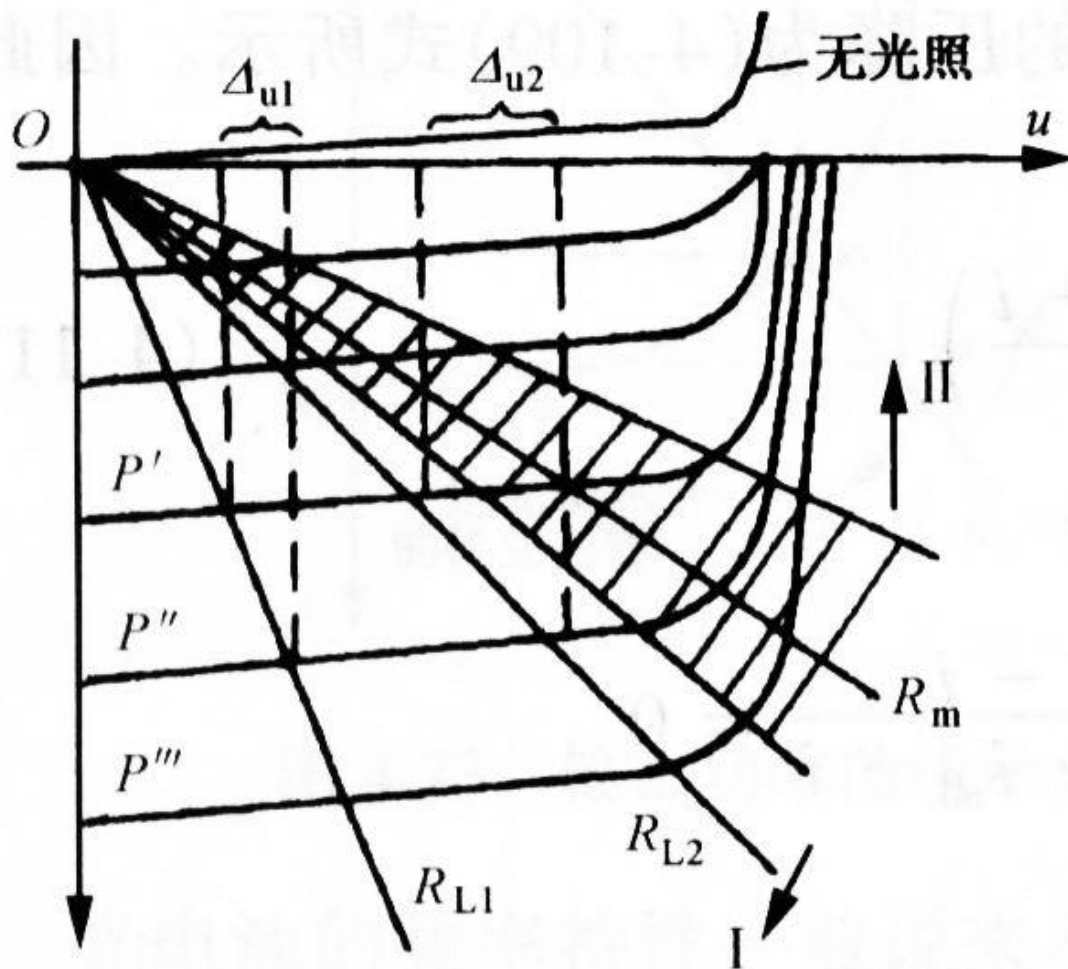
光电池的工作原理



光电池的等效电路

$$i_\phi = \frac{e\eta}{h\nu} P$$

$$i_\phi = i_D + i_{sh} + i$$

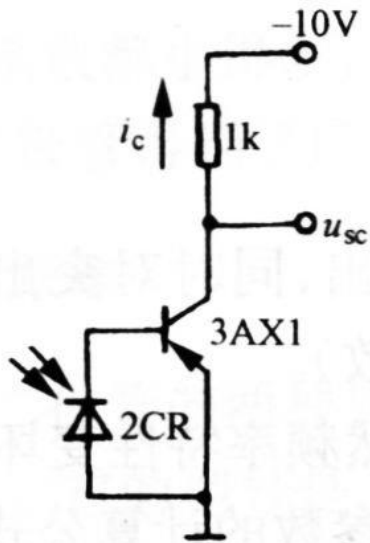


II区：
电压输出区

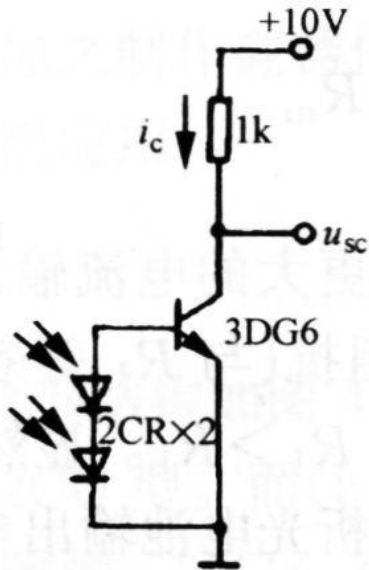
I区：电流输出区

光电流区工作特性示意图

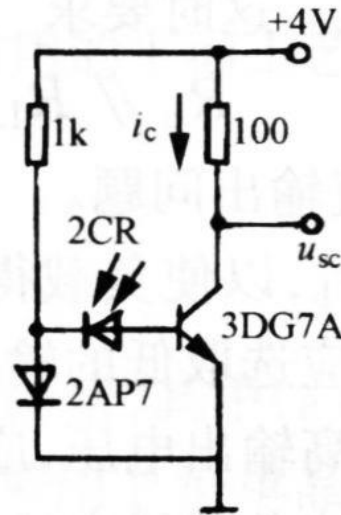
$$u_{sc} = i_{sc} \cdot R_f$$



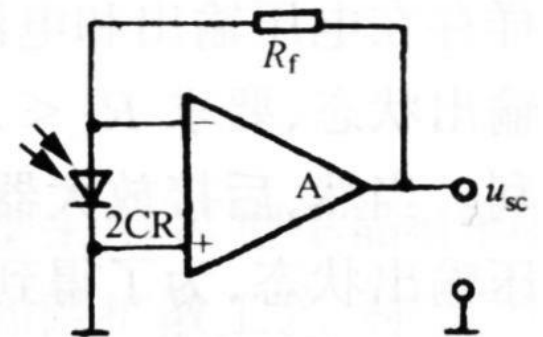
(a)



(b)



(c)



(d)

光电池用以探测慢变化光信号的基本变换电路

优点：在某些情况下使用比较方便

价格便宜

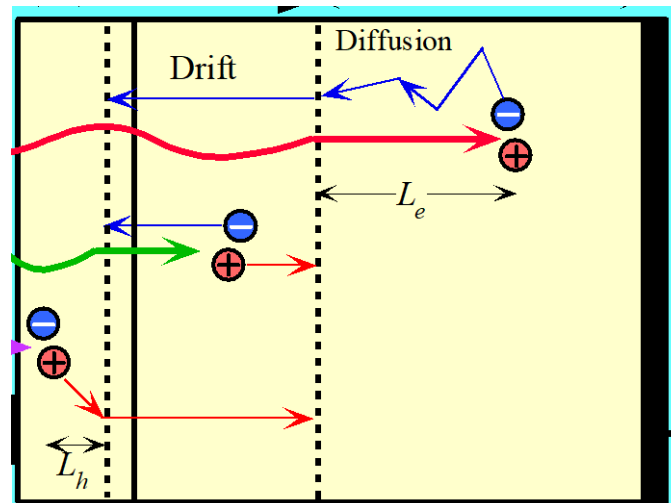
光谱响应宽（很适合近红外探测）

寿命长

稳定性好

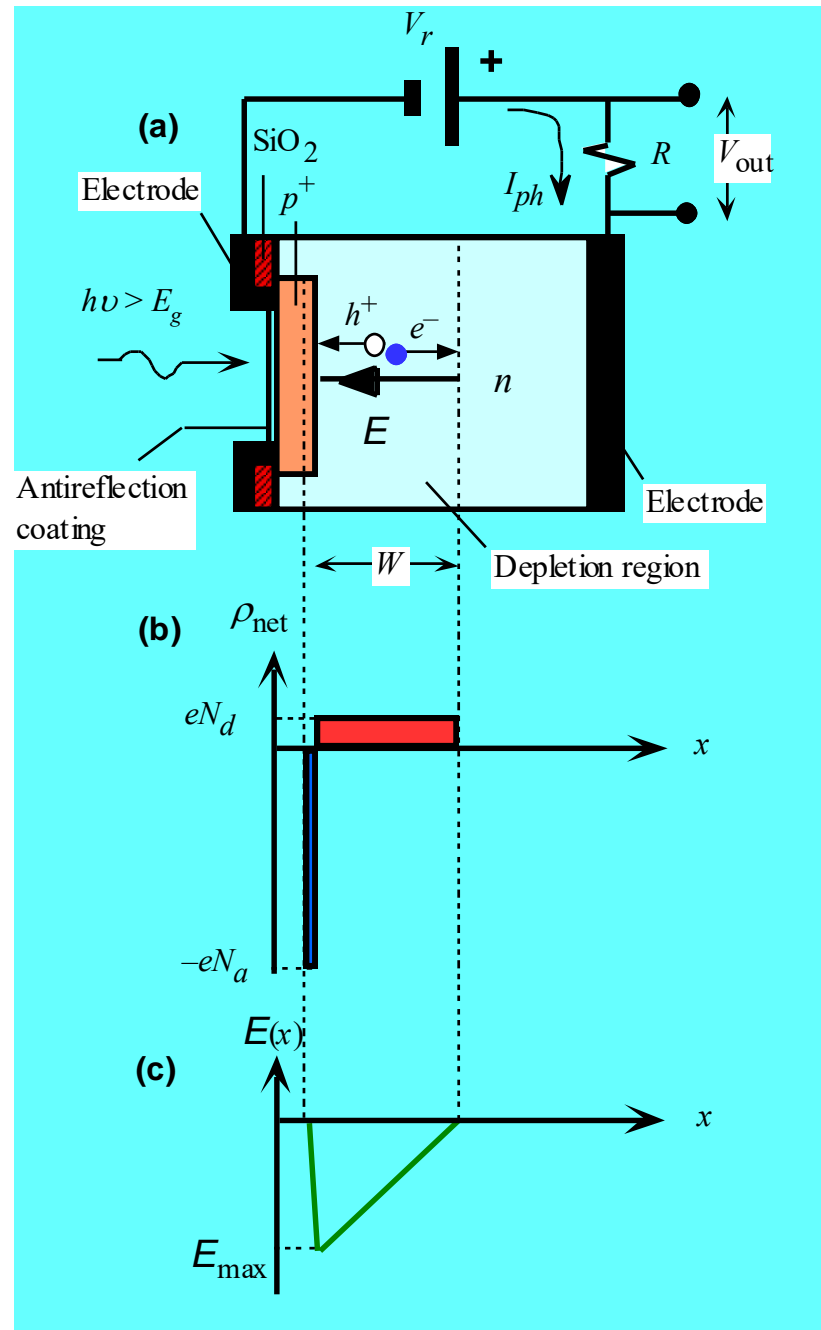
接收面积可以比较大

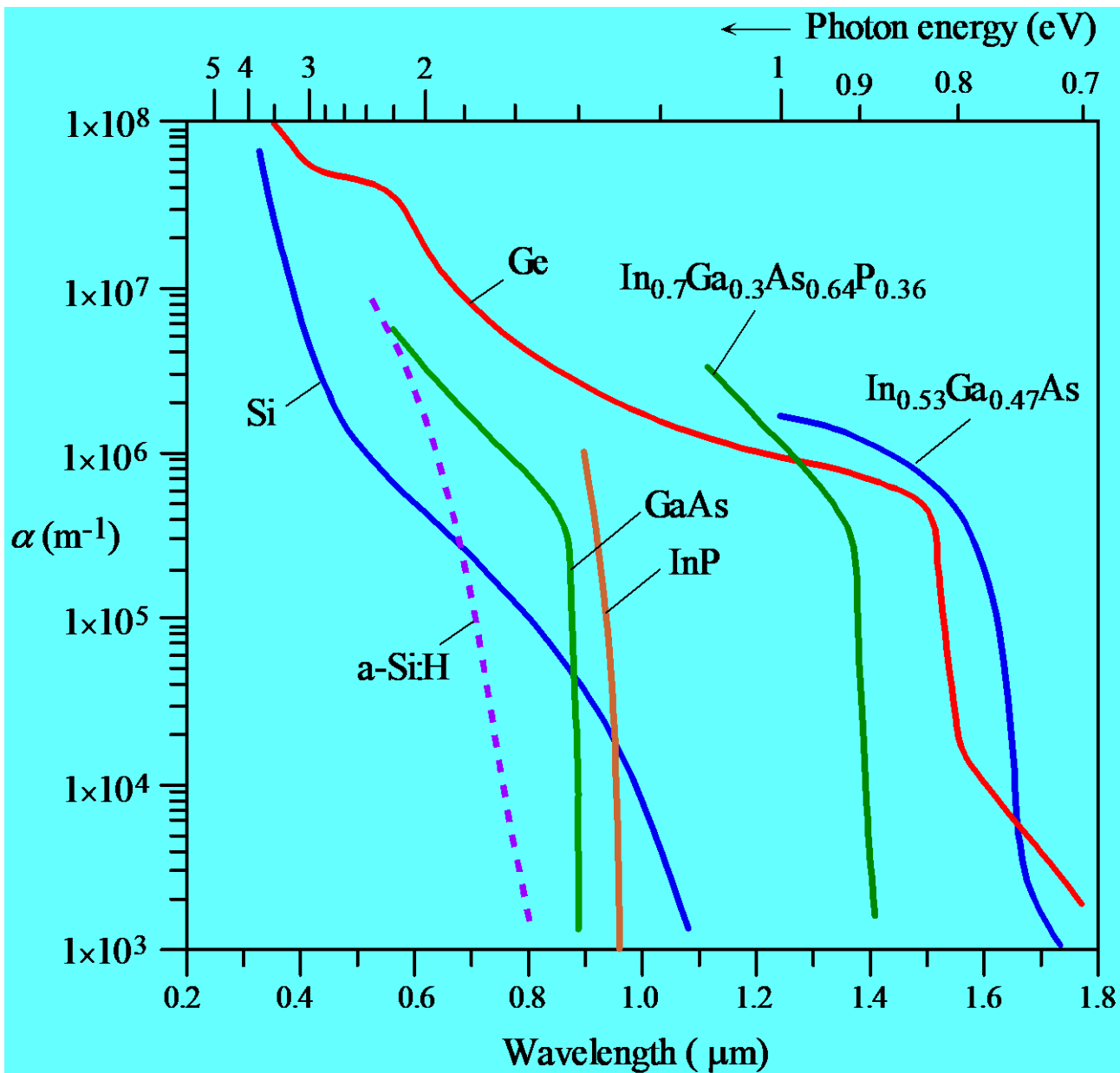
缺点：响应慢、灵敏度低



7.2.5 光电二极管

加反向偏压的
光电二极管





Absorption coefficient (α) vs. wavelength (λ) for various semiconductors
(Data selectively collected and combined from various sources.)

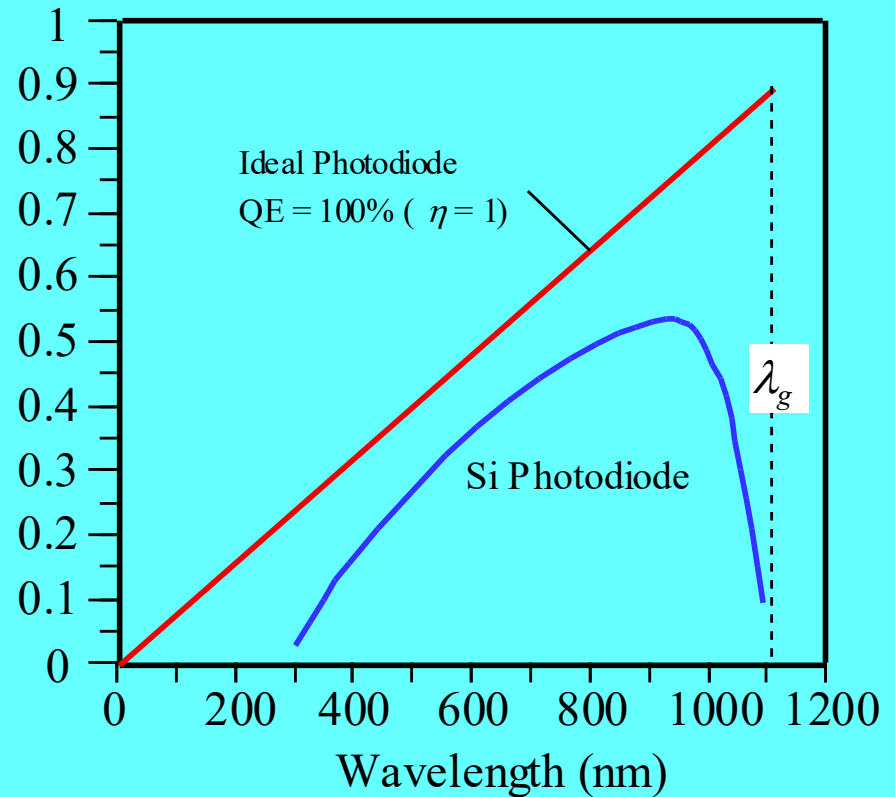
响应度R:

$$R = \frac{\text{光电流 (A)}}{\text{入射光功率 (W)}} = \frac{I_{ph}}{P_0}$$

$$\eta = \frac{I_{ph} / e}{P_0 / h\nu}$$

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc}$$

Responsivity (A/W)



Responsivity (R) vs. wavelength (λ) for an ideal photodiode with QE = 100% ($\eta = 1$) and for a typical commercial Si photodiode.

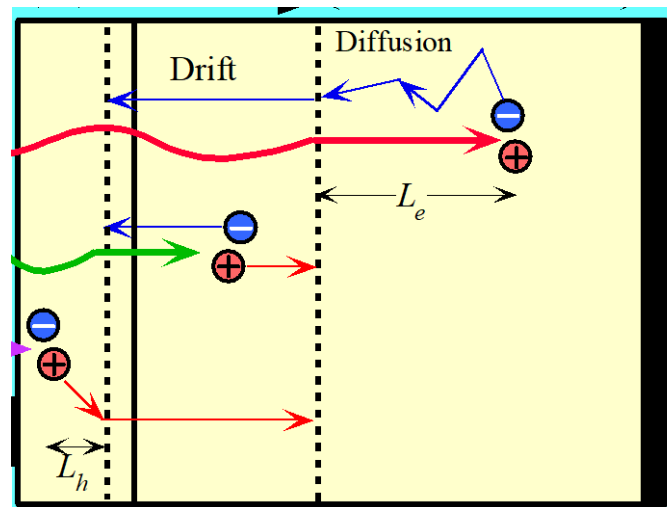


Silicon PN Photodiodes

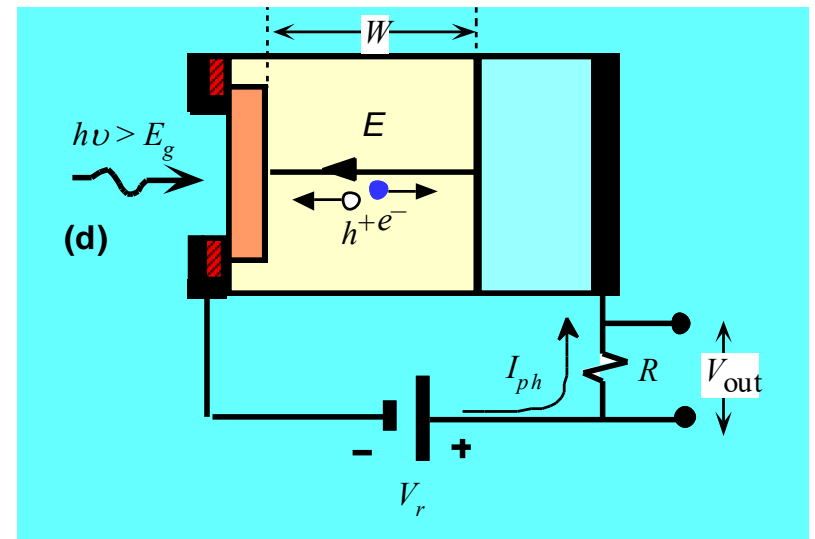
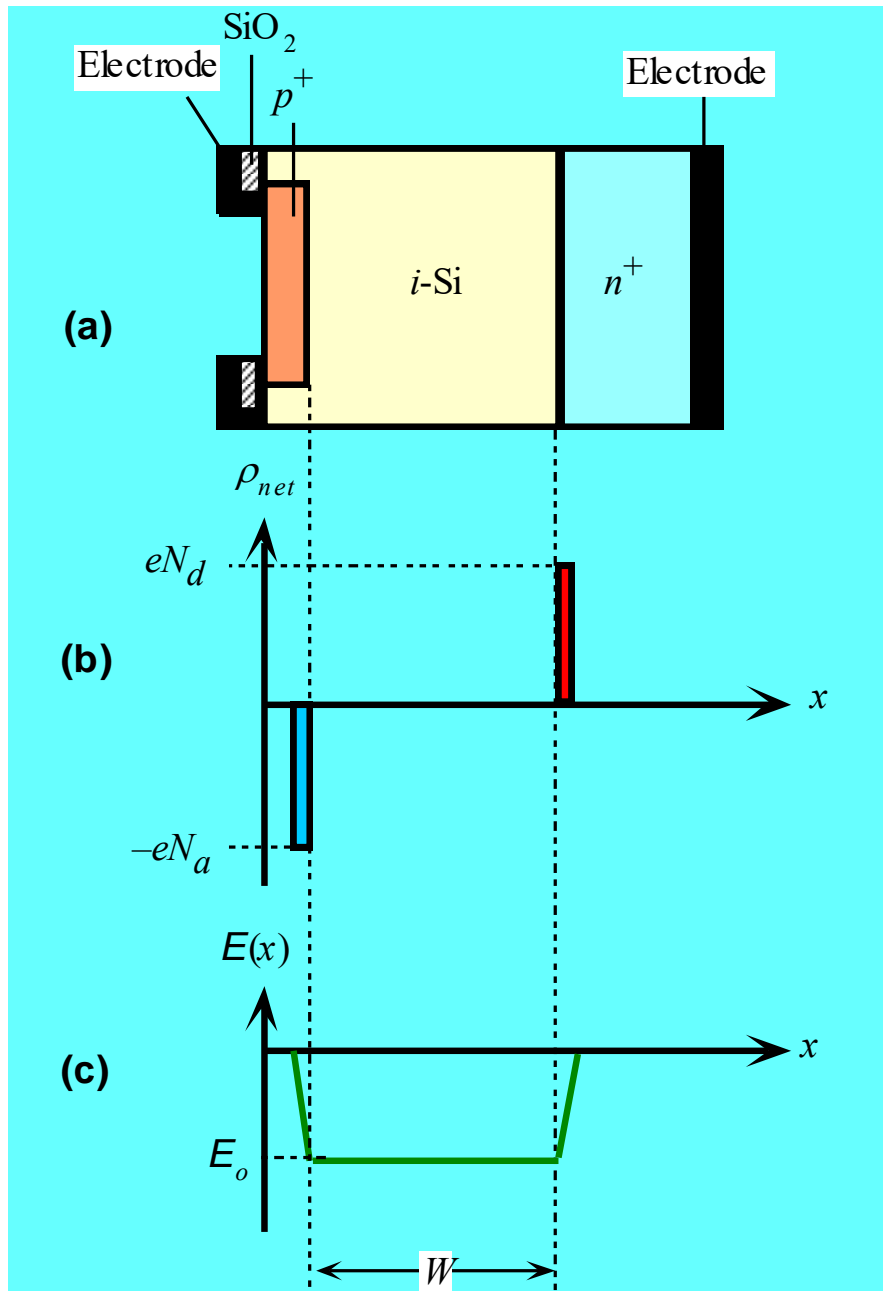
优点： 廉价

缺点： 结电容大

耗尽层薄， 不利吸收



7.2.6 pin光电二极管



理想的pin光电二极管示意图

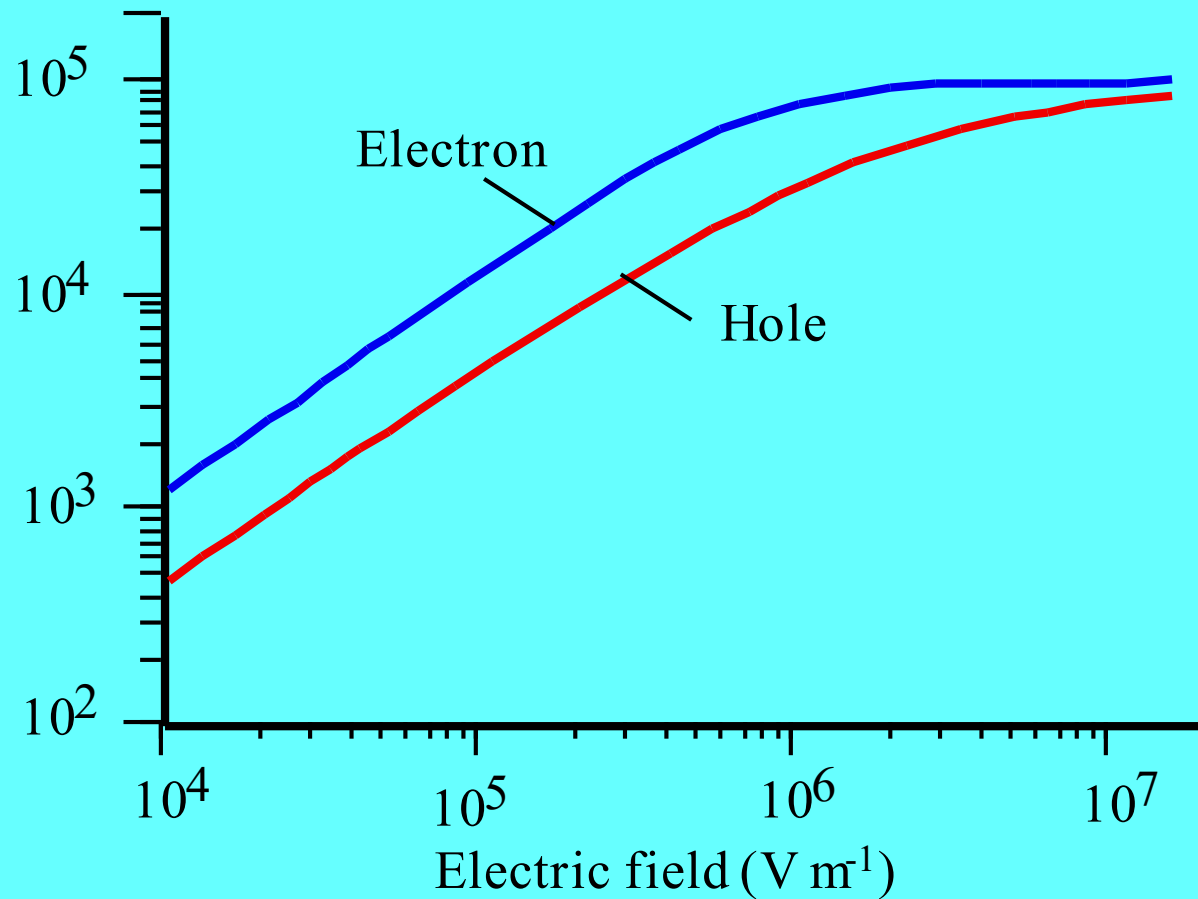
响应时间由载流子通过本征区的渡越时间决定，增加本征区的厚度 W 可以提高量子效率，同时也降低响应速度。

渡越时间：

$$t_{drift} = \frac{W}{v_d}$$

↑
漂移速度

Drift velocity (m s^{-1})



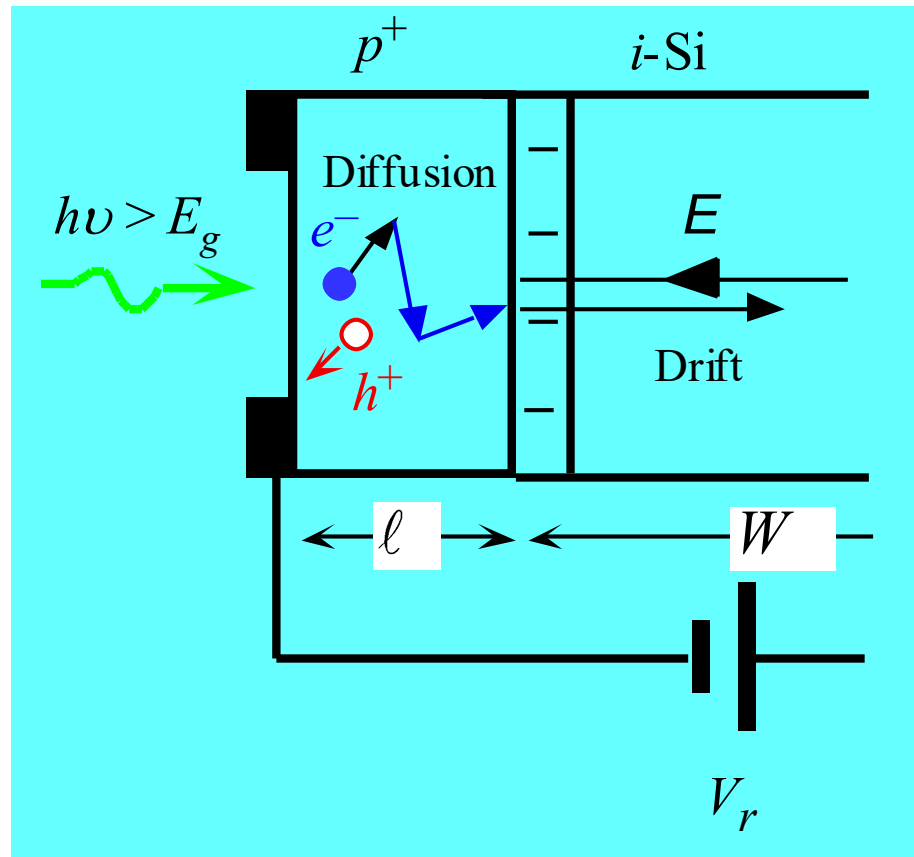
Drift velocity vs. electric field for holes and electrons in Si.

增加本征层厚度：提高量子效率、减小结电容

增加渡越时间

提高响应速度方法：减小面积

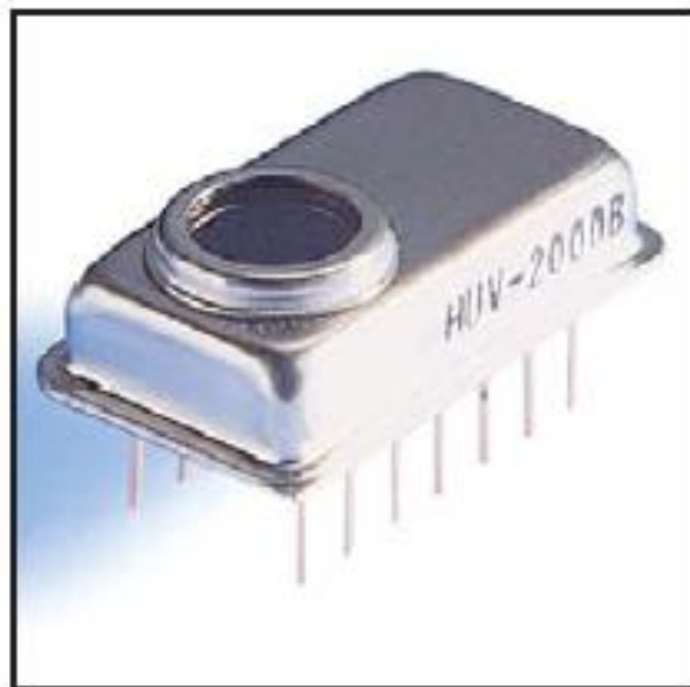
减小本征层厚度



入射光波长很短时，吸收主要发生在 p^+ 区表面，
电子扩散时间远大于漂移时间



Silicon PINs—UV Enhanced



**Silicon PIN Photodiodes
and Modules**

7.2.7 雪崩光电二极管

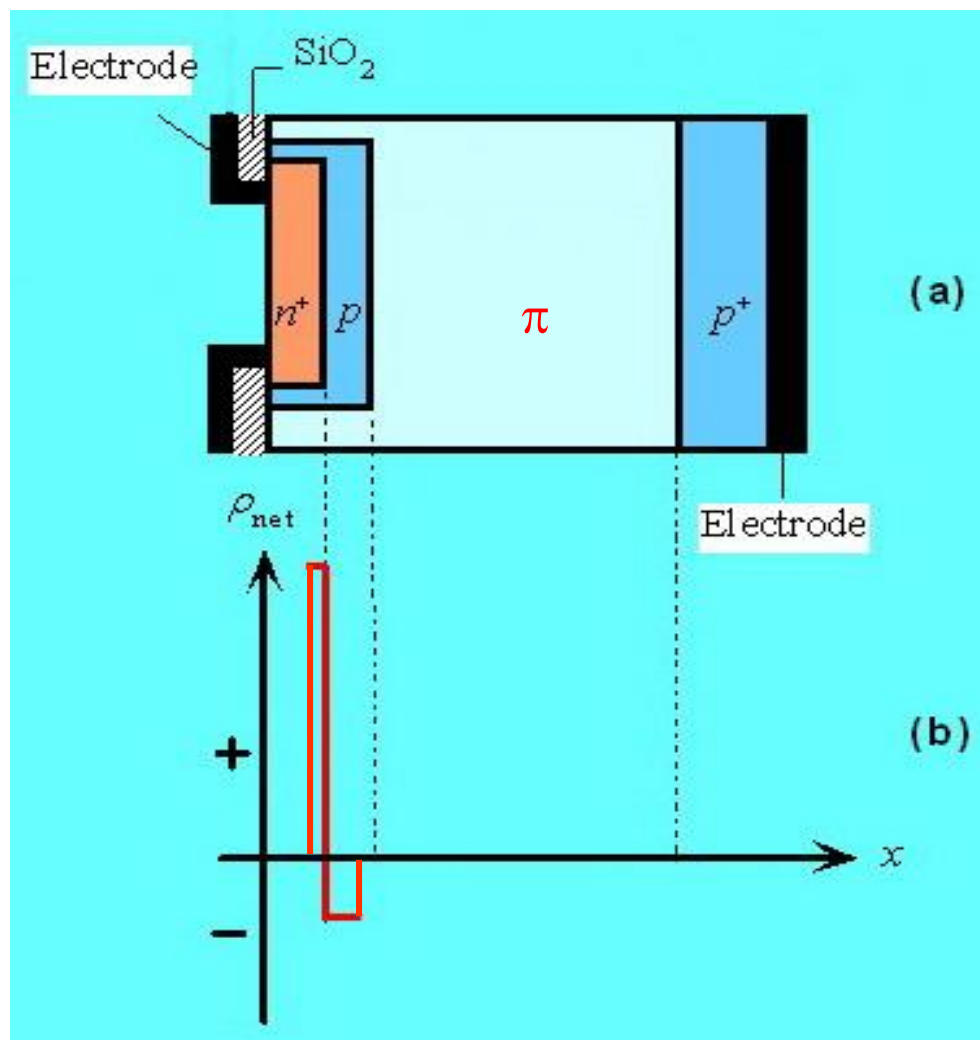
雪崩光电二极管：基于载流子雪崩效应，从而提供电流内增益的光电二极管称为雪崩光电二极管(APD: Avalanche photodiode)。

对材料的要求：由于雪崩效应的要求，必须选用高纯度，高电阻率，而且均匀性非常好的硅或锗单晶材料制备。

反向偏压：几百伏量级。

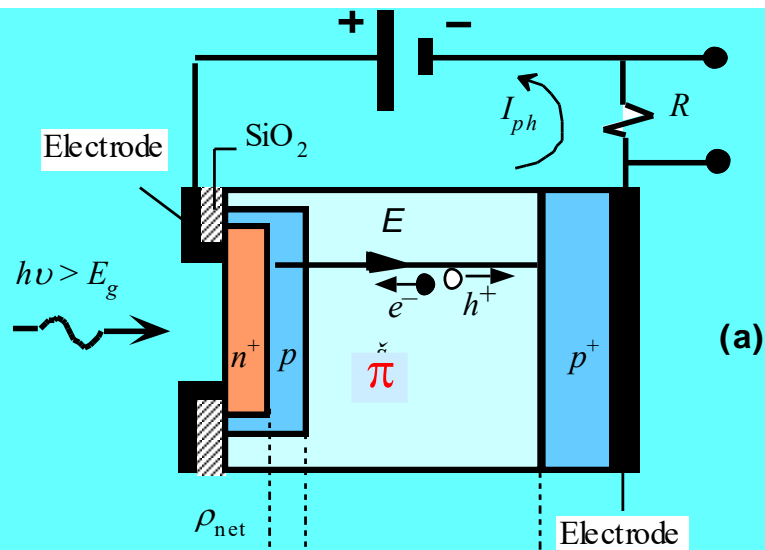
应用：由于具有高速度和内部增益，雪崩光电二极管被广泛应用于光通信领域。

Si reach-through APD 结构



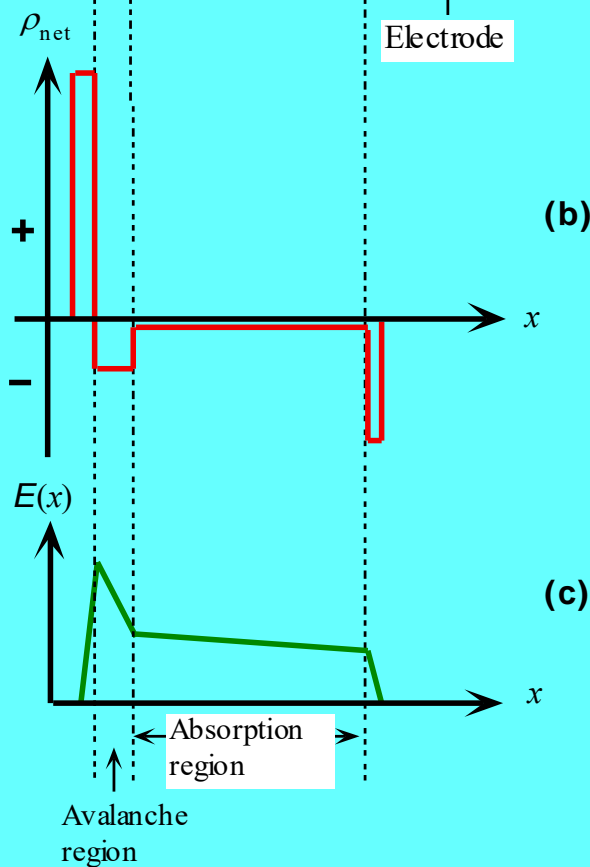
未加电压时

反向偏压增加耗尽区电场



(a)

(a) 雪崩二极管的结构和回路

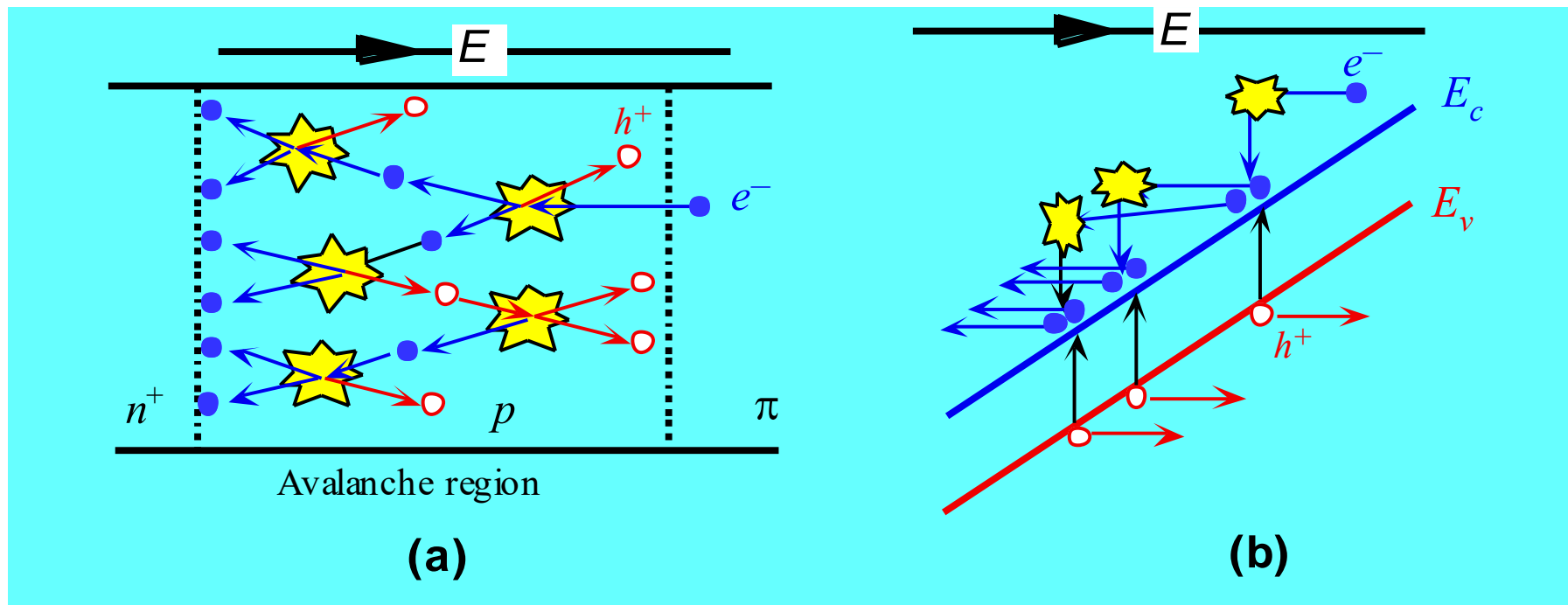


(b)

(b) 净空间电荷密度

(c)

(c) 内建电场及吸收区和放大区示意图



(a)雪崩放大图示，(b)导带中的电子与晶格碰撞将价电子激发至导带

响应时间：

1. 光电子穿过吸收区(π 层)到达p层时间；
2. 雪崩过程产生电子—空穴对时间；
3. 雪崩过程产生的最后一个空穴穿过 π 区时间。

雪崩光电二极管

优点：高量子效率、快响应、高灵敏度

缺点：价高、易损坏。

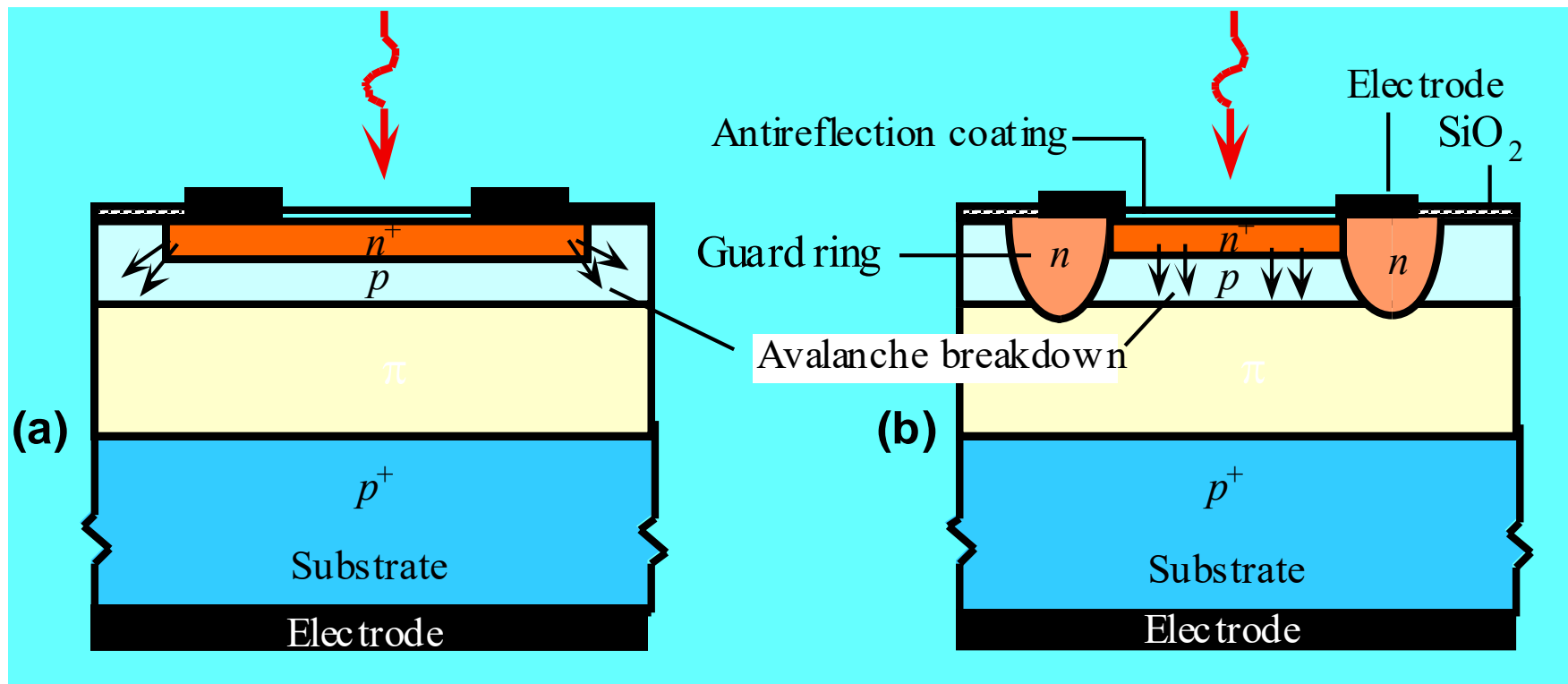
雪崩放大系数: $M = \frac{\text{被放大的光电流}}{\text{最初的光电流}} = \frac{I_{ph}}{I_{ph0}}$

I_{ph0} : 可以用一个很小的偏压来测量

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}} \right)^n}$$

V_r : 反向偏压; V_{br} : 雪崩击穿电压; n : 拟合参数。 V_{br} 和 n 强烈依赖于温度

Si: $M \sim 100$; Ge: $M \sim 10$



(a)没有保护环的硅雪崩光电二极管

(b)更实际的硅雪崩光电二极管

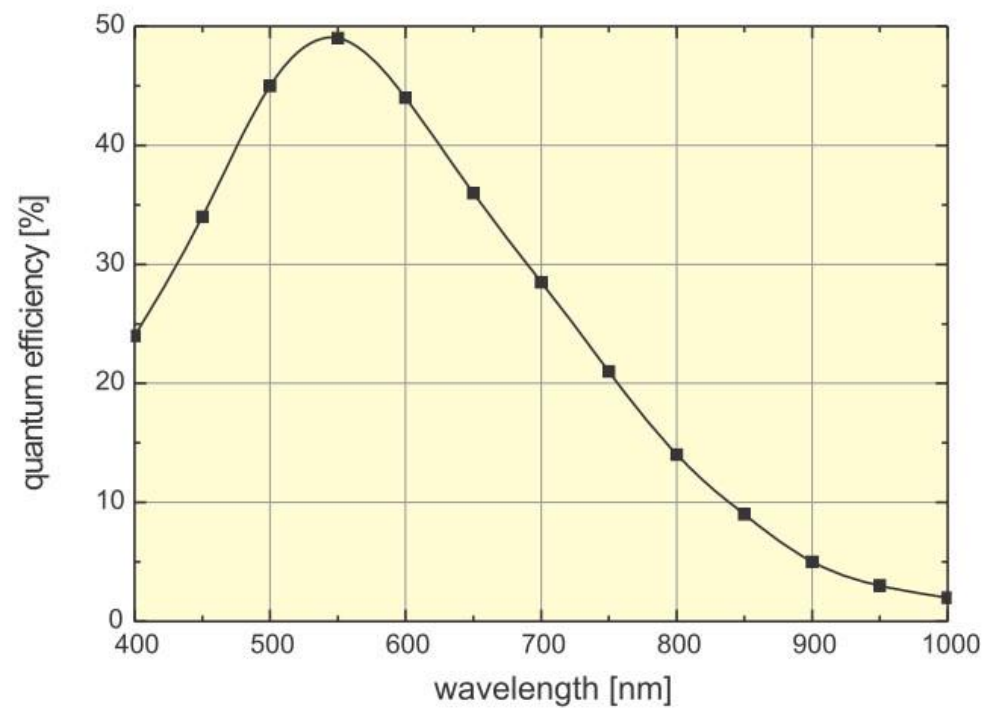


Silicon Avalanche Photodiodes



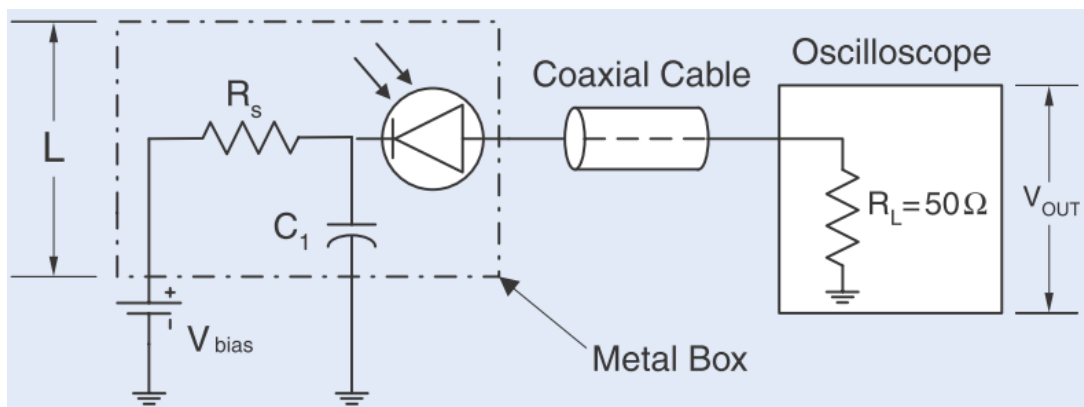
Silicon Avalanche Photodiodes

单光子雪崩光电二极管



几种光电二极管性能比较

Photodiode	λ_{range} (nm)	λ_{peak} (nm)	Gain	t_r (ns)	I_{dark}
Si pn junction	200-1100	600-900	<1	0.5	0.01-0.1 nA
Si pin	300-1100	800-900	<1	0.03-0.05	0.01-0.1 nA
Si APD	400-1100	830-900	10-100	0.1	1-10 nA
Ge pn junction	700-1800	1500-1600	<1	0.05	0.1-1 μ A
Ge APD	700-1700	1500-1600	10-20	0.1	1-10 μ A
InGaAs-InP pin	800-1700	1500-1600	<1	0.03-0.1	0.1-10 nA
InGaAs-InP APD	800-1700	1500-1600	10-20	0.07-0.1	10-100nA



无放大电路的高速光电二极管接线图

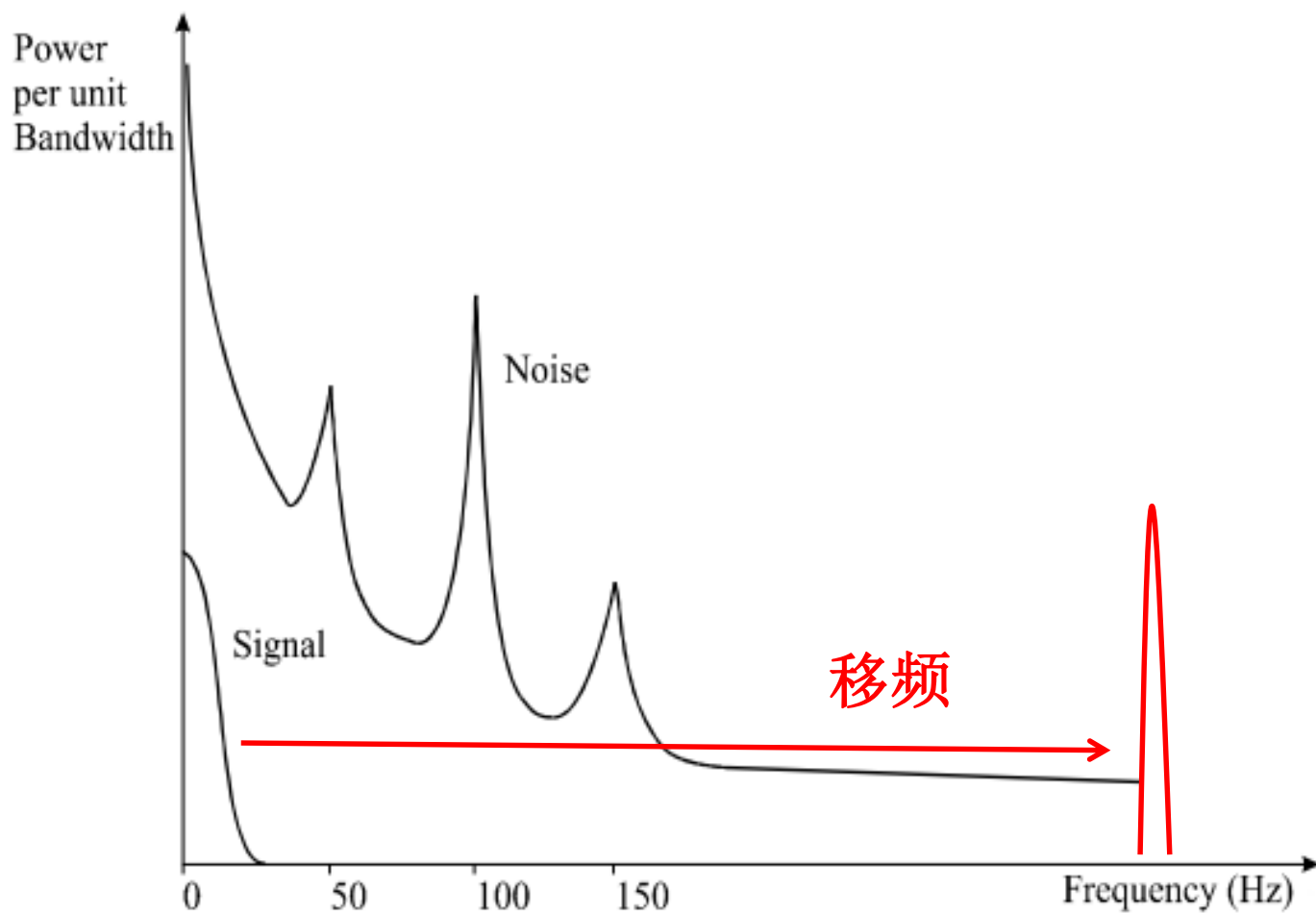
7.3 光电弱信号探测

7.3.1 锁相放大器

7.3.2 取样平均器

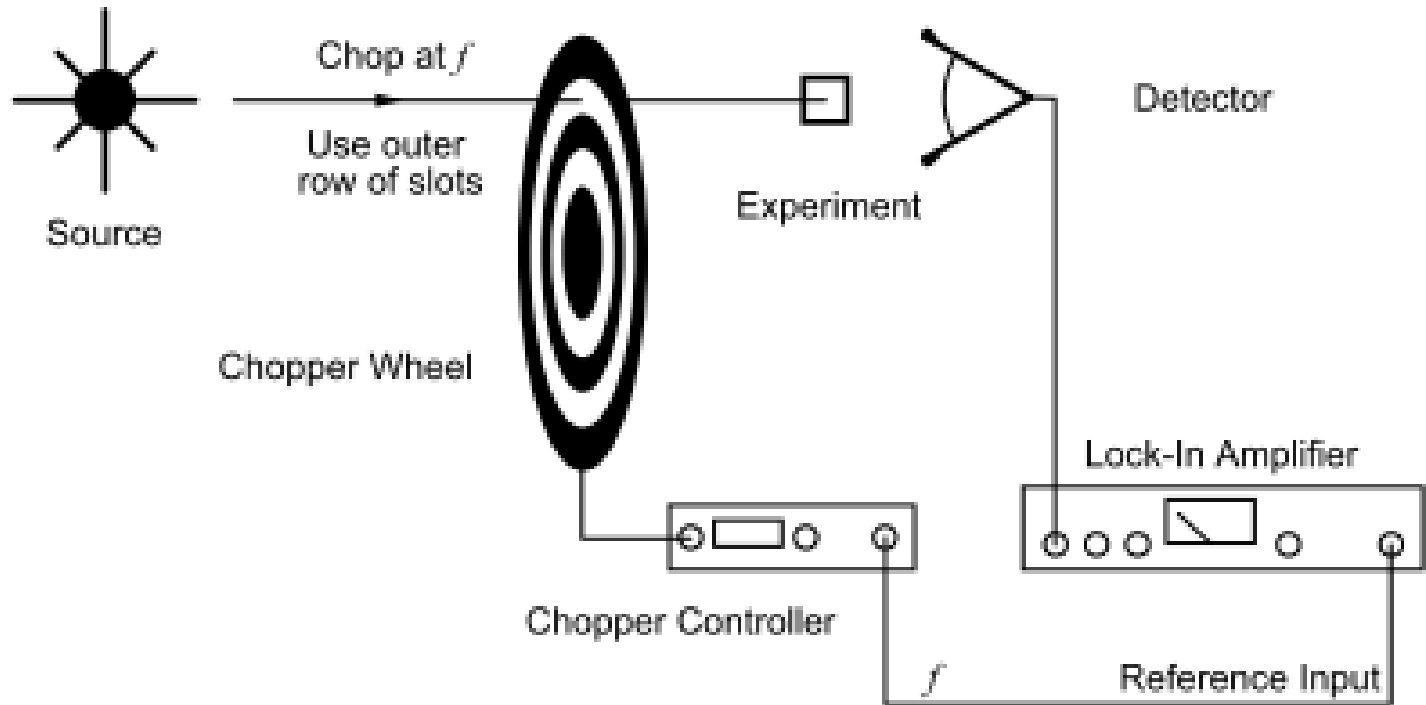
7.3.3 单光子计数器

7.3.1 锁相放大器

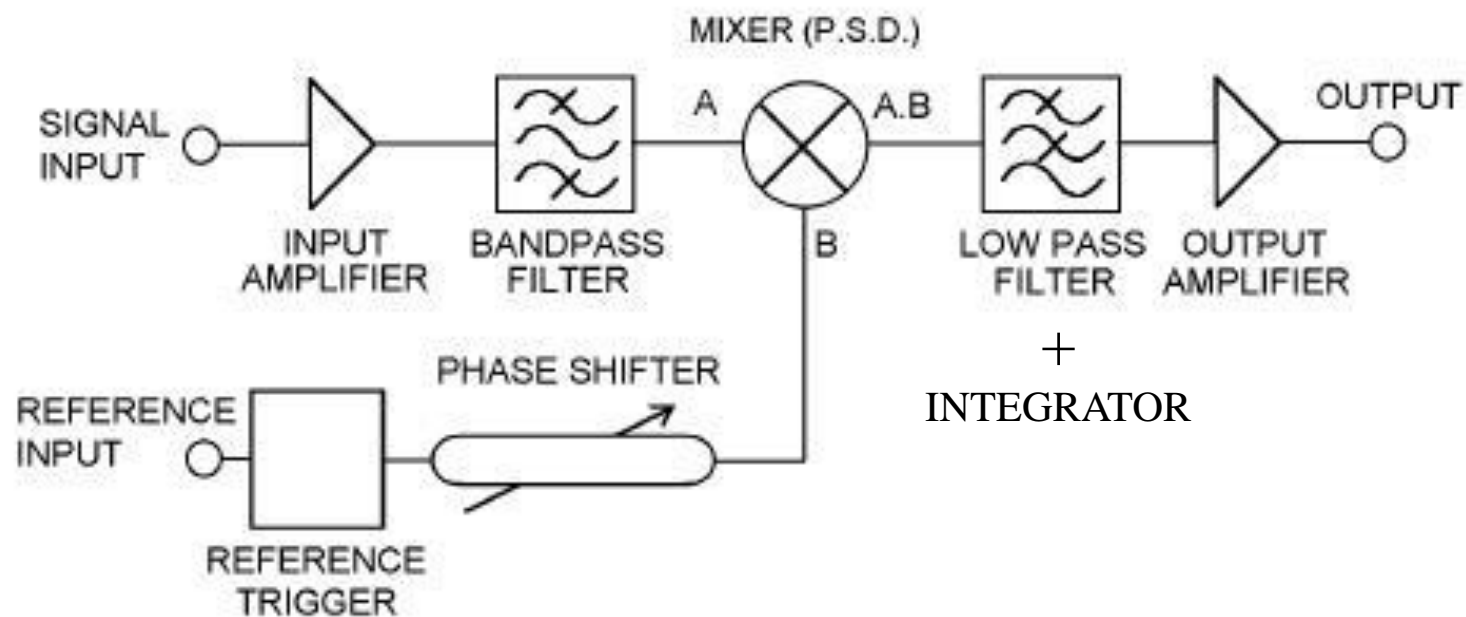


信号和噪声频谱

利用斩波器将低频信号移频到高频:



单路斩波实验



锁相放大器（LIA）原理图

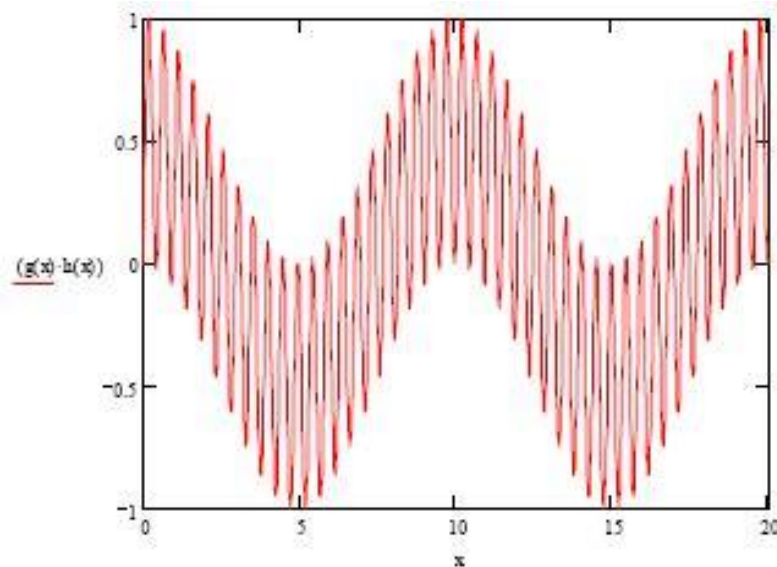
设输入信号为: $S_i(t) = A_i \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi]$

参考信号: $S_r(t) = A_r \cos \omega_0 t$

经过相乘器: $S_0(t) = S_i(t)S_r(t)$

$$= \frac{1}{2} A_i A_r \{ \cos(\Delta\omega t + \varphi) + \cos[(2\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi] \}$$

1Hz和1.1Hz信号的乘积:



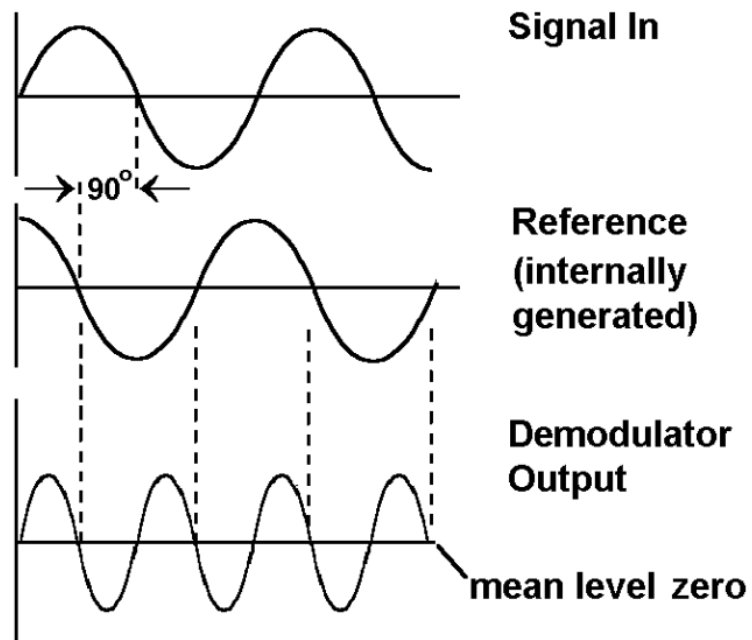
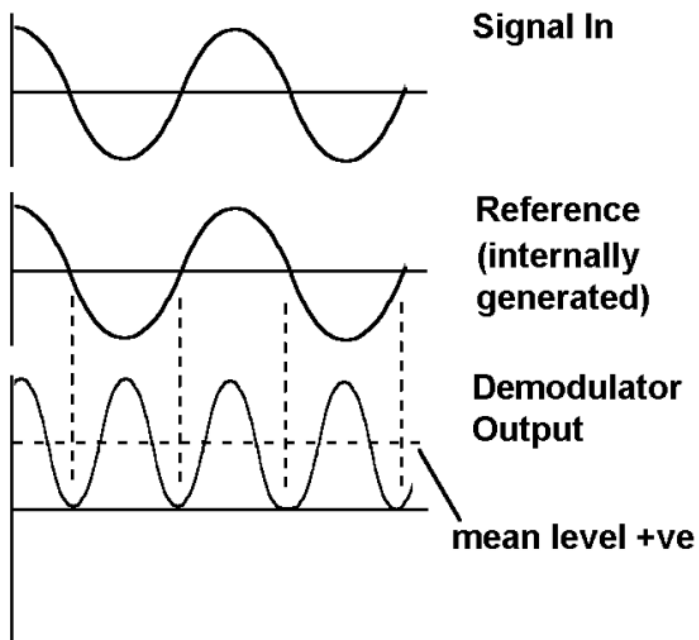
经过低通滤波器: $S'_0 = \frac{1}{2} A_i A_r \cos(\Delta\omega t + \varphi)$

经过低通滤波器信号： $S'_0 = \frac{1}{2} A_i A_r \cos(\Delta\omega t + \varphi)$

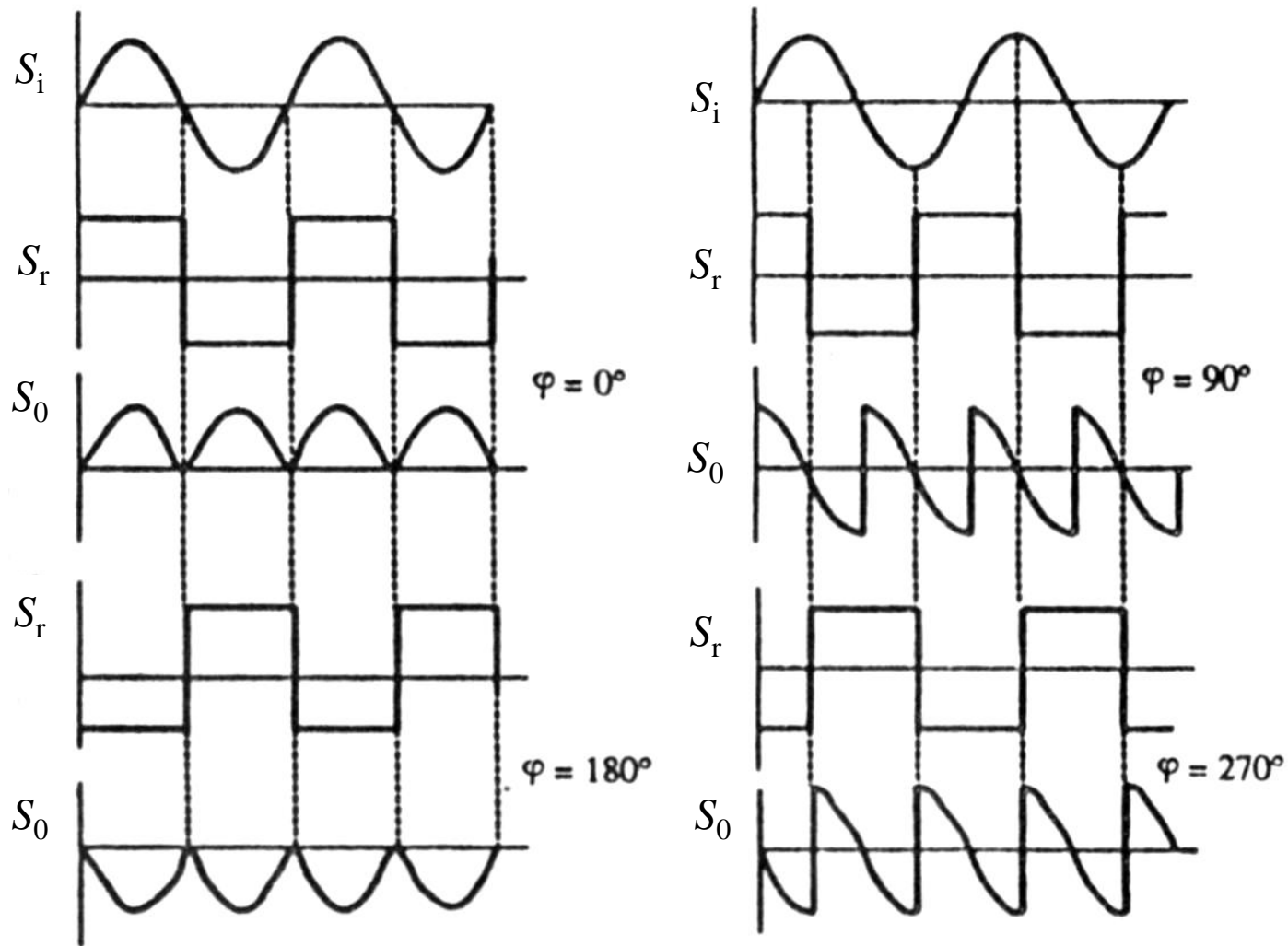
噪声：
$$S_n = \frac{1}{2} A_n A_r \cos[(\omega_n - \omega_0)t + \varphi_n] \\ + \frac{1}{2} A_n A_r \cos[(\omega_n + \omega_0)t + \varphi_n]$$

去噪声：

1. $\Delta\omega \neq 0$ 的噪声成分，被低通滤波器去除；
2. $\Delta\omega = 0$ 但相位随机的噪声成分，被相敏检波截止。



乘法器的输出信号波形



乘法器的输出信号波形

测量 φ : 设输入信号为: $S_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi)$

参考信号: $S_r(t) = A_r \cos \omega_0 t$

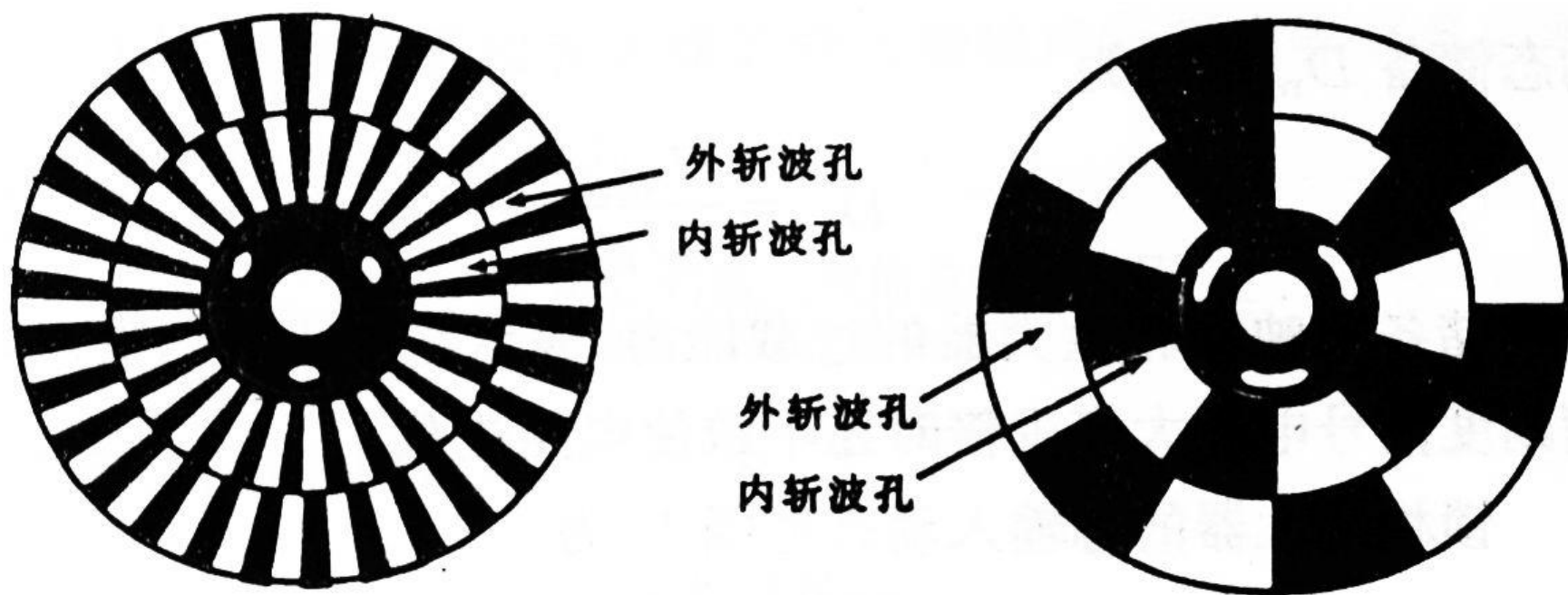
$$S'_r(t) = A_r \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

$$S_0(t) = \frac{1}{2} A_i A_r \cos \varphi$$

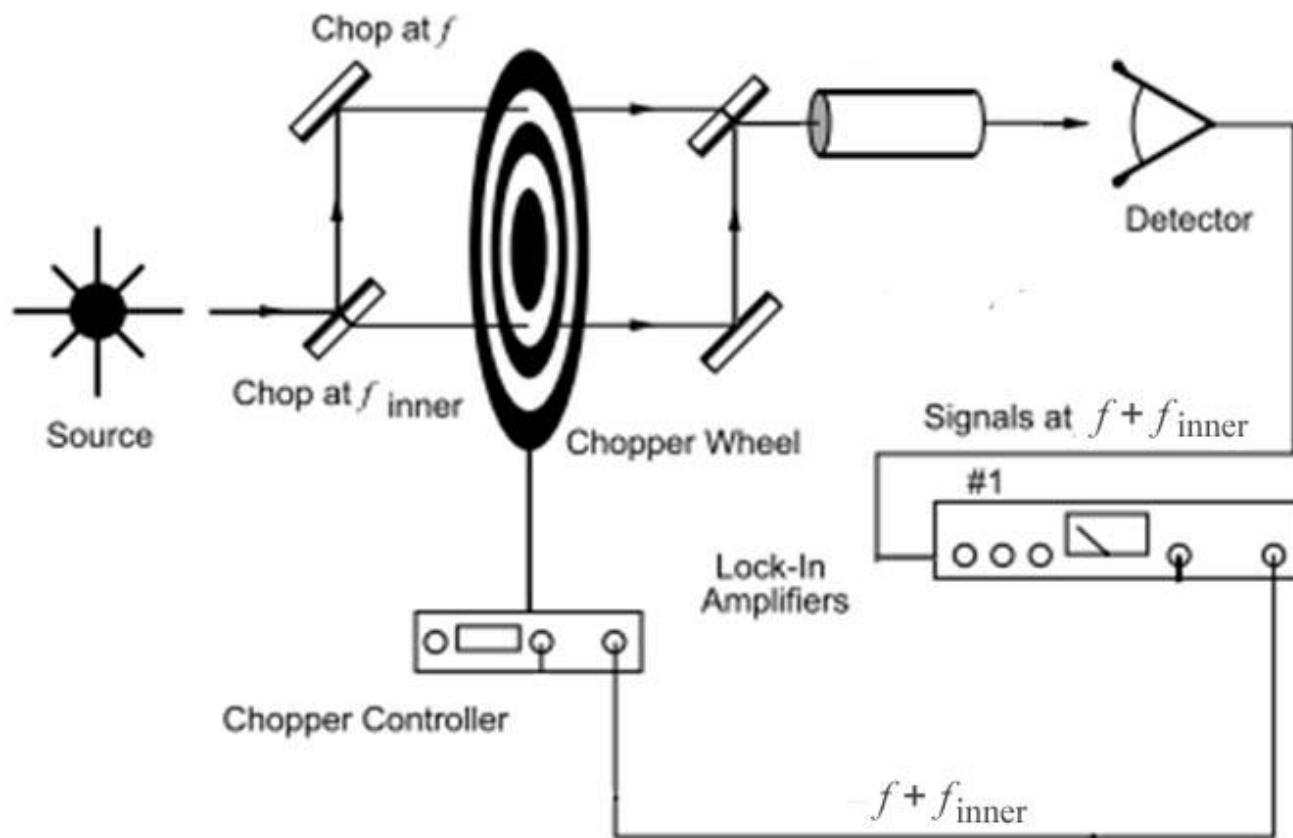
$$S'_0(t) = \frac{1}{2} A_i A_r \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} A_i A_r \sin \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{S'_0}{S_0}$$

$$S = \left[S_0^2(t) + S'_0{}^2(t) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} A_i A_r$$



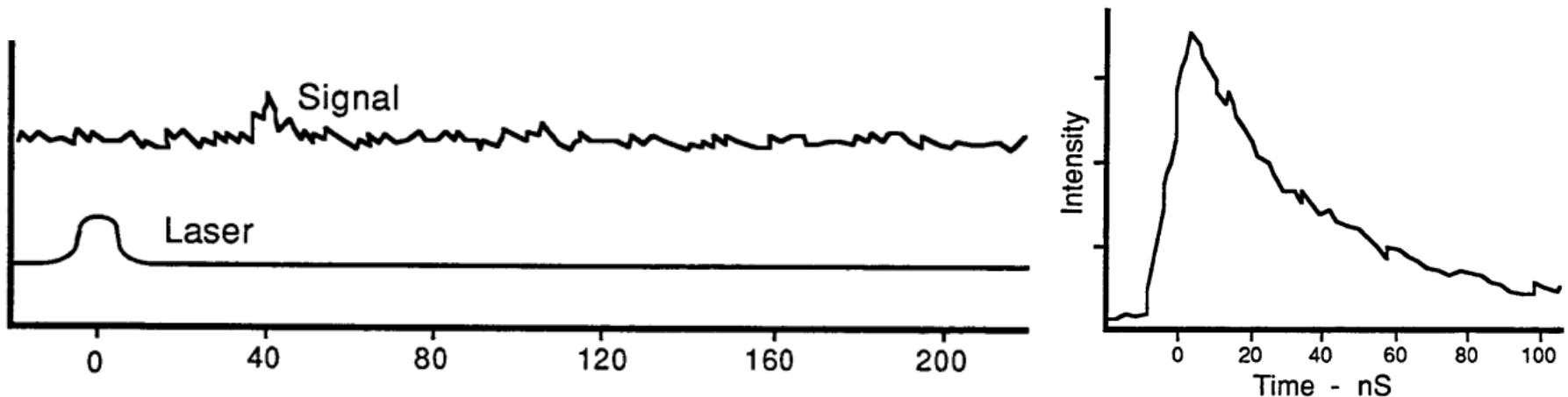
斩波器所使用的调制盘

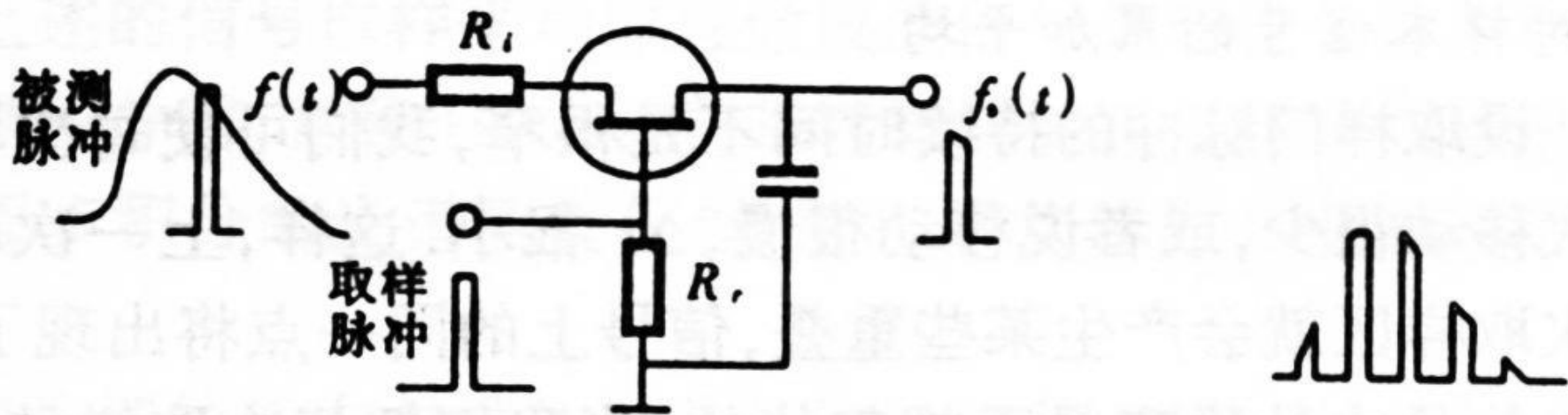


双路斩波实验

7.3.2 取样平均器

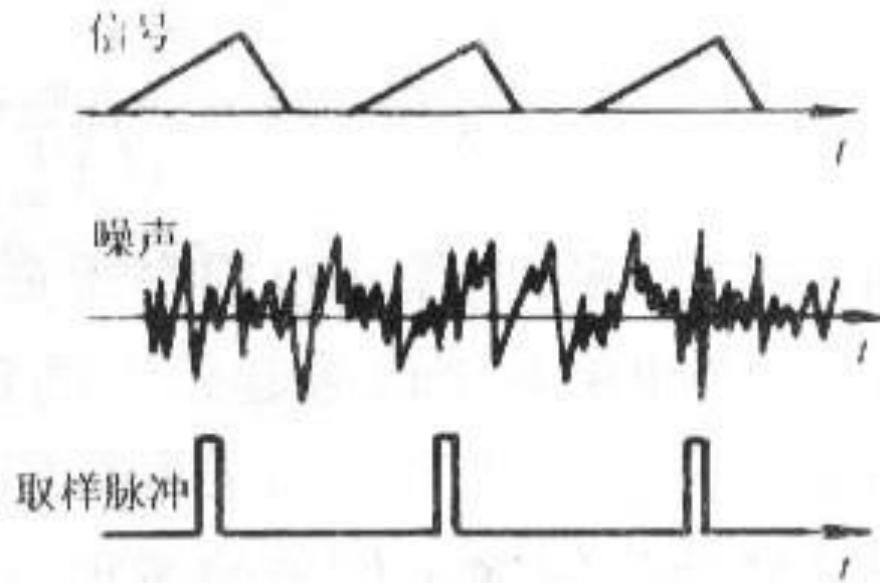
取样平均器（**Boxcar**平均器）：利用取样和平均化技术测定深埋在噪声中的周期性信号的测量装置。





(a)取样门电路

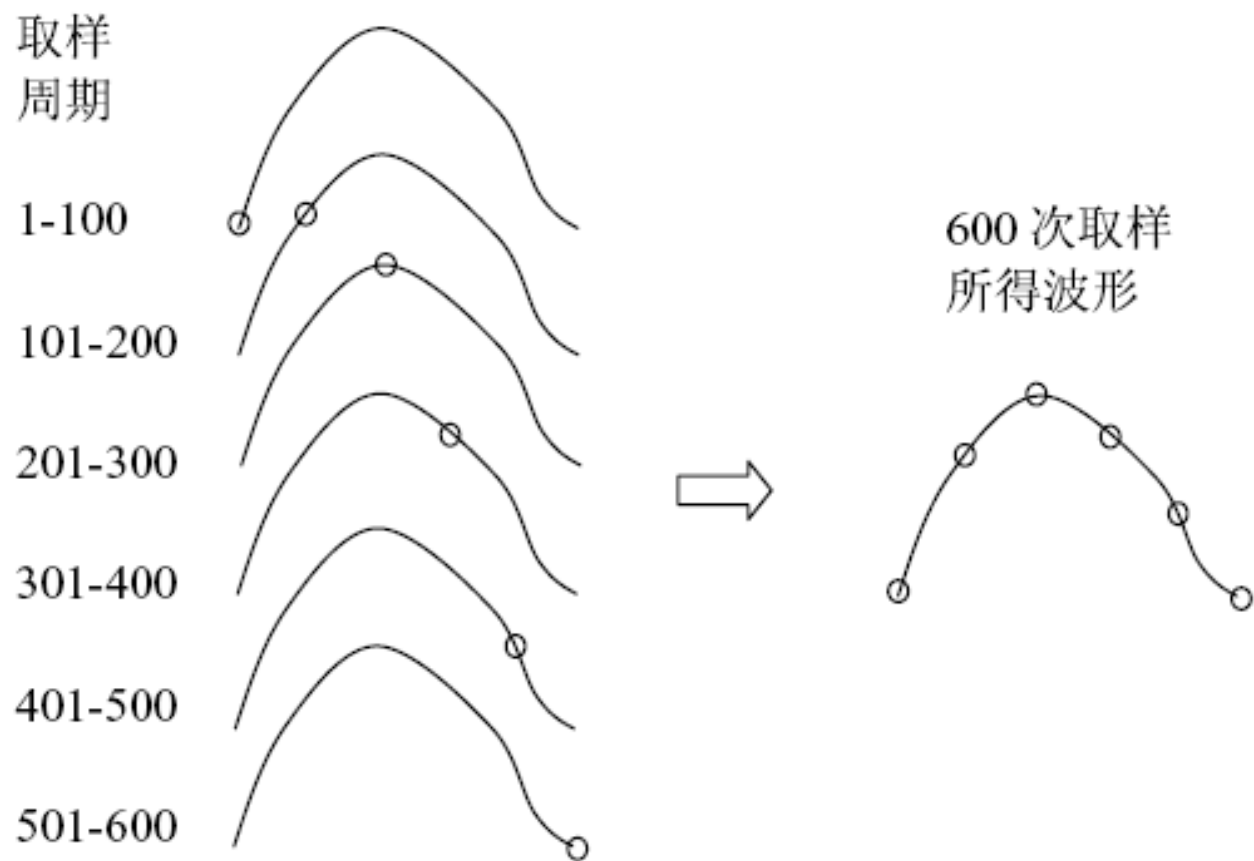
(b)取样后波形



若信号为 S_i ，进行 N_s 次取样，并加以累计（假设是线性的），则信号值将增加到： $S_0 = N_s S_i$

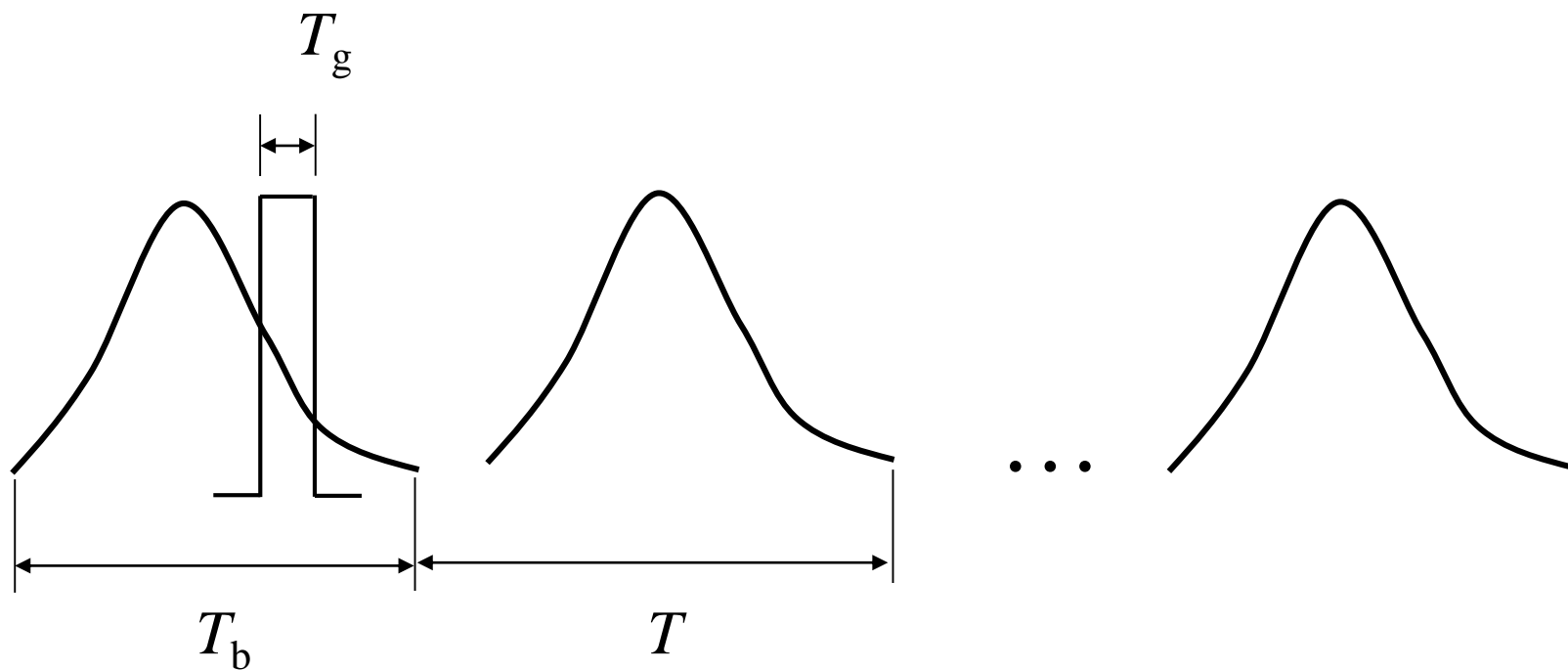
噪声值为 n_i ，累计结果为： $n_0 = \sqrt{N_s} n_i$

输出信噪比： $SNR_0 = \frac{S_0}{n_0} = \sqrt{N_s} \frac{S_i}{n_i} = \sqrt{N_s} SNR_i$



取样平均原理示意图

几个时间参数



T_g —门宽, T_b —时基宽度, T —信号周期

T_c —积分时间, T_s —慢扫描时间

7.3.3 单光子计数器

光子计数器（Photon counter）：利用光子的粒子性，通过对单光子产生的电脉冲计数的方法测量极微弱光信号的技术。

探测器：光电倍增管、雪崩光电二极管

当可见光的功率低于 10^{-10}W ，即光子的流量在 $10^9/\text{s}$ 以下时，光探测器（通常是光电倍增管或雪崩光电二极管）所产生的光电流不再是连续的，输出为离散的电脉冲信号。

设光电倍增管的量子效率为1，增益为 10^6 ，渡越时间为 $t_0 = 10\text{ns}$ ，阳极脉冲为矩形，单光子电流：

$$I_p = \frac{q}{t_0} = \frac{10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{10 \times 10^{-9}} = 16(\mu\text{A})$$

$R_L = 50\Omega$ ， $C = 20\text{pF}$ ，时间常数 $\tau = 1\text{ns} \ll t_0$ ，

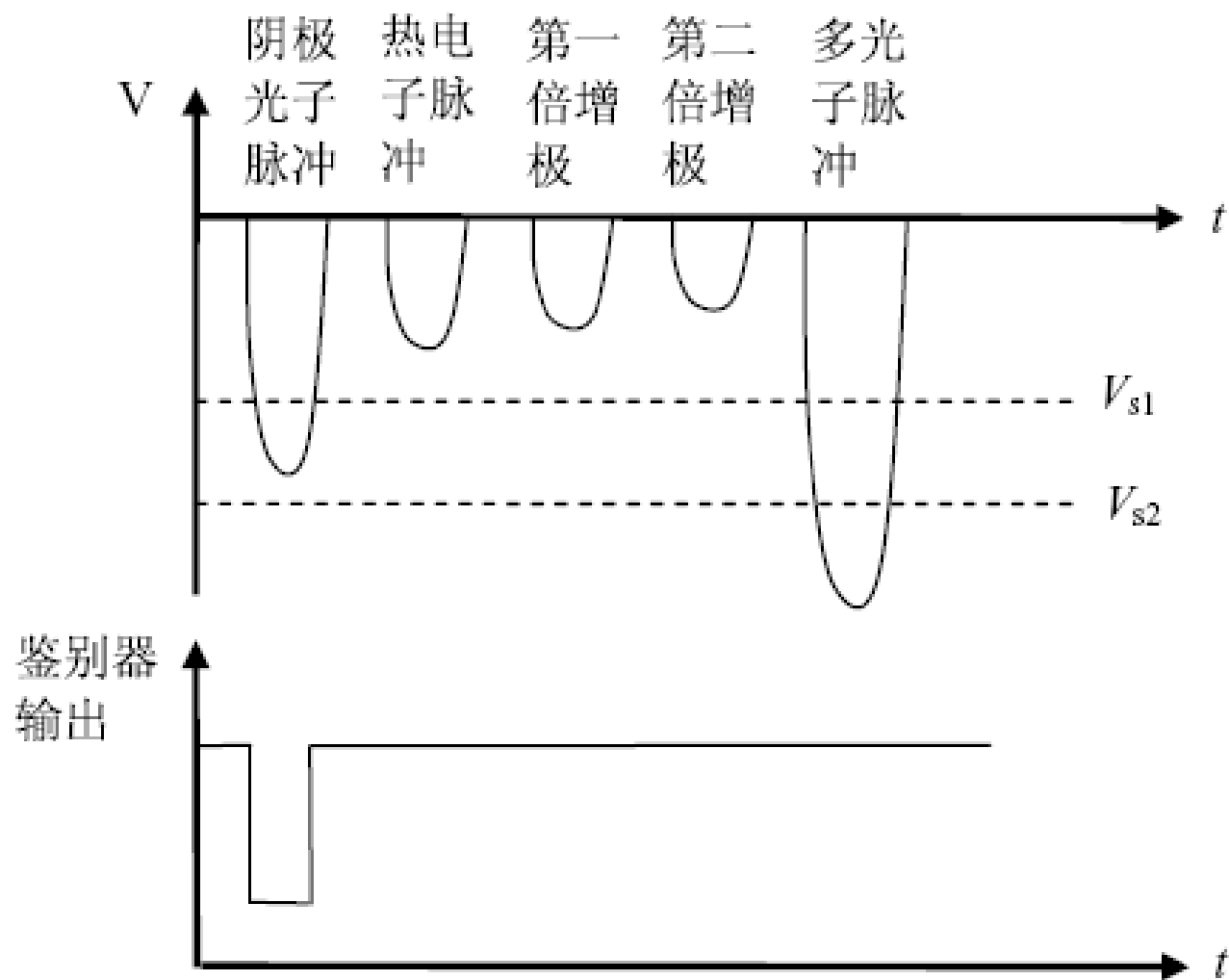
$$U_p = I_p \cdot R_L = 16 \times 10^{-6} \times 50 = 0.8\text{mV}$$

光电倍增管输出成分：

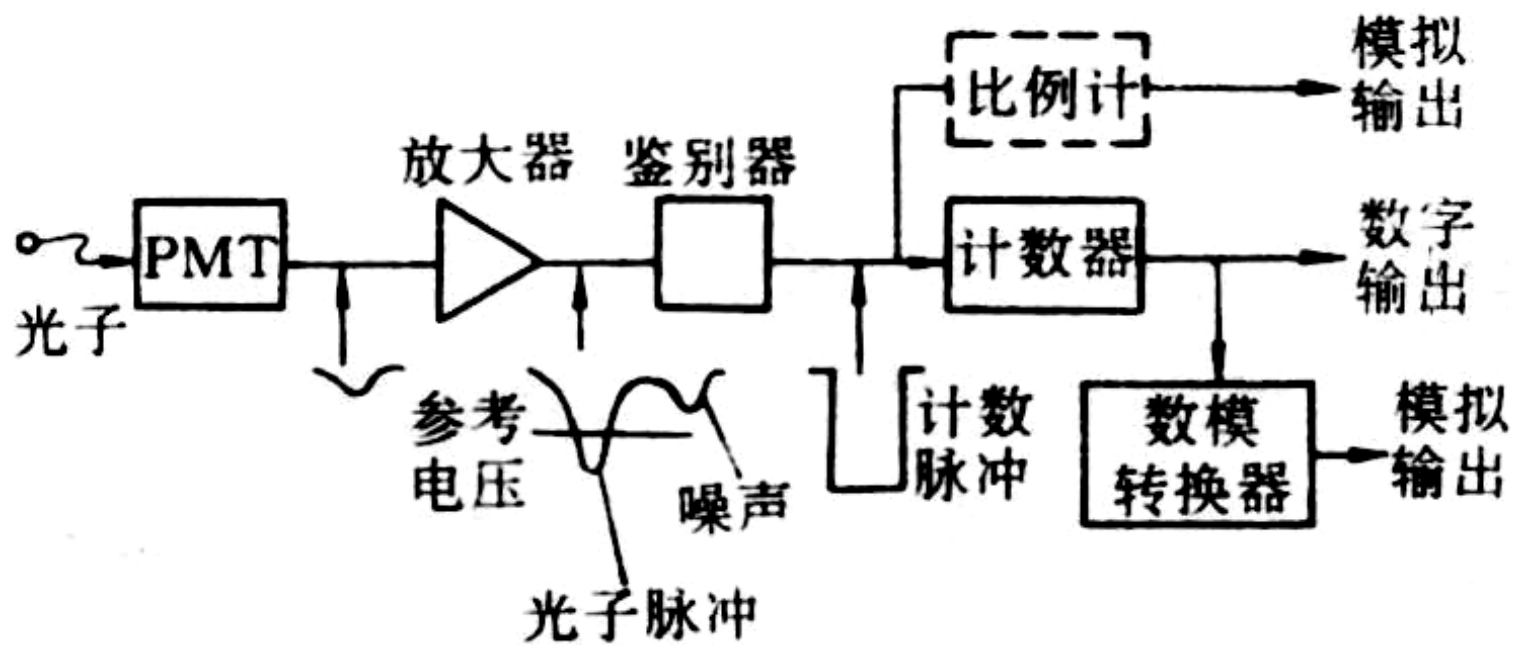
- 阴极光子脉冲
- 热电子脉冲
- 第一倍增极热电子脉冲
- 第二倍增极热电子脉冲
- 多光子脉冲

光电子的最大动能： $E_{\max} = h\nu - \Phi$ Φ 是功函数

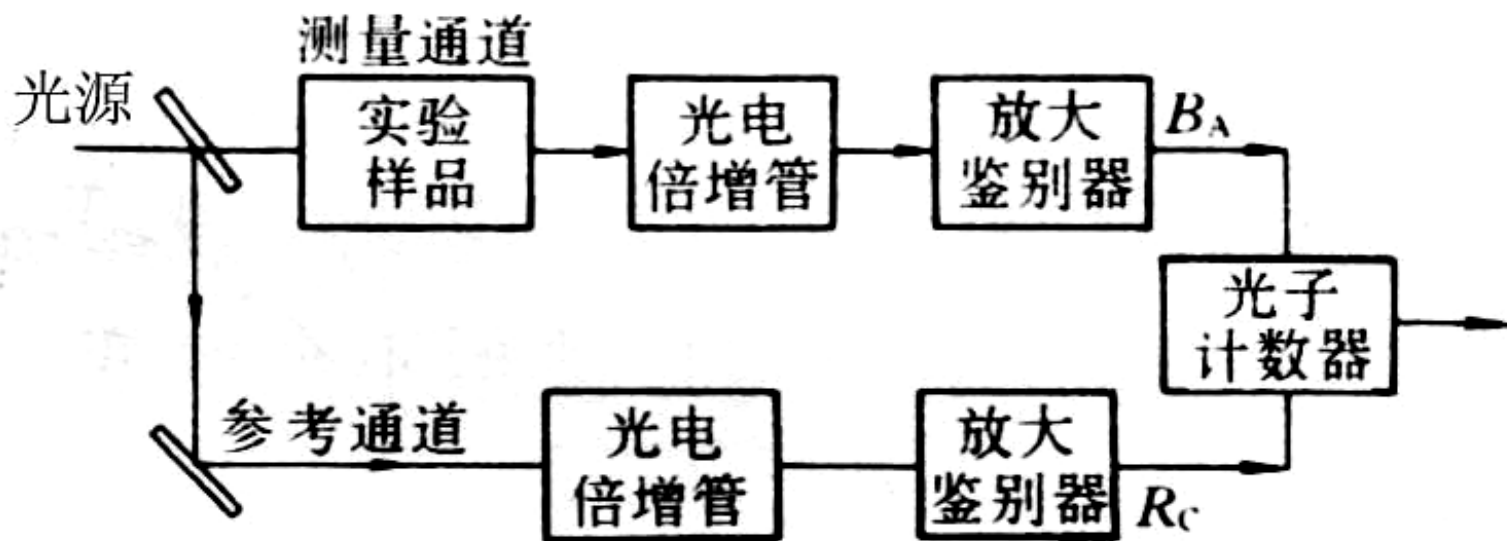
室温热能： $\sim 25 \text{ meV}$



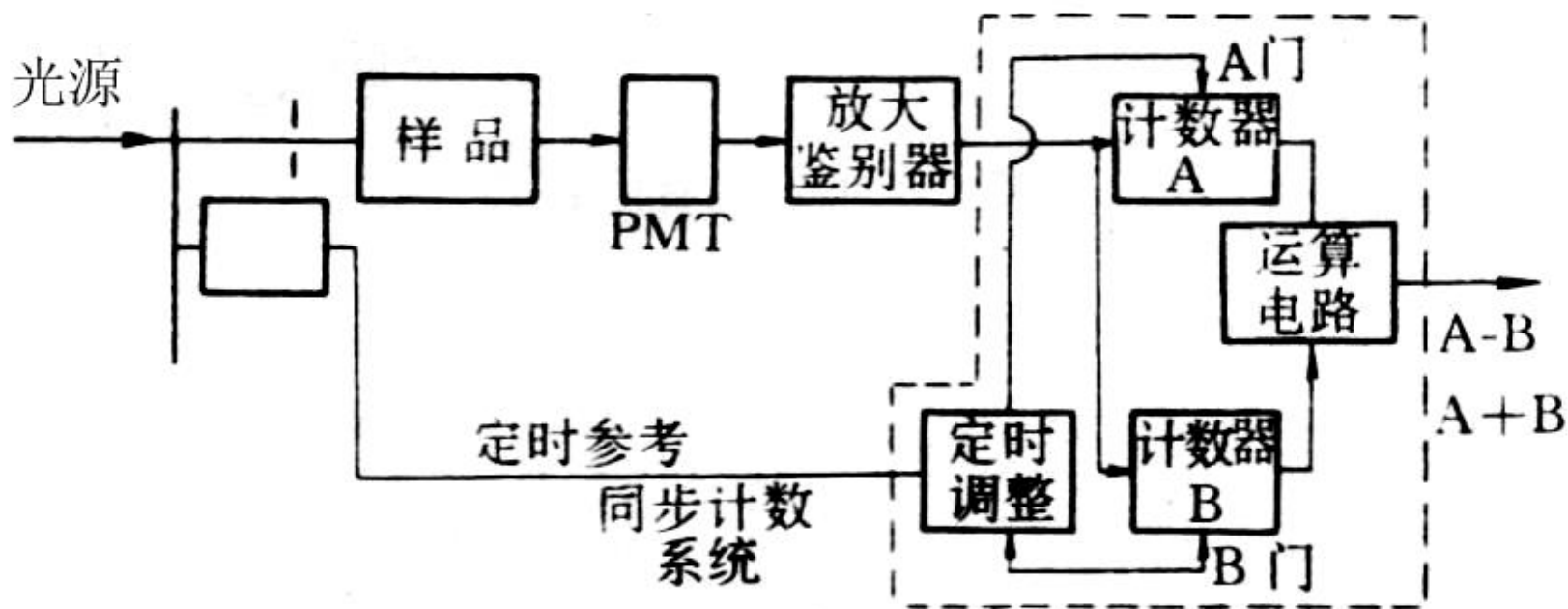
光电倍增管的输出脉冲和鉴别器工作波形



基本的光子计数系统

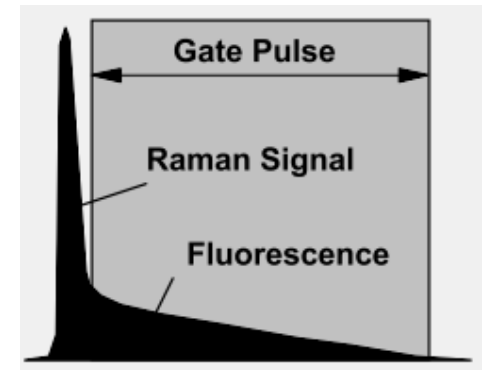
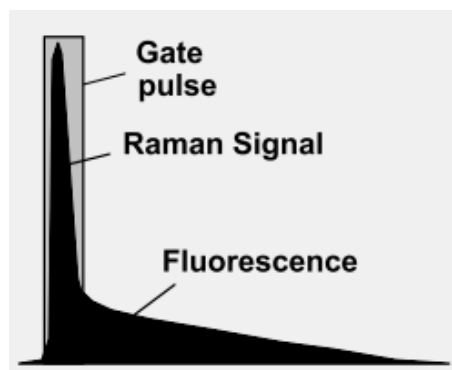
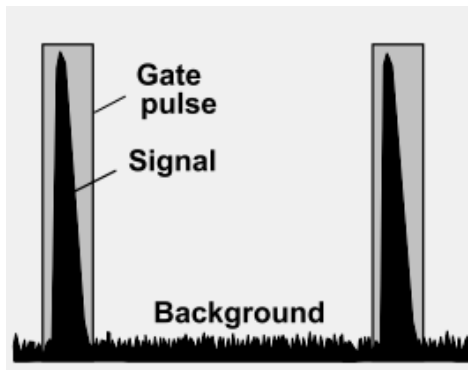
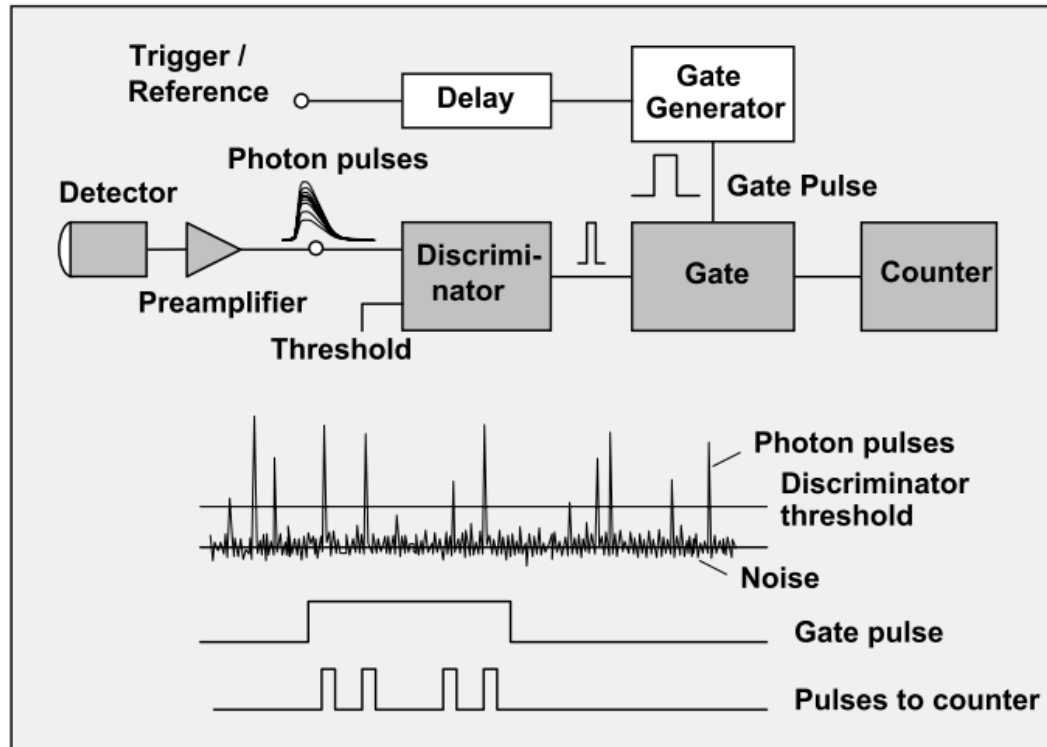


光源补偿的光子计数系统



有背景补偿能力的光子计数系统

门控光子计数器

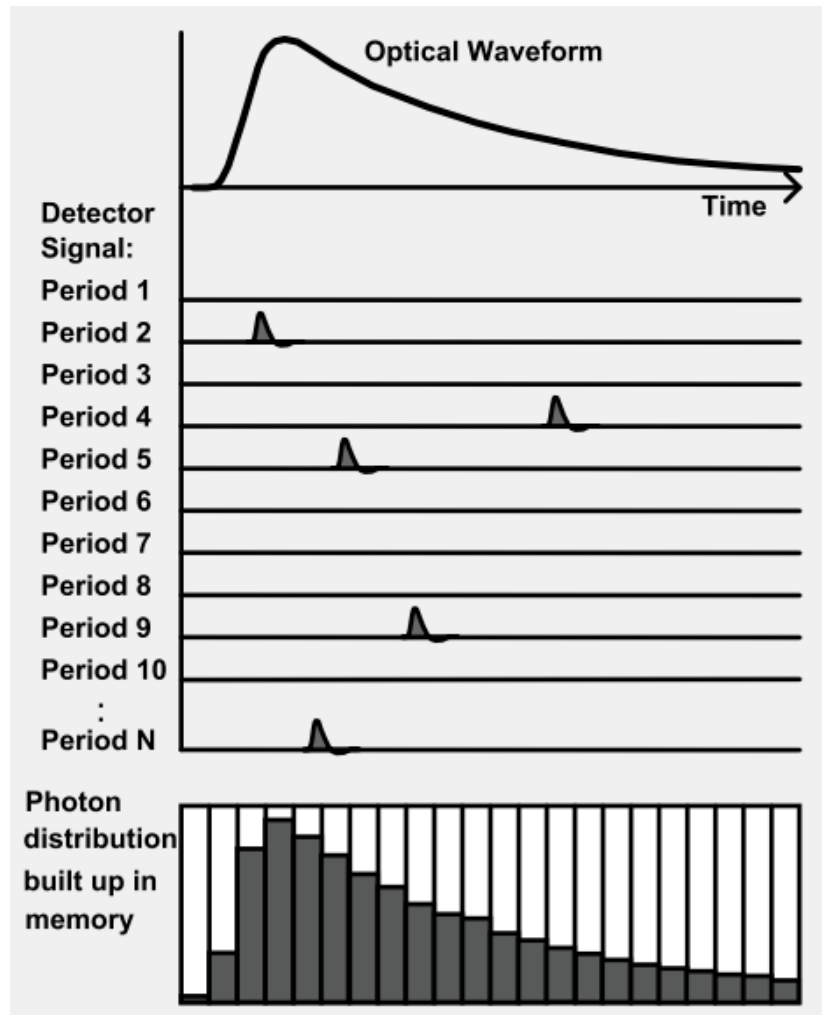


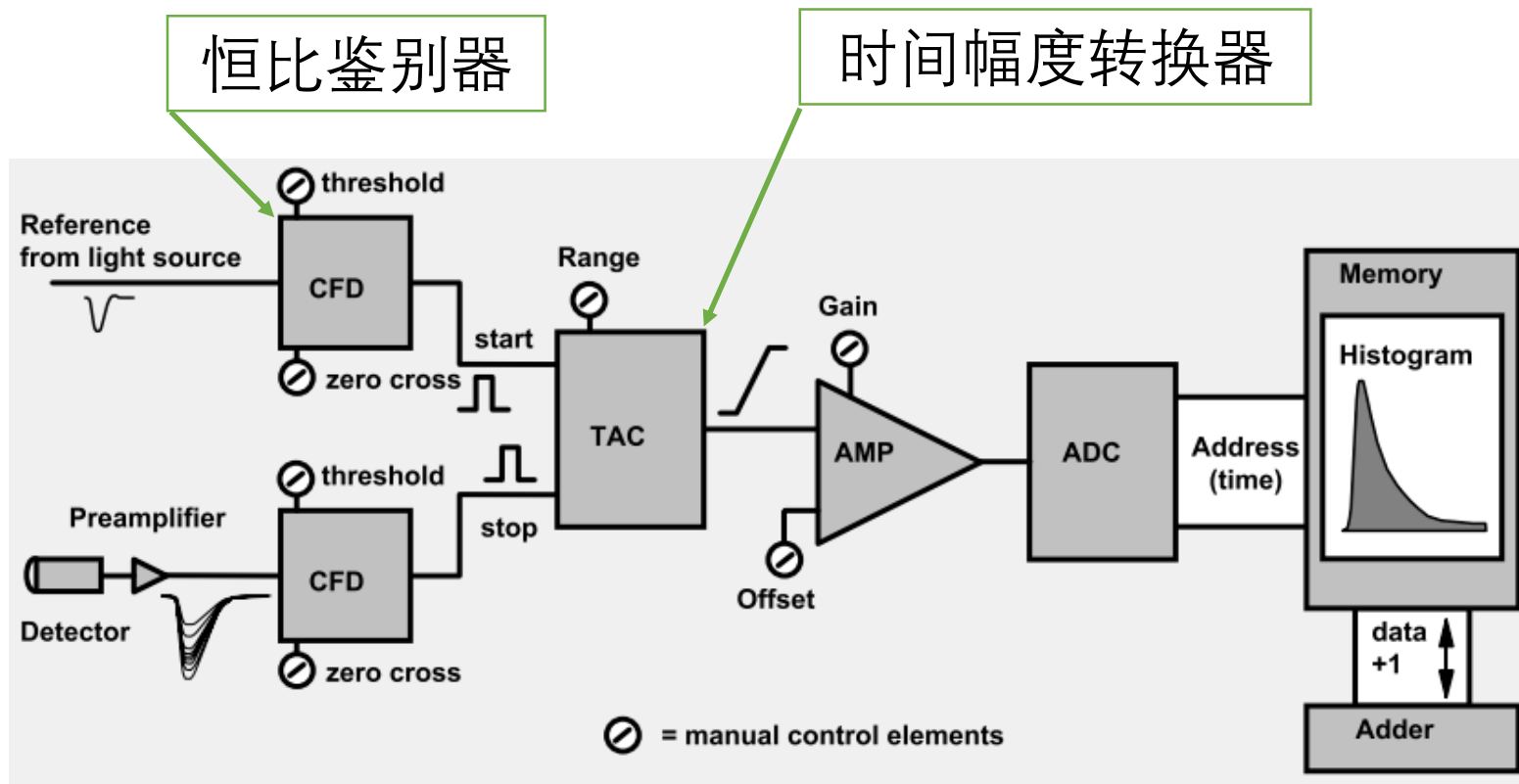
时间相关单光子计数技术

前提条件：

低强度、高重复频率
的脉冲信号；一个信号周
期内探测到一个光子的概
率远小于一。

时间响应受探测器输出脉冲
的渡越时间涨落的限制，而
不受单电子脉冲宽度的限制。





- ✓ 使用微通道板光电倍增管或APD时，仪器响应函数的半高全宽为25~60ps。
- ✓ 平均每个信号周期探测到的光子数为0.1~0.01个之间。