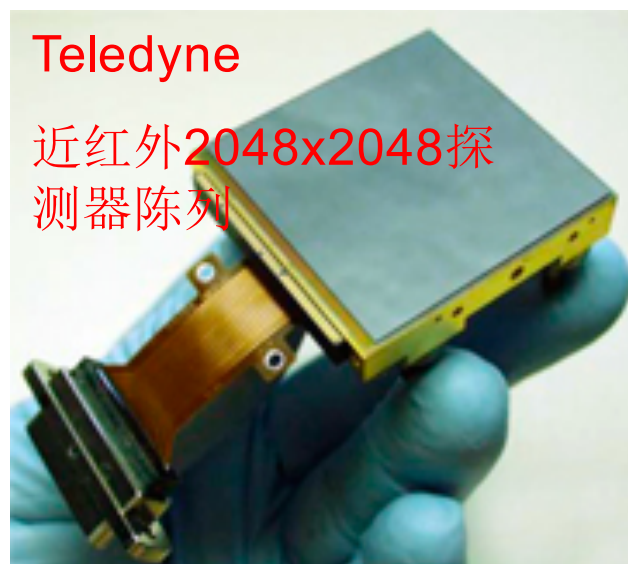


第三章 辐射探测器



章节

- 1. 探测器的基本性质
- 2. 紫外-红外波段的光子探测器
- 3. 探测器的性能
- 4 探测器的噪声
- 5. 红外探测器
- 6. 红外探测器陈列
- 7. 电荷耦合元件CCD (Charge Coupled Device)

1. 探测器的基本原理

➤ 辐射探测器

 将辐射能转换为可测信号的器件。

 原理是利用光子和探测器中的粒子相互作用将辐射的能量全部或部分地转移给粒子，在一定的外界条件下，引起宏观尺度上可测量的信号。

1. 探测器的基本原理

➤ 按照相互作用的种类，可以分为：

- **光化学反应：**辐射引起物质的化学反应，将辐射能转变为化学能，如照相底片。
- **光热效应：**在辐射作用下，物质变热，温度升高，辐射能转变为热能。这一类器件称为热探测器，如热电偶、测辐射热计等。
- **光电效应：**辐射使电子从物质中释放出来，产生电流或电压，使辐射能转变为电能。这一类器件统称为光电器件，如光电倍增管、像管等。
- **波长变化：**一种波长的辐射转变为另一种波长的辐射，如闪烁体等。

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ 照相底片：为天文学的进步服务了近100年。
其有三个致命的缺陷：

 非常差的可测量子效率 (DQE)。

 响应曲线很复杂，是非线性的。

 不可能用同样的底片做重复曝光，即底片是一次性。而重复曝光是现代天文观测中定量理解各种信号细节的关键。

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ 现代光子探测器：

 基本原理是对半导体材料施加一电势差，当光照射此半导体材料时，测量产生的电子流。

 制造的关键是把光子吸收的区域与提供高电阻区域分离开来，前者要求低电阻来最大化光子的吸收概率，后者的高电阻用来降低噪声。

2. 紫外-红外波段的光子探测器

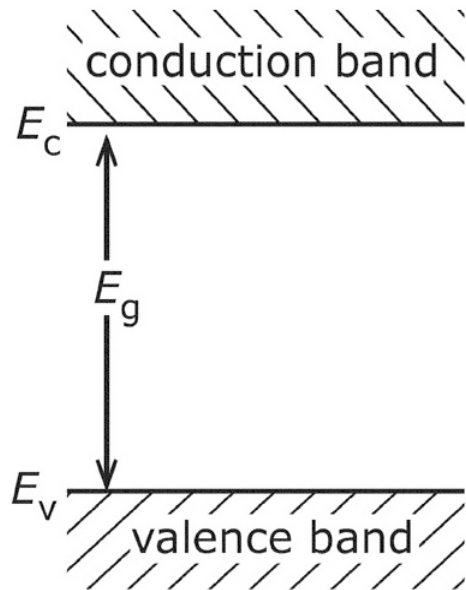
- 最简单的光子探测器：半导体吸收光子释放电子，自由电子在半导体内移动产生电流。
- 被吸收光子的能量由材料原子的能级来决定。

价电带 (Valence Band):

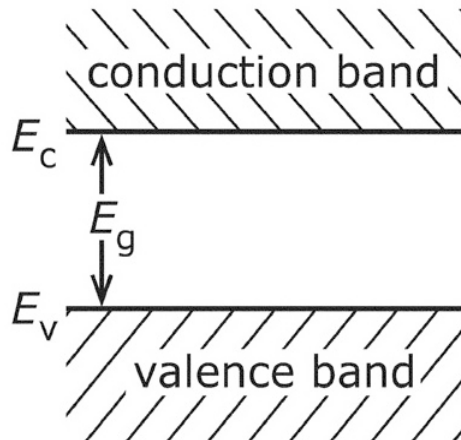
在绝对零度下能被电子占满的最高能带。全充满的能带中的电子不能在固体中自由运动。

导带 (Conduction Band):

电子受到光照，获得能量跳入导带而能自由移动。



绝缘体



半导体

➤绝缘体:

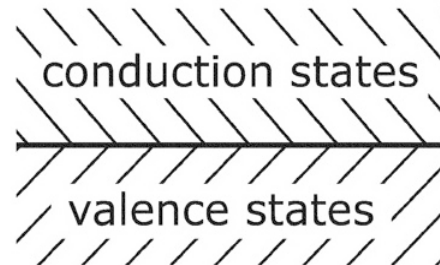
电子需要获得非常高的能量才能进入导带。

➤金属:

价电带和导带毗邻，因此存在大量自由电子。

➤半导体:

介于绝缘体和金属之间。近紫外，光学和近红外的光子有足够的能量激发电子到导带。



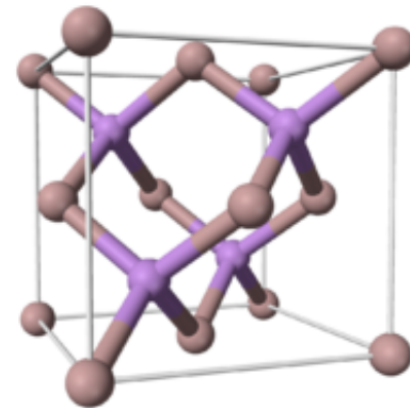
金属

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ 本征半导体:

完全不含杂质且无晶格缺陷的纯净半导体称为本征半导体。

可以是单一元素组成，例如硅。也可以是两种或多种元素的化合物。



砷化镓本征半导体

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ 杂质半导体 (doped semiconductor):

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质，可以缩小价电带和导带之间的带沟，从而可以吸收波长长于近红外的光子。

➤ 按照杂质，一般可分为N型半导体和P型半导体。

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ N型半导体:

 在本征半导体硅（或锗）中掺入微量的5价元素。例如磷，则磷原子就取代了硅晶体中少量的硅原子，占据晶格上的某些位置。

 磷原子最外层有5个价电子，其中4个价电子分别与邻近4个硅原子形成共价键结构，多余的1个价电子在共价键之外，只受到磷原子对它微弱的束缚，

 因此在室温下，即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子，游离于晶格之间。

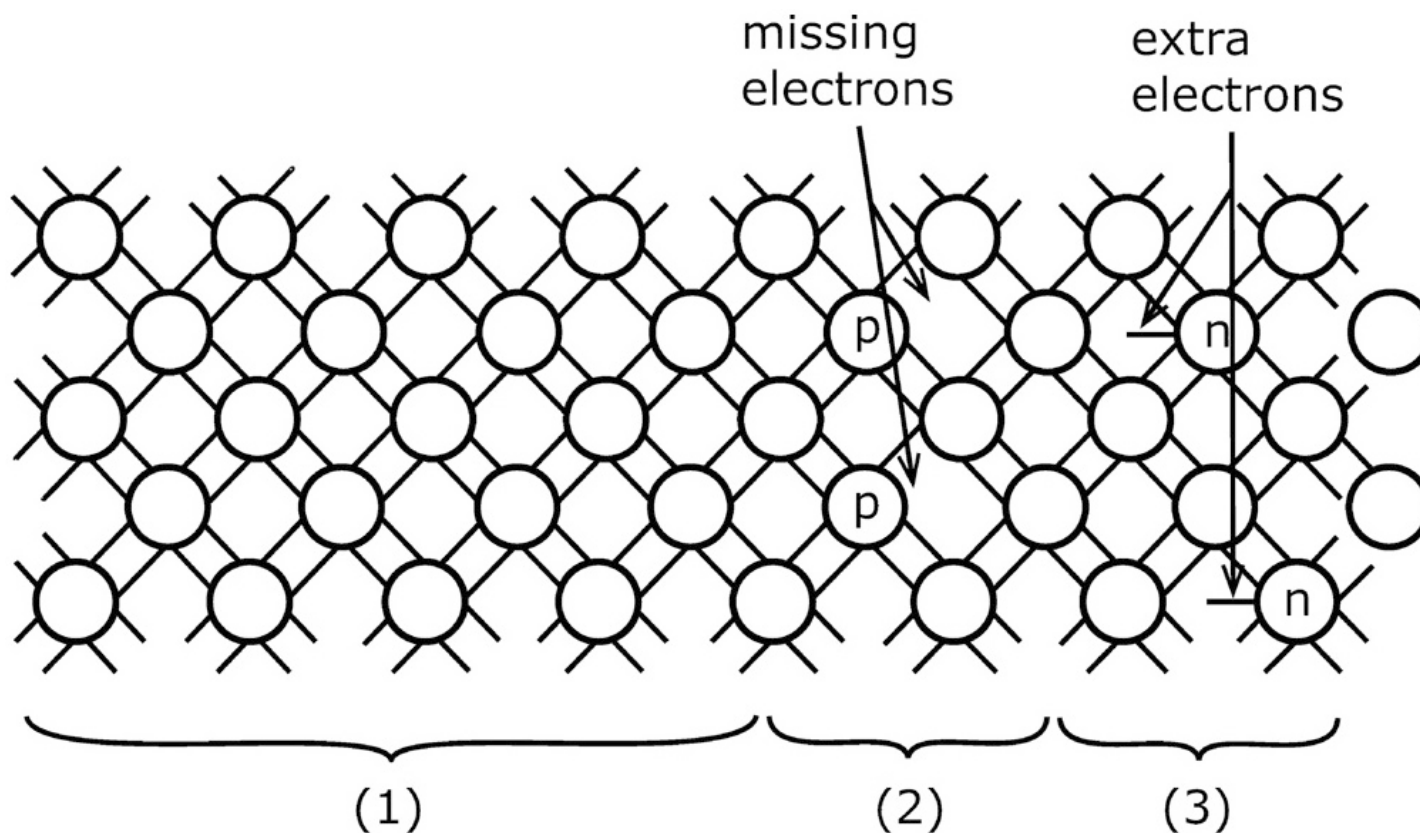
 磷原子由于可以释放1个电子而被称为施主原子，又称施主杂质。

2. 紫外-红外波段的光子探测器

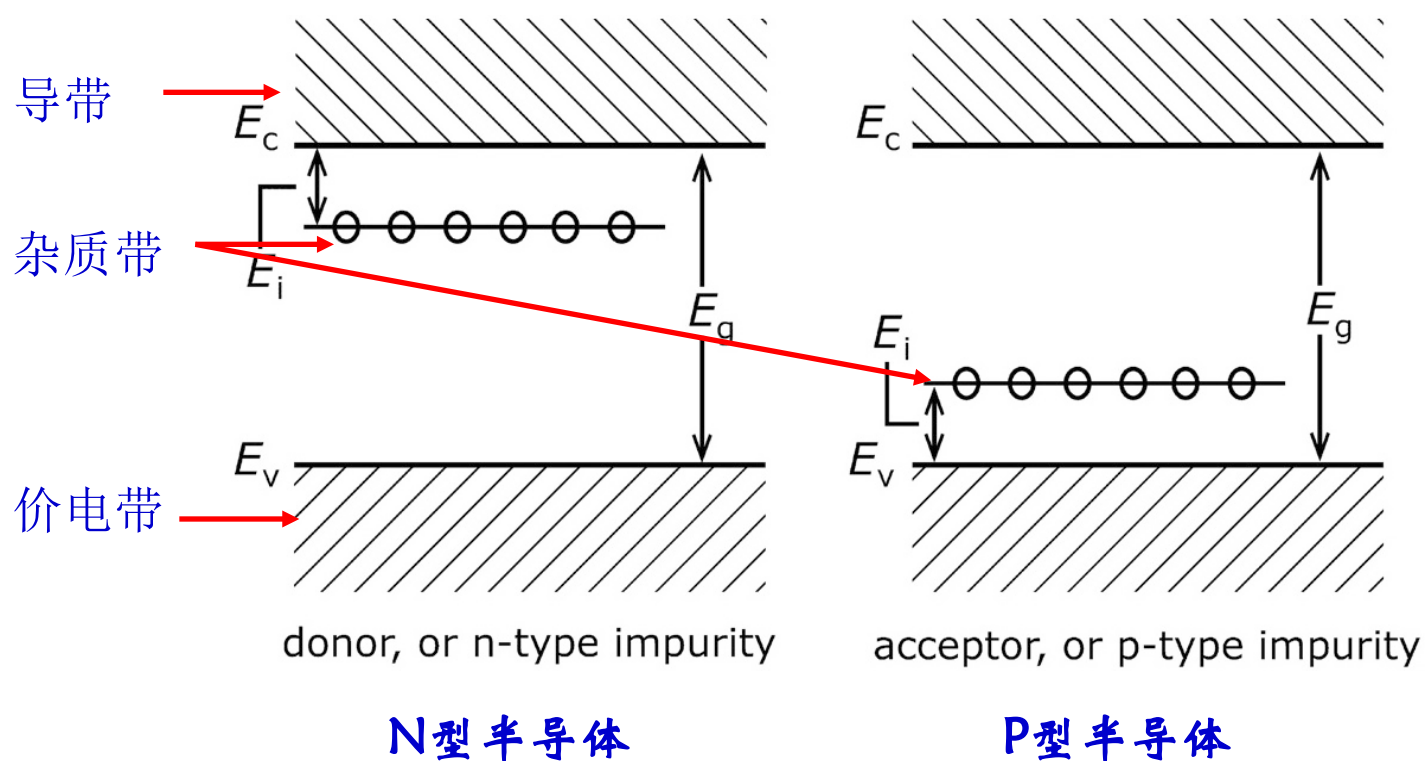
➤ P型半导体

-  在本征半导体硅（或锗）中，若掺入微量的3价元素，如硼，这时硼原子就取代了晶体中的少量硅原子，占据晶格上的某些位置。
-  硼原子的3个价电子分别与其邻近的3个硅原子中的3个价电子组成完整的共价键，而与其相邻的另1个硅原子的共价键中则缺少1个电子，出现了1个空穴。
-  这个空穴被附近硅原子中的价电子来填充后，使3价的硼原子获得了1个电子而变成负离子。同时，邻近共价键上出现1个空穴。由于硼原子起着接受电子的作用，故称为受主原子，又称受主杂质。

2. 紫外-红外波段的光子探测器



2. 紫外-红外波段的光子探测器



2. 紫外-红外波段的光子探测器

- 光子探测器的效率依赖于光子在半导体中的吸收长度。

$$\frac{dS}{dl} = -a(\lambda)S$$

其中， S 是光子流量， $a(\lambda)$ 是吸收系数
(单位 cm^{-1} ，表征单位长度被吸收的概率，
 l 是光子在探测器前行的距离。

$$S = S_0 e^{-a(\lambda)l}$$

其中 S_0 是进入半导体的初始光子流量。

吸收的量子效率

$$\eta_{ab} = \frac{S_0 - S_0 e^{-a(\lambda)d_1}}{S_0} = 1 - e^{-a(\lambda)d_1}$$

其中， d_1 是探测器的厚度。

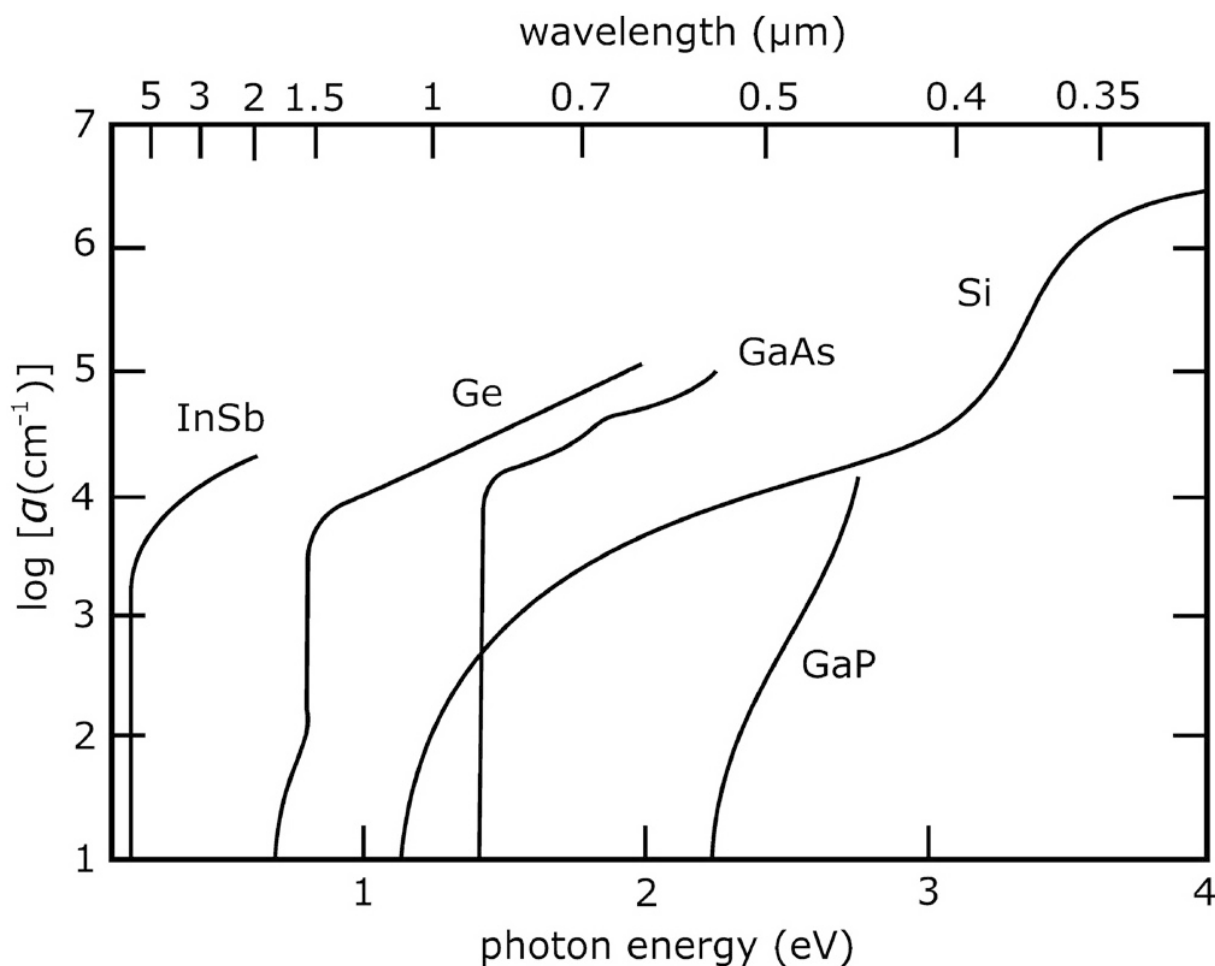
增强光子吸收的
效率，需提高



吸收系数
探测器厚度

2. 紫外-红外波段的光子探测器

➤ 一些本征半导体的吸收系数:



➤ 锑化铟 (InSb) 和 砷化镓 (GaAs):

在截止波长附近有很高的吸收系数, 这类探测器因此有很好的量子效应。

➤ 硅 (Si):

在截止波长附近量子效应低下。

3. 探测器的性能

- 1. 量子效率 (QE) 和可测量子效率 (DQE)
- 2. 探测率
- 3. 探测器阵列 (detector array)
- 4. 响应的线性化
- 5. 动态范围
- 6. 响应时间 (time response)
- 7. 光谱响应 Spectral response

3.1 探测器的性能

➤ 量子效率 (QE) 和可测量子效率 (DQE)

 量子效率 (QE) : 输出光电流与入射光子流的比值。

 可测量子效率 (DQE) : 探测器的输出信噪比的平方与输入信噪比的平方之比, 即

$$DQE = \frac{(S/N)_{\text{输出}}^2}{(S/N)_{\text{输入}}^2}$$

3.2 探测器的性能

► 探测率

- 探测器能探测到的最小辐射功率的倒数为探测率。
- 探测器的最小可探测功率用噪声等效功率（NEP）来表示，因为任何探测器都有噪声，产生如噪声那样大的信号所需要的辐射功率即为噪声等效功率。
- NEP越小，探测率越高。

3.3 探测器的性能

➤ 探测器阵列 (detector array)

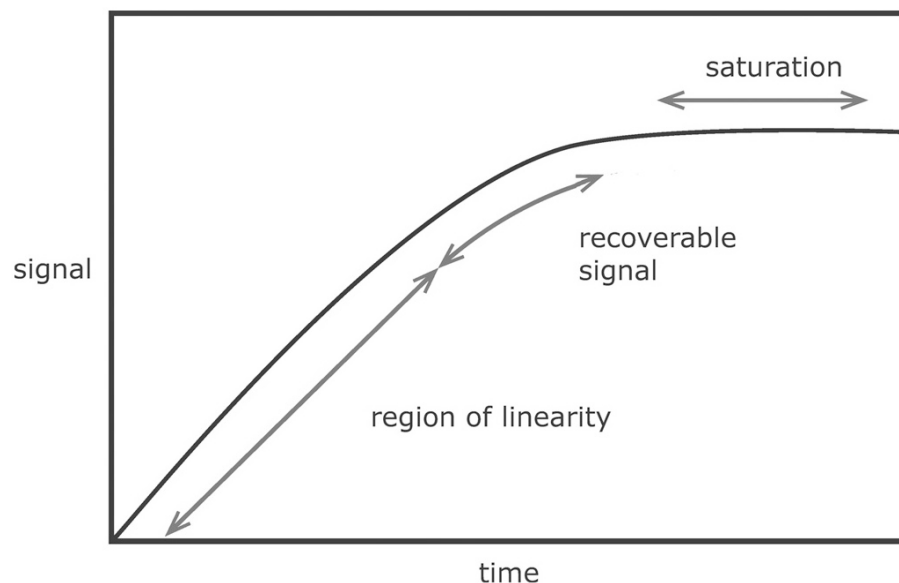
 现代紫外-光学-红外的探测器往往制成**陈列**。

 陈列的每个元素称之为**像素(pixels)**。像素大小相关联于探测器的空间分辨率。

3.4 探测器的性能

➤ 响应的线性化

- 探测器的输出信号随输入信号**线性**增加。
- 输出信号的**线性响应**只在一定的范围内，随着信号不断增加，其最终会达到饱和。



3.5 探测器的性能

➤ 动态范围：

探测器输出信号的可用范围：最小值由噪声决定，最大值由饱和值决定。

3.6 探测器的性能

➤ 响应时间 (time response)

光照后，探测器恢复到光照前需要的时间：

$$\tau_{RC} = RC$$

其中， R 是探测器的电阻， C 是探测器电容。

对探测器输入一电压为 V_0 的脉冲，探测器的响应为

$$V = \frac{V_0}{\tau_{RC}} e^{-t/\tau_{RC}}$$

响应时间决定探测器的时间分辨率。

3.7 探测器的性能

➤ 光谱响应 Spectral response

探测器能响应的光子的频率范围。理想情况下，短于截止波长的所有光子能被探测器响应。

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24\mu m}{E_g(eV)}$$

其中， E_g 是价带与导带间的带沟。

4. 探测器的噪声

- 1. 光子噪声
- 2. 约翰逊噪声 (热噪声, Johnson or Nyquist Noise)
- 3. 暗流
- 4. kTC 噪声
- 5. $1/f$ 噪声

4.1 探测器的噪声

- 光子噪声：
接近于光子数的平方根。

4.2 探测器的噪声

- 约翰逊噪声(热噪声, Johnson or Nyquist Noise) :
电阻中自由电子的热运动, 是电阻的固有性质。

$$\langle I_J^2 \rangle = \frac{4kTdf}{R}$$

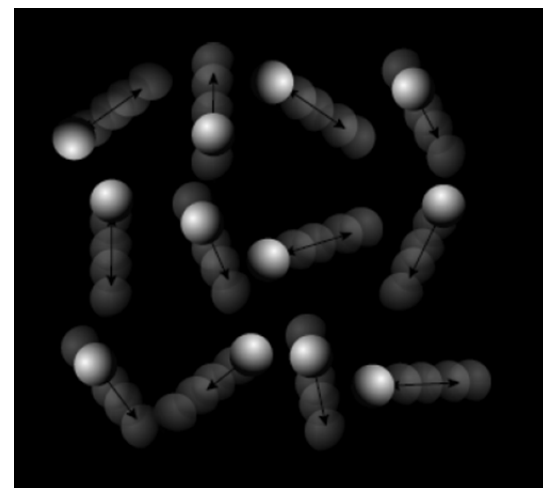
其中, $\langle I_J^2 \rangle$ 是热噪声产生的平均电流的平方, df 是带宽 (即测量该电流的频率范围), k 是波尔兹曼常数, R 是电阻。

1. 降低温度
2. 增大电阻
- > 降低热噪声

5.3 探测器的噪声

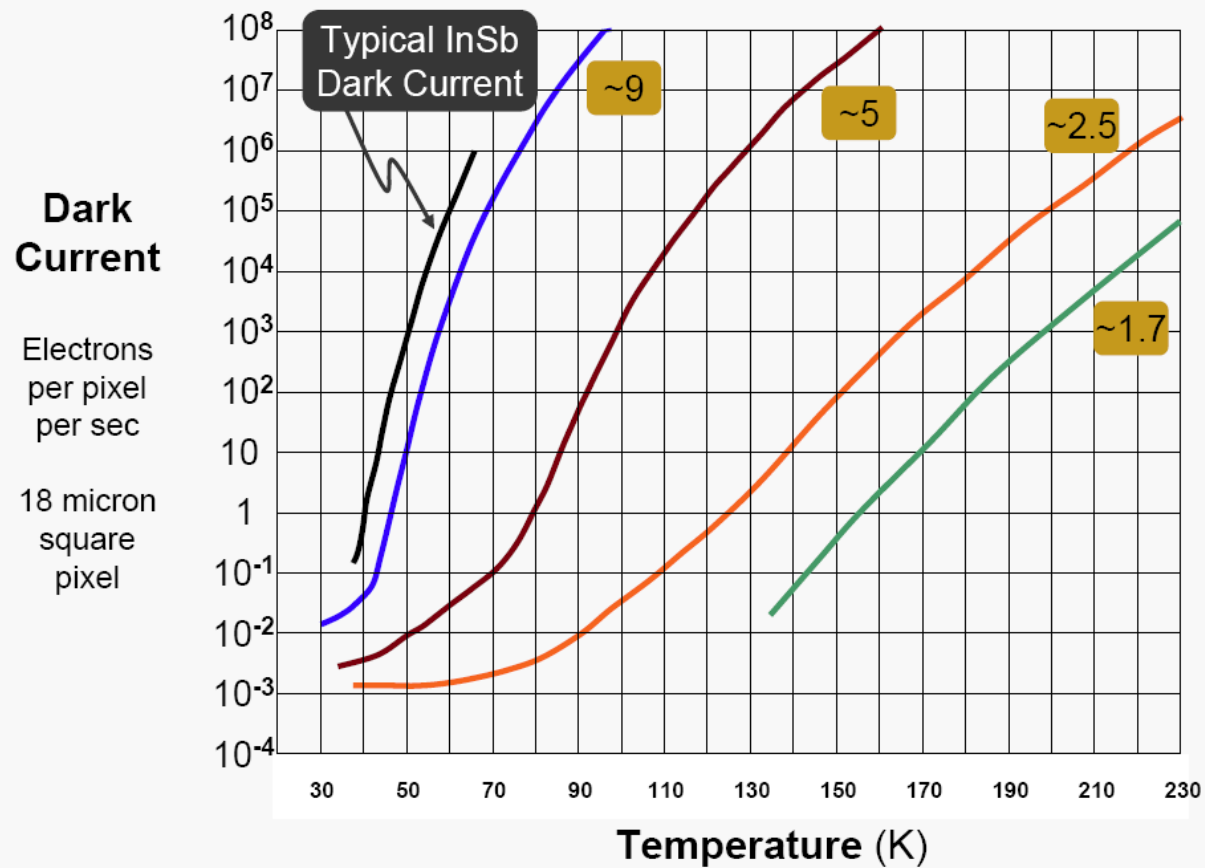
► 暗流:

粒子的震动能级在高于绝对温度下的分布是马克斯威尔—波尔茨曼分布，**价带中的电子有一定概率通过震动激发到导带中从而产生自由电子。**暗流在没有光照射下产生电子流。



1. 温度越低
 2. 截止波长越短 (即带沟越大)
- } —————> 暗流越小

Dark Current of MBE HgCdTe



4.4 探测器的噪声

➤ kTC 噪声：

电容中自由电子的热运动。

该噪声产生的平均电荷的平方

$$\langle Q_n^2 \rangle = \frac{kTC}{q^2}$$

其中， k 是波日茨曼常数， T 是绝对温度， C 表征电容。

4.4 探测器的噪声

➤ 1/f 噪声

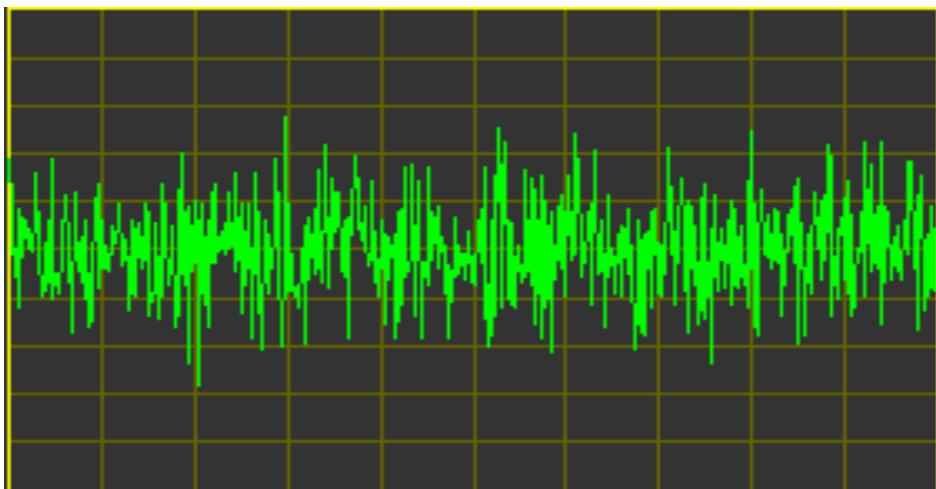
■ 该噪声的功率谱密度（单位频率内的能量）与频率成反比。

$$S(f) \propto 1/f^\alpha$$

其中, $0 < \alpha < 2$, 一般 $\alpha = 1$.

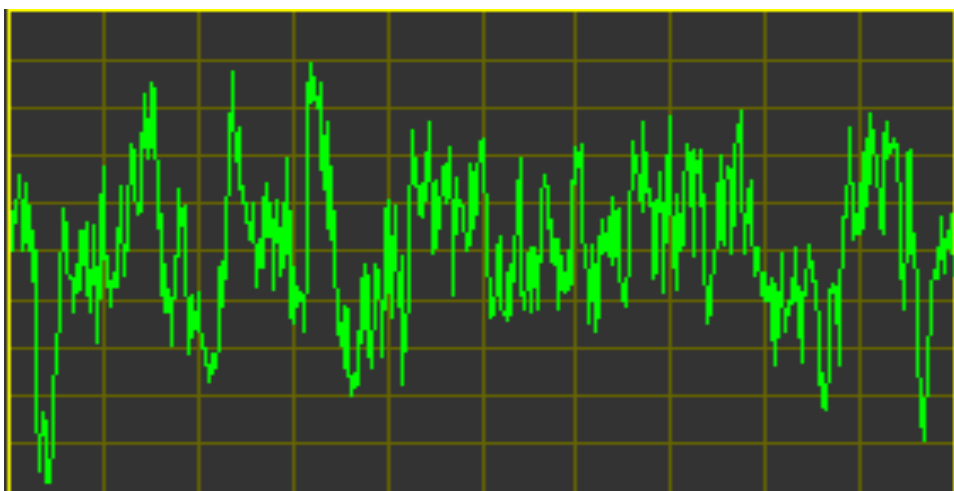
■ 由凝聚态材料部件的慢波动属性引起, 如半导体材料中陷阱占有率的波动。

白噪声随时间的变化：完全无序



Herschel红外空间望远镜的探测器受 $1/f$ 噪声的影响很大。

$1/f$ 噪声随时间的变化：短时标上无序，长时标上有一定规律



5. 红外探测器

- 杂质带传导探测器 (Impurity Band Conduction (IBC) devices)。
- 光电二极管 (photodiodes)。

5.1 杂质带传导探测器

➤ 杂质带传导探测器

■ 用于波长5到35微米。

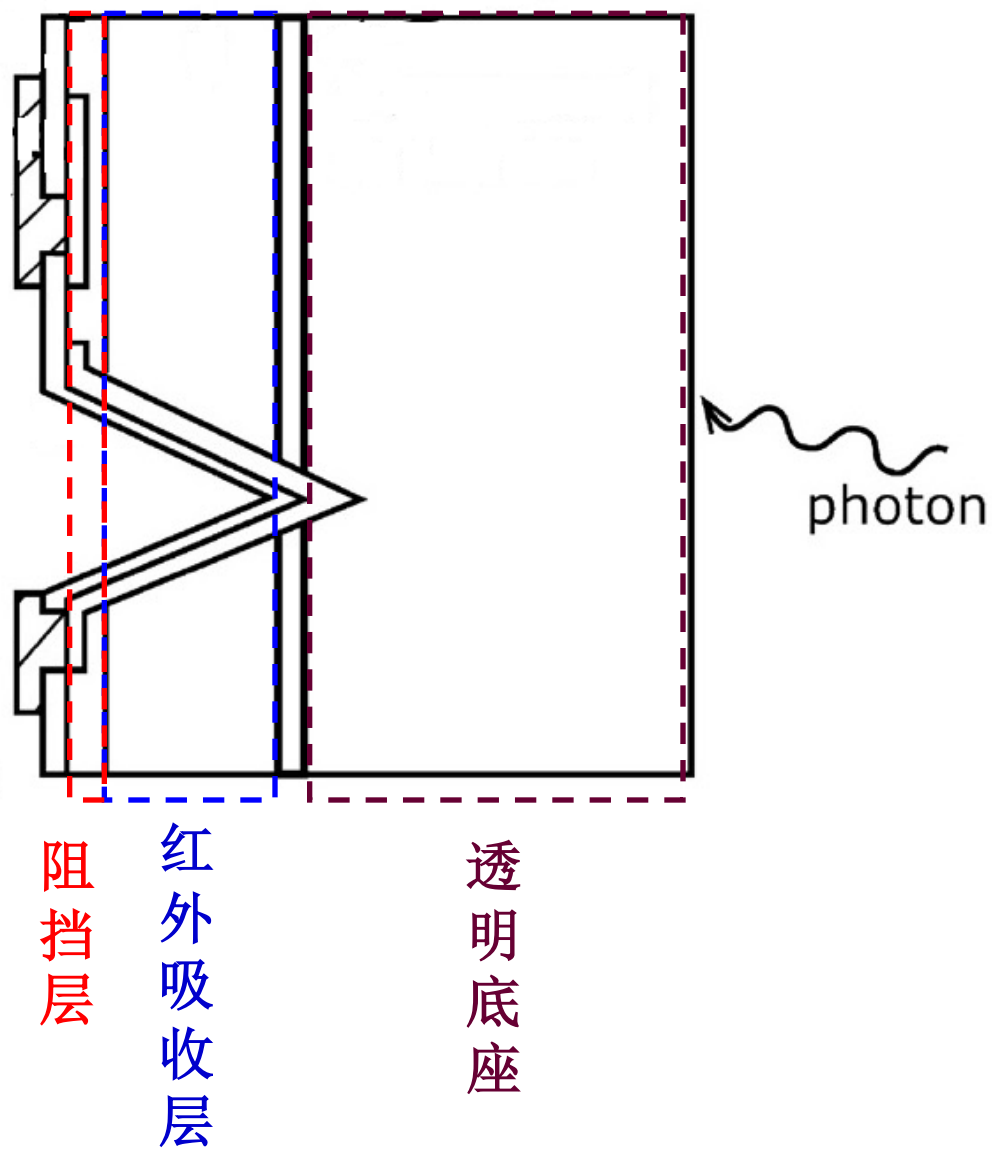
■ 基本原理：

把吸收光子的区域与收集光子的区域分隔开。前者需要较高的杂质成分来实现高效的吸收，而后者需要高电阻（因此低杂质成分）来降低各种噪声（如热噪声）。

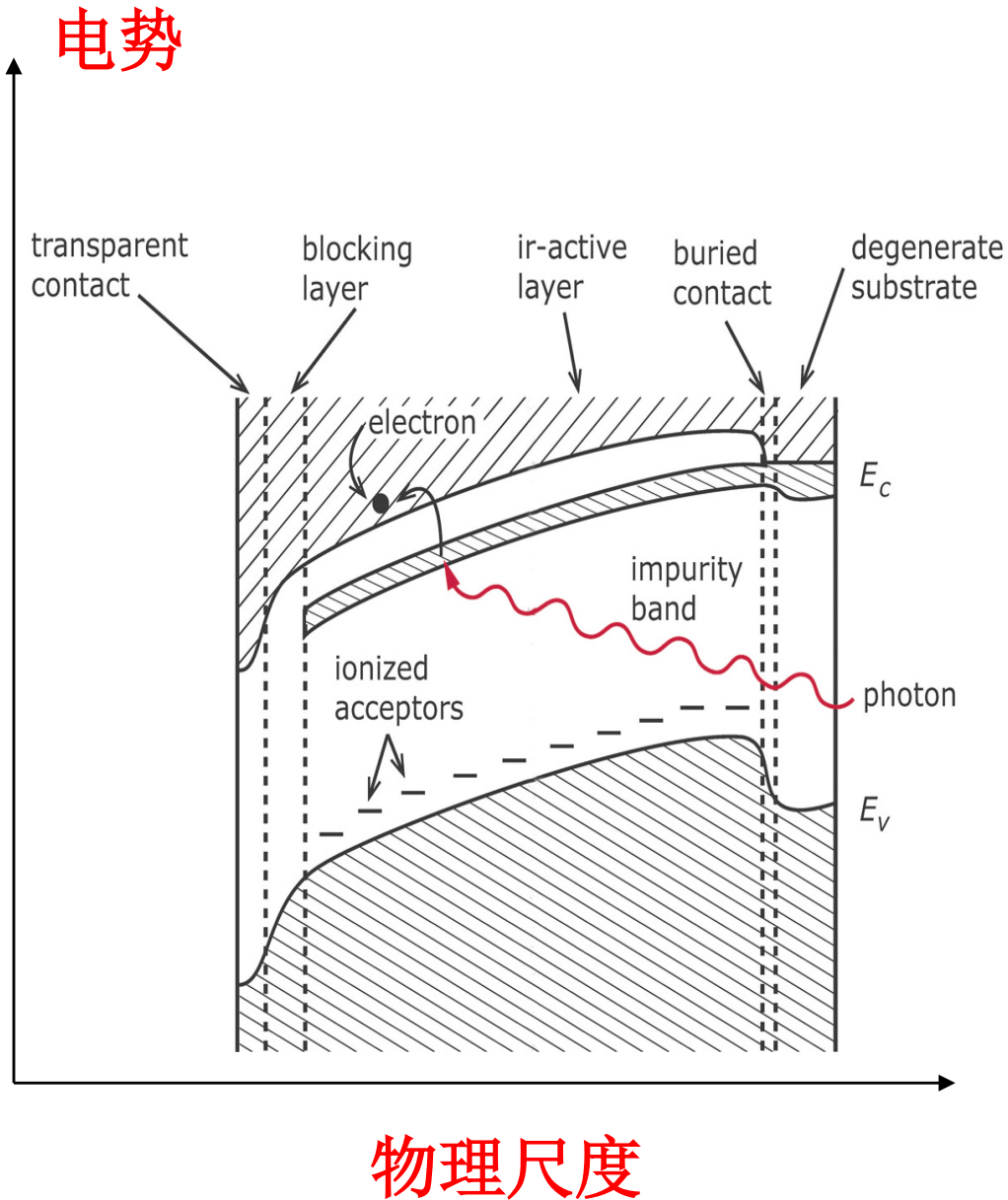
■ 最常用的杂质带传导探测器是硅掺砷探测器（Si:As IBC devices）

5.1 杂质带传导探测器

物理结构:



工作原理



➤ 阻挡层:

- 导带
- 价带

➤ 红外吸收层:

- 导带
- 价带
- 介于两者间的杂质带

5.1 杂质带传导探测器

➤ 工作原理

 红外吸收层里杂质带的电势低于阻挡层的导带，这导致杂质带的电子由于热运动无法进入导带而被收集。

 而红外吸收层杂质带的电子在吸收了红外光子，被激发到导带后，就可以自由移动进入阻挡层里的导带，从而被一端的电极收集到。

5.2 光电二极管

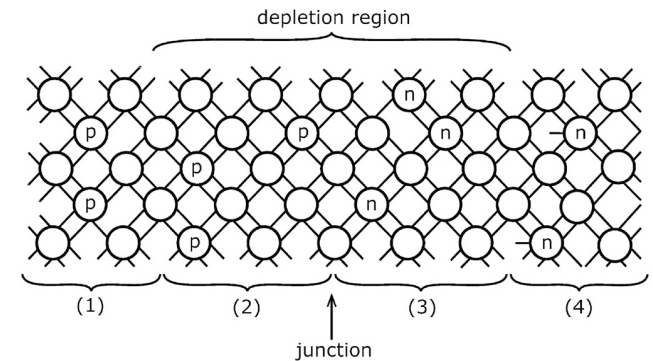
➤ 光电二极管 (photodiodes)

■ 一个PN结组成的半导体器件。

■ 基本结构：把P型和N型半导体粘在一起，N型中的电子扩散到P型中，填充多余的空化学键，中间形成没有自由电荷的耗尽层，同时生成的微弱电场阻止进一步的扩散。

5.2 光电二极管

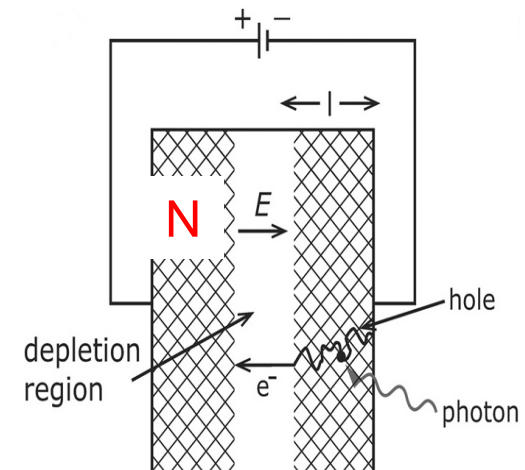
图中 (1) 区的P杂质和 (4) 区的N杂质是中性的。而 (2) 区的P杂质从 (3) 区的N杂质获得了一电子。



中间的耗尽层，无载流子，具有微弱电场。

加正向电场 (n端连负极，p端连正极)，耗尽层变窄，有电流。

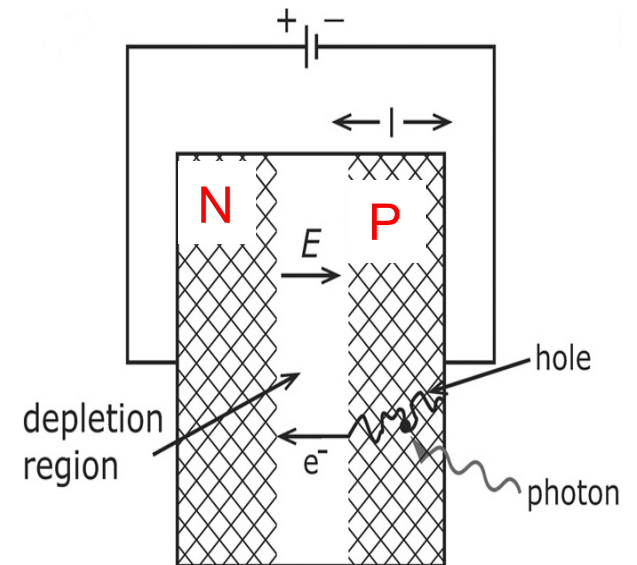
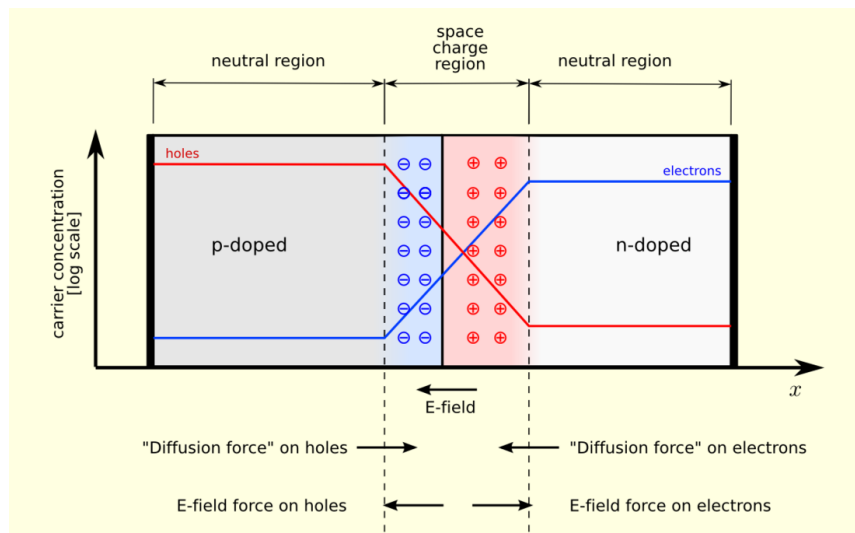
加反向电场 (p端连负极，n端连正极)，耗尽层增宽，无电流。



5.2 光电二极管

当光照射加了反向电场的二极管：

- 耗尽层：由光子激发的电子-空穴在电场作用下，形成从n到p的光电流。
- 两侧中性层：由光子激发的少数载流子（n型中的空穴，p型中的电子）如果离耗尽层比较近（小于扩散长度），可以通过扩散运动进入耗尽层，从而产生从n到p的光电流。
- 光电流的强度正比于入射的光子流。



5.2 光电二极管

► 加宽耗尽层的优势

- 因自由电子会复合，电子扩散的长度是有限的。这就要求PN结两边中性区的厚度小于电子的扩散长度以获得高量子效率。因此通过增强电场（P端连负电压，N端连正电压），增加耗尽层的宽度，减小两段中性区的厚度。
- 加厚的耗尽层同时可以降低电容（跟厚度成反比），减小读出噪声。

5.2 光电二极管

➤ 低温工作

光电二极管需要低温来降低噪声和暗流。然而低温下的电子扩散长度会缩短，要求高工艺水平来完成超薄的厚度（10-20微米）！

5.2 光电二极管

➤ 光电二极管

- 近红外的量子效率达到90%。
- 用于波长0.6-5微米，更长波段上很难达到低暗流
- 常用的材料有锑化铟(InSb)或碲镉汞(HgCdTe)。

➤ 杂质带传导探测器

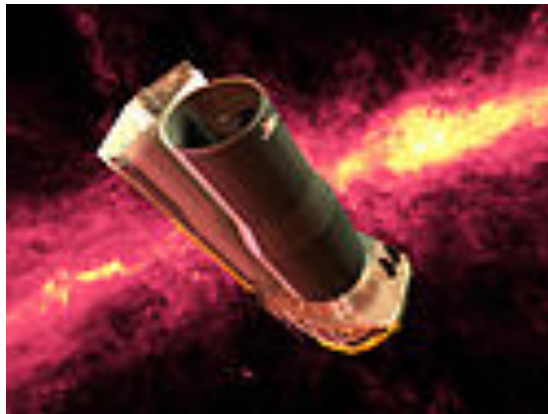
- 用于波长大于5微米到35微米。

5.2 光电二极管

➤ Spitzer 红外空间望远镜

■ 3.6和4.5微米上的探测器：InSb 光电二极管。

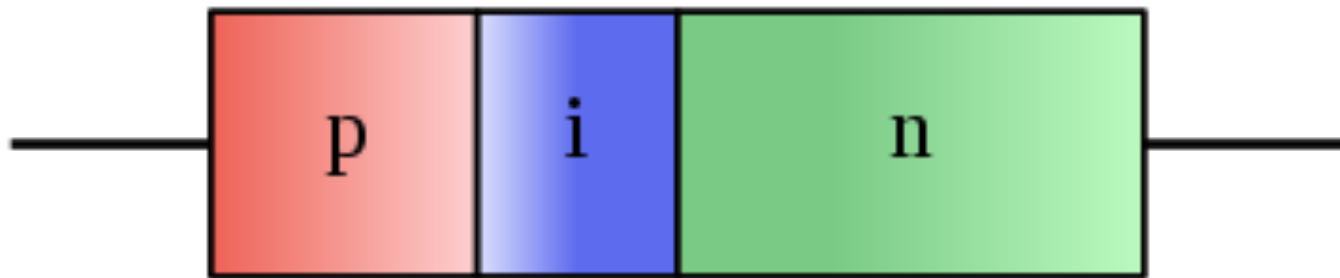
■ 5.8和8.0微米上的探测器：Si:As杂质带传导探测器。



5.3 其他二极管

➤ PIN结：

- ❏ P型与N型之间加入中性的本征半导体材料，并且通过该材料来吸收光子。
- ❏ PIN结完成了高厚度的中间层，而又没有PN结的一些问题，如不需要超薄的P层和N层，因为PIN结的光子吸收发生在中层。



5.3 其他二极管

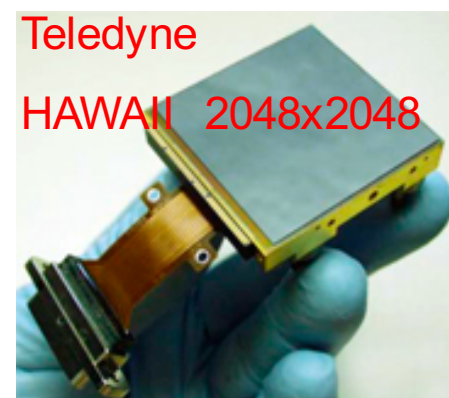
➤ 雪崩光电二极管

- 加上较高的电压，光子激发的单个电子通过电子碰撞释放更多的自由电子，从而获得了较高的内部电流增益。
- 用于单个光子或快速反应等方面的探测。

6. 红外探测器阵列

- 基本思路：探测器每个像素都连接一个放大器电路。

对于2048x2048红外探测器阵列（目前所能构造的最大），这要求超过4百万个连接点。现代工艺上是可能的！！



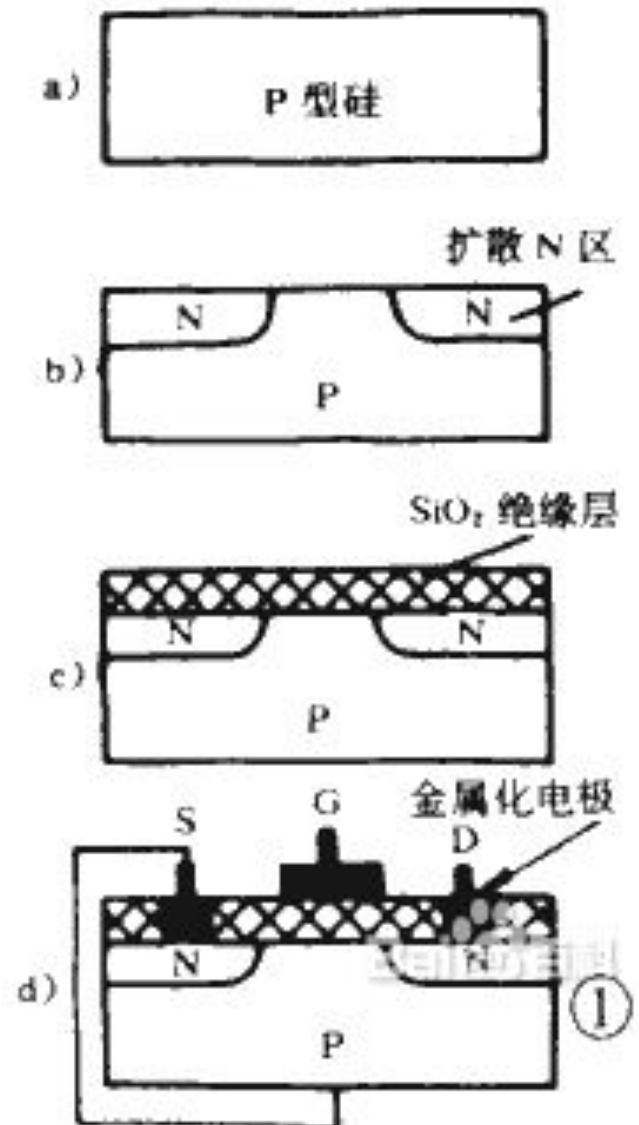
- 每个放大器通过一定数量的金氧半场效晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) 来实现。

6.1 放大器：金氧半场效晶体管

(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)

➤ 它用一块P型半导体作衬底（图1a），在其面上扩散了两个N型区（图1b），再在上面覆盖一层二氧化硅（ SiO_2 ）绝缘层（图1c），最后在N区上方用腐蚀的方法做成两个孔，用金属化的方法分别在绝缘层上及两个孔内做成三个电极：G（栅极，Gate）、S（源极，Source）及D（漏极，Draine），如图1d所示。

➤ 从图1中可以看出栅极G与漏极D及源极S是绝缘的，D与S之间有两个PN结。

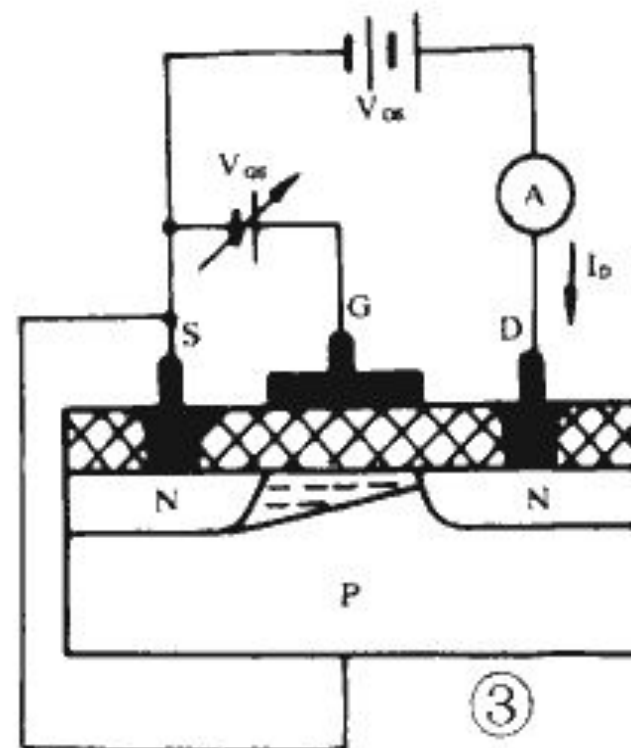


6.1 放大器：金氧半场效晶体管

➤ MOSFET 工作原理

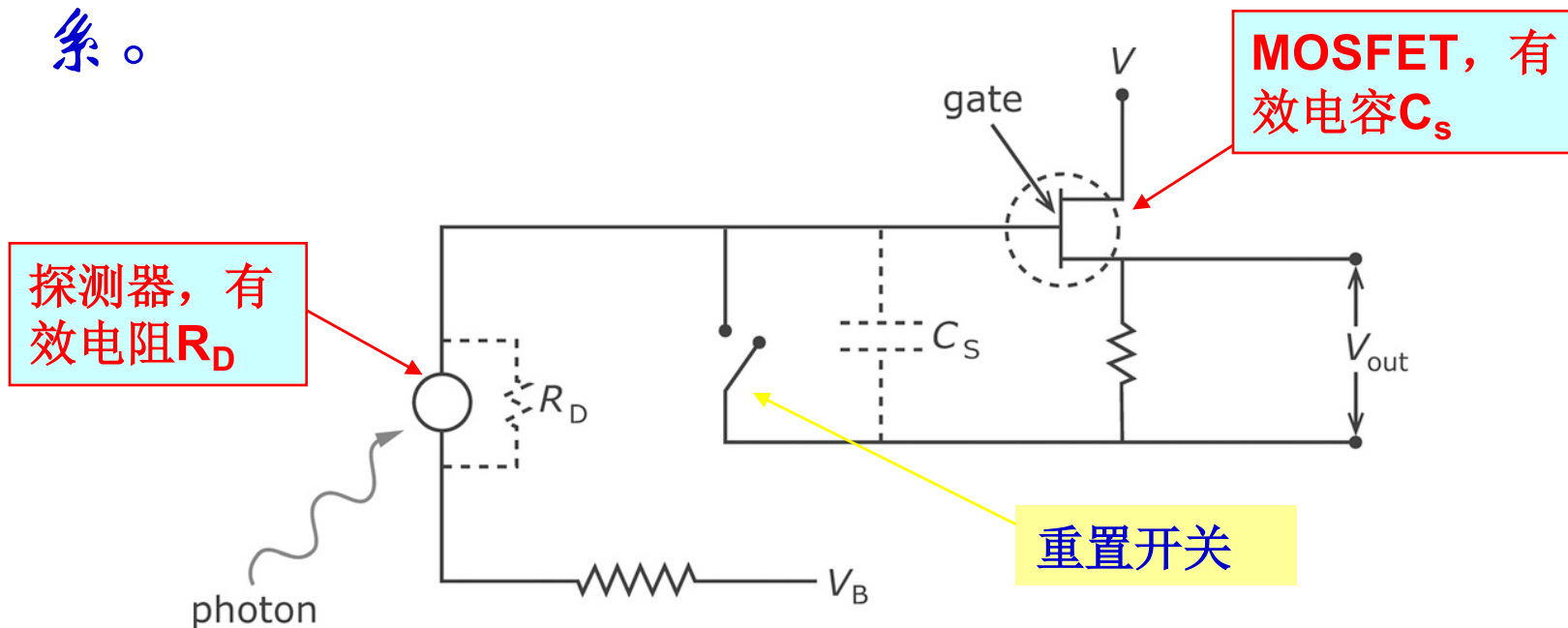
■ 源极加负电压，漏极加正电压
--> 电流无法通过。

■ 栅极加上正电压，在其表面会吸附一定的电子，从而沟通源极和漏极的N区。



6.1 放大器：金氧半场效晶体管

- 利用上述原理，把栅极连接到探测器像素的一端（如下图）。
- 随着光子激发的自由电子不断累积，栅极上的电压不断增大，负电荷增加，导电沟道扩大，电阻降低，输出电流也随之增加，并且呈较好线性关系。



6.1 放大器：金氧半场效晶体管

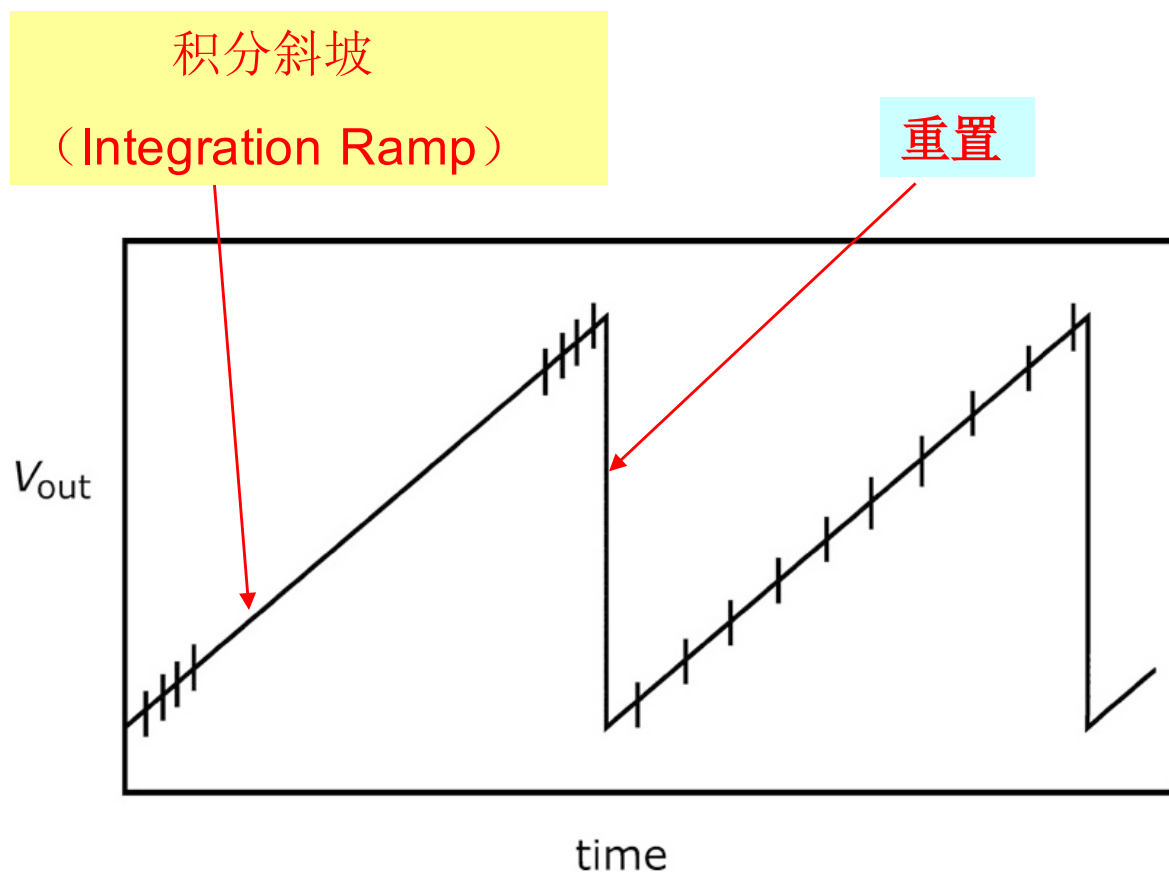
➤ 当积分时间满足：

$$t_{\text{integration}} \ll R_D C_S$$

响应的线性非常好。

6.2 读出

- 当探测器曝光时，输出电压随时间的变化。



6.2 读出

➤ 读出方法1:

 在重置前后非常短的时间内读出，得到 $V(t_{\text{before}}) - V(t_{\text{after}})$ 。

 因信号在短时间内读出，不受放大器的低频噪声影响。

 受重置而引起的KTC噪声很大

$$\langle Q_n^2 \rangle = \frac{kTC}{q^2}$$

6.2 读出

➤ 读出方法2:

积分斜坡开始与结束前读出。

不受KTC噪声影响。因为KTC噪声的变化时标是 $R_D C_S$, 只要积分斜坡的时间尺度远小于 $R_D C_S$, 积分开始时与结束前的KTC噪声是一样的, 通过相减两则来消除KTC噪声。数学上, 该方法受KTC噪声的影响为:

$$\sqrt{\frac{kTC_S}{q^2}}(1 - e^{-t/t_s})$$

其中, $t_s = R_D C_S$, t 为两次读出的时间差。

例子

- MOSFET (电容= 10^{-12} F) 工作在温度40K, 那么KTC噪声是多少 (单位:均方根电子数) ?

$$\langle Q_n^2 \rangle = \frac{kTC}{q^2} = 21578$$

--> 对此开根号, 得到均方跟电子数 = 147。

- 现在假设探测器的电阻 10^{17} 欧, 重置间隔为100秒, 读出方式是在积分斜坡的开始和结束前。KTC噪声是多少?

RC时标

$$t_{RC} = RC = 10^5 \text{ sec}$$

KTC噪声 :

$$147(1 - e^{-t/t_{RC}}) \approx 147 \times \frac{t}{t_{RC}} = 0.15 \text{ 均方跟电子}$$

例子

- 假定每秒2.5光子照射探测器，量子效率是0.80，暗流为0.1 e/s，放大器读出噪声20个电子（均方根）。总噪声是多少？

光子照射每秒产生 $2.5 \times 0.8 = 2$ 个电子，100秒的曝光里产生200个电子，暗流在100秒产生10个电子，总电子流为210个电子。总噪声为

$$\sqrt{0.15^2 + 20^2} + 210 = 24.7 \text{ 个均方根电子}$$

读出噪声远大于其他噪声。

例子

➤ 可测量子效率为多少？

输入信号的S/N为： $\frac{250}{\sqrt{250}} = 15.81$

输出的信号为： $\frac{200}{24.7} = 8.1$

可测量子效率为0.26。

6.2 读出

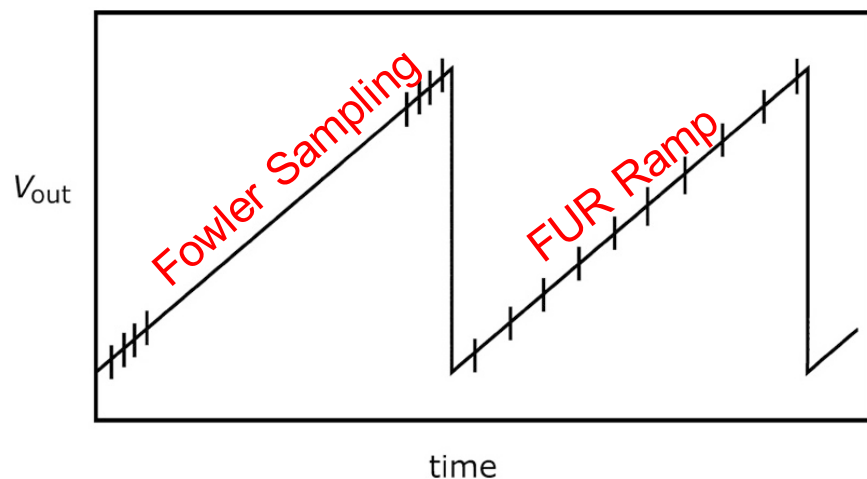
- 从上面可以看出读出噪声非常大，严重地降低了可测量子效率。
- 通过多次读出取平均的方法来降低读出噪声。

6.2 读出

在开始与结束前附近多次读出，称之为Fowler抽样 (Fowler Sampling)：斜坡的斜率是平均每对（开始与结束前）抽样得到的斜率。

沿着积分斜坡平均抽样 (Follow Up The Ramp Sample)：斜坡的斜率是对所有抽样做最小二乘法拟合。

抽样次数较少的情况下，前者比后者噪声小。



注：读出是无损的 (nondestructive read)，即不会终止或干扰探测器的持续积分。

6.2 读出

Fowler numbers for IRAC onboard Spitzer Space Telescope

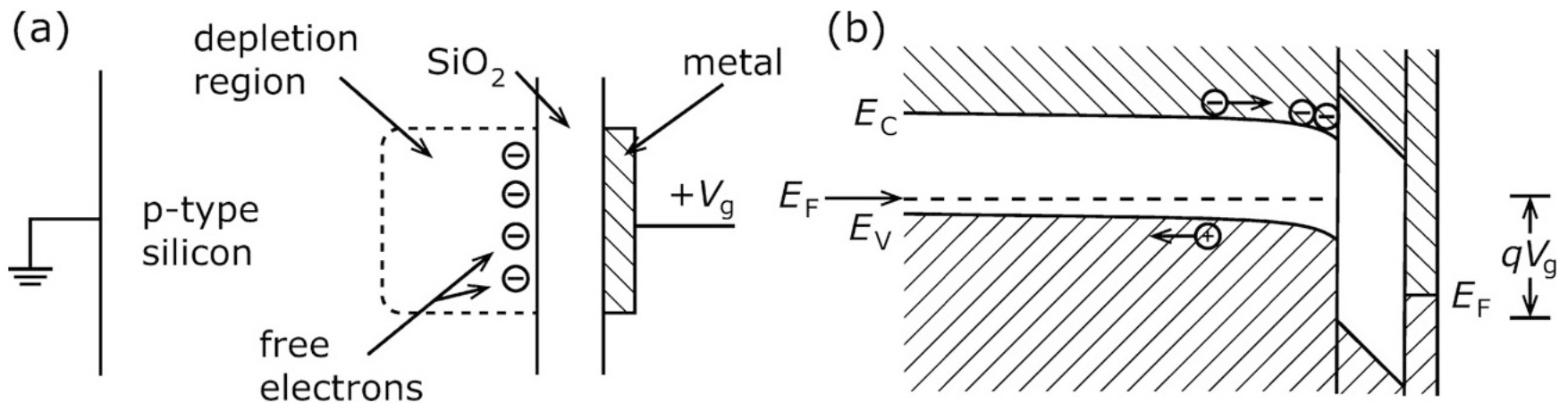
Frame Time (sec)	Readout Mode	Fowler Number
200	Full	32
100	Full	16

7. 电荷耦合元件CCD (Charge Coupled Device)

- 不同于给每个像素都连接一个放大器（用于红外探测器），CCD是构造探测器阵列的另一种巧妙的方法（获2009诺贝尔奖）。现在仍旧应用于光学波段的探测器。

7.1 电荷耦合元件CCD：基本

- CCD的基本结构是在p型硅衬底表面生长一层绝缘层 SiO_2 ，然后，用光刻技术在 SiO_2 上制造一系列间隔很小（<3微米）的电极，形成金属-氧化物-半导体电容阵列。



7.1 电荷耦合元件CCD：基本

- 硅衬底掺杂P型的好处是减少因热激发产生的自由电子积聚（其他波段可能会用n型衬底）。
- 在电极加上正电压后，硅衬底靠近绝缘层一端形成耗尽层，且形成的势阱能吸附光子所激发的自由电子。
- 从电极一侧照射探测器，称之为前端照射。反之，从硅衬底一面照射称之为后端照射。

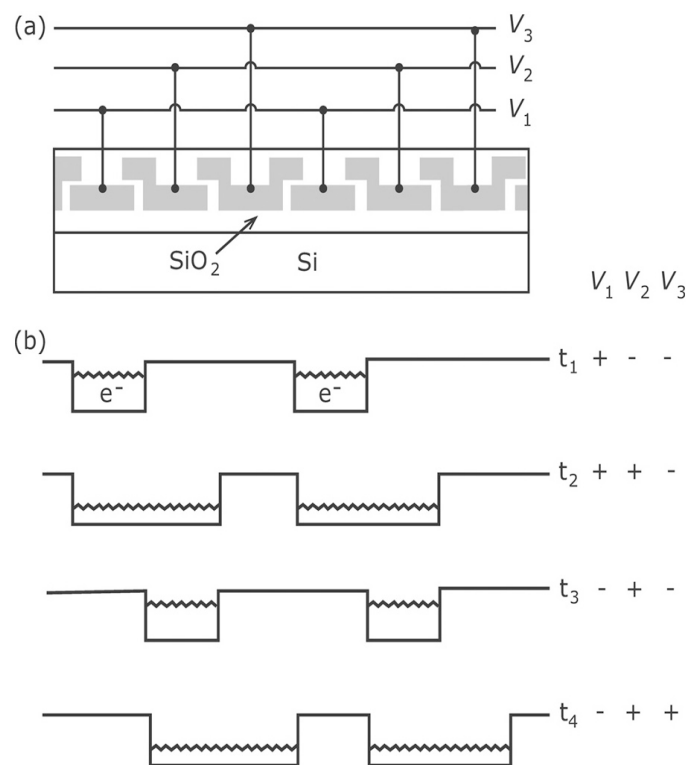
7.1 电荷耦合元件CCD：基本

➤ CCD可以通过金属化布线，形成三相结构：

 每个像素有三个电极。当光照射CCD时，在一个（或两个）电极施加正电压来收集光子激发的电子。

 收集的电子依序通过探测器陈列读出。

7.1 电荷耦合元件CCD：基本



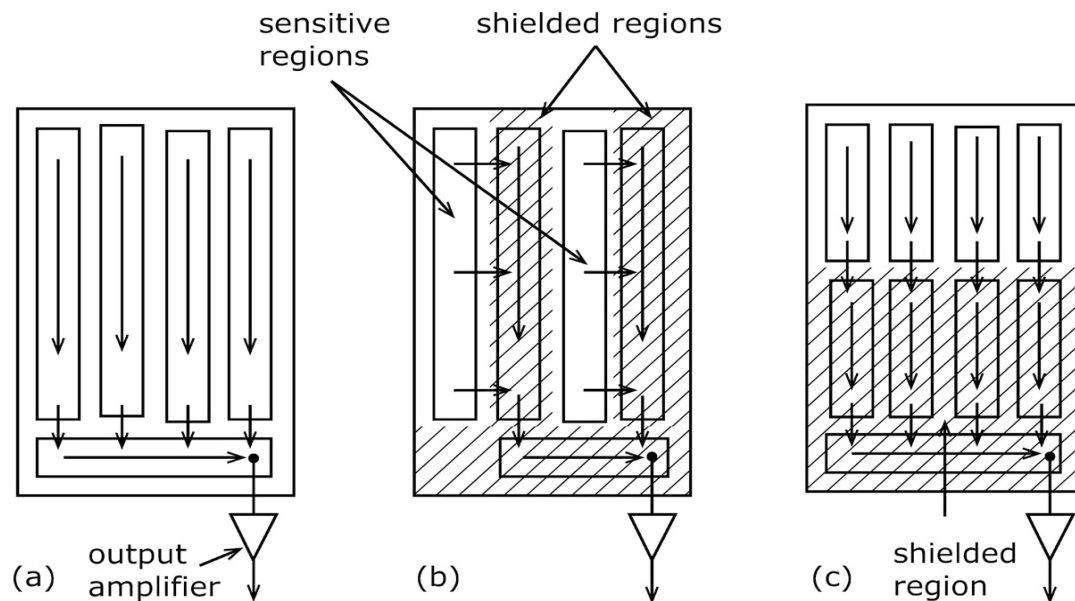
右图b是电子转移的示意图（用井来表示电势井，水来表示自由电子）：

最左边的电极施加正电压收集光子激发的自由电子。

中间电极施加相同正电压，自由电子扩散直到两个井里有相同量的自由电子。

去掉右边电极的正电压，驱使剩余的自由电子进一步转移到中间的势井。

如此反复，把自由电子从最初的收集地转移到放大器上。



➤ 三种传输方法来处理连续曝光而不断产生的电子：

- **线性传输(图a, line transfer):** 电子沿着陈列的一个方向传输。要求使用阀门 (shutter)，当读出 (即传输电子) 时，阀门关闭使整个阵列不再曝光。
- **线间传输(图b, interline transfer):** 一列上的电子传输到邻近的被遮挡的陈列上，然后在沿着垂直方向传出[探测器的有效使用率降低]。
- **帧传输(图c, frame transfer):** 用于曝光的探测器的子陈列传输到被遮挡的子陈列[探测器的有效使用率降低]

7.1 电荷耦合元件CCD：基本

➤ CCD 的性能：

■ 沿着传输的方向，强信号（或电子）会分散到邻近的像素上，在CCD传输方向上拉伸图像。

■ CCD的电荷传输效率（Charge Transfer Efficiency, CTE）：电子从一个像素被传输到邻近像素的比例。现代CCD要求非常高的CTE（0.999 999！）。

如CTE=0.9999，2048x2048CCD，假定最远的像素是天体图像所在的位置，整个背景的亮度很低，那么天体所丢失的光达到 $1 - 0.9999^{(2048 \times 6)} = 70\%$ ！

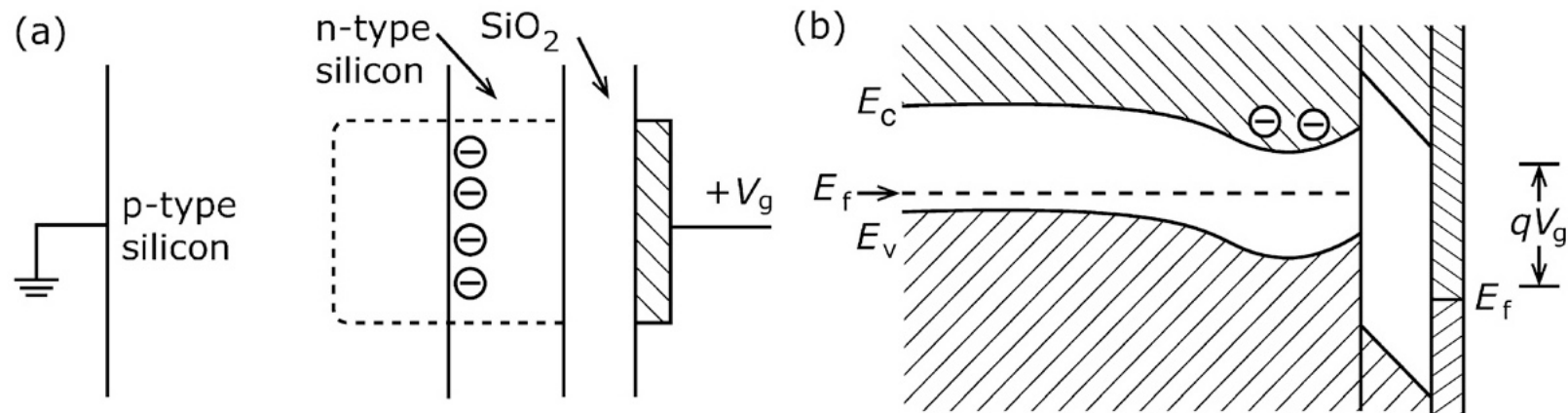
如CTE= 0.999 999，只丢失1.2%！。

■ 低CTE造成串扰(crosstalk)以及增加噪声。

7.2.1 提高CCD的性能：植入n型半导体

➤ 植入n型半导体

绝缘层SiO₂有剩余的化学键会吸附自由电子，降低传输速度。低噪声CCD，可以植入一薄n型半导体材料使得势井的最低处离开绝缘层的表面，形成所谓的埋入沟道(buried channel)。



7.2.1 提高CCD的性能：植入n型半导体

 温度低于70-100K后，埋入沟道无法形成，原因是载流子无法获得足够的热能量来自由移动。[这是一个原因为什么红外探测器不用CCD读出]。

7.2.2 提高CCD的性能： 电离光子

➤ 电离光子

电离辐射或高能粒子会永久性破坏CCD中的晶格，因此而形成的化学键会吸附自由电子和降低电子的传输速度。

7.2.3 提高CCD的性能：紫外

► 紫外

紫外光子的吸收长度非常短。后端照射（避开电极）时，产生的自由电子离势井有一定的距离而反而被后端的化学键捕获。

 减小CCD的厚度（~20 微米）。

 在后端形成一定的负电压来帮助电子移动到势井中。

7.2.4 提高CCD的性能： 近红外

➤ 硅半导体材料对近红外（0.9微米）有非常低的量子效率：

 加厚衬底来增大吸收效率。负效应是造成串扰（crosstalk）以及增加收集电子的难度（离势井太远）。

 为克服上述负效应，衬底可以用本征硅，而不是p型硅，且在后端施加负电压，从而在整个衬底上形成耗尽层。

7.3 其他光学探测器

➤ 混合PIN硅二极管：

类似于红外探测器，但使用PIN结作为探测器像素。该种探测器有较好的红外响应。

➤ CMOS（互补金属氧化物半导体）：

类似于红外探测器，每个像素（使用硅二极管）都有一个对应的放大器。