

Optoelectronic Devices(光电子器件)

检测光子和释放光子的电子器件

Photoconductors:会因为光照改变导电性的材料

Photodiodes(光二极管)

吸收一个能量大于 E_g 的光子,就能产生一对空穴-电子对,由于内建电场的作用,电子流向n区,空穴流向p区,反向偏置能加速这个过程,增大光电流

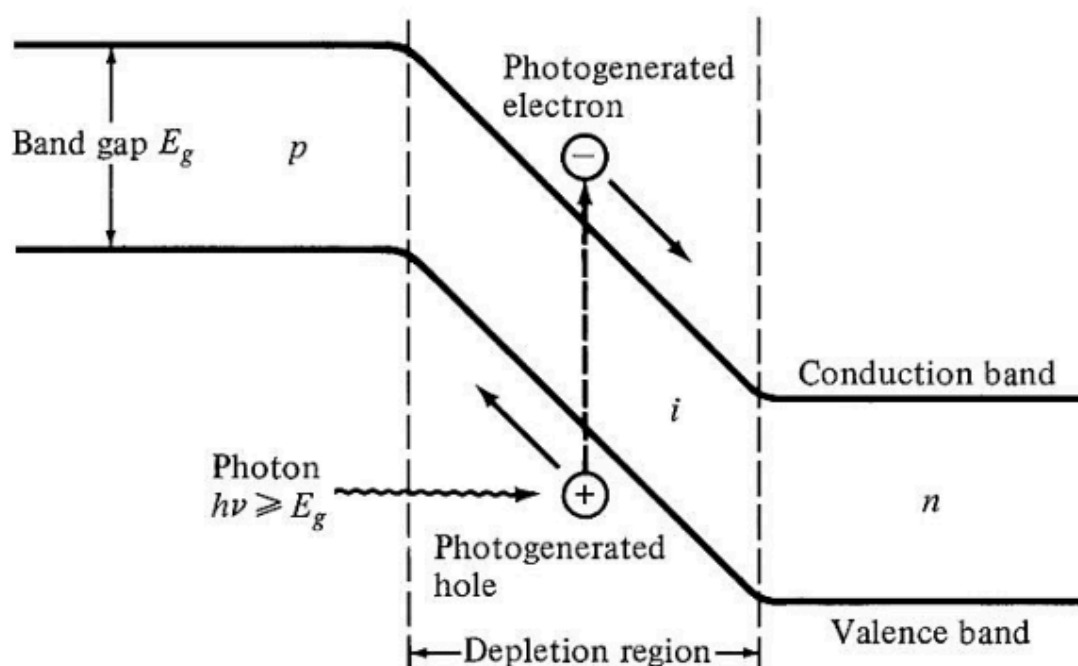


Figure 1: 吸收能量大于 E_g 的光子

光电流大小

$$I_{op} = qAg_{op}(L_p + L_n + W) \quad [1]$$

g_{op} : optical generation rate

A : P-N 结截面积

L_p : 空穴 diffusion 长度

L_n :电子 diffusion 长度

W :耗尽区宽度

总体电流(反向偏置)

$$I = I_{\text{th}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{\text{op}} \quad [2]$$

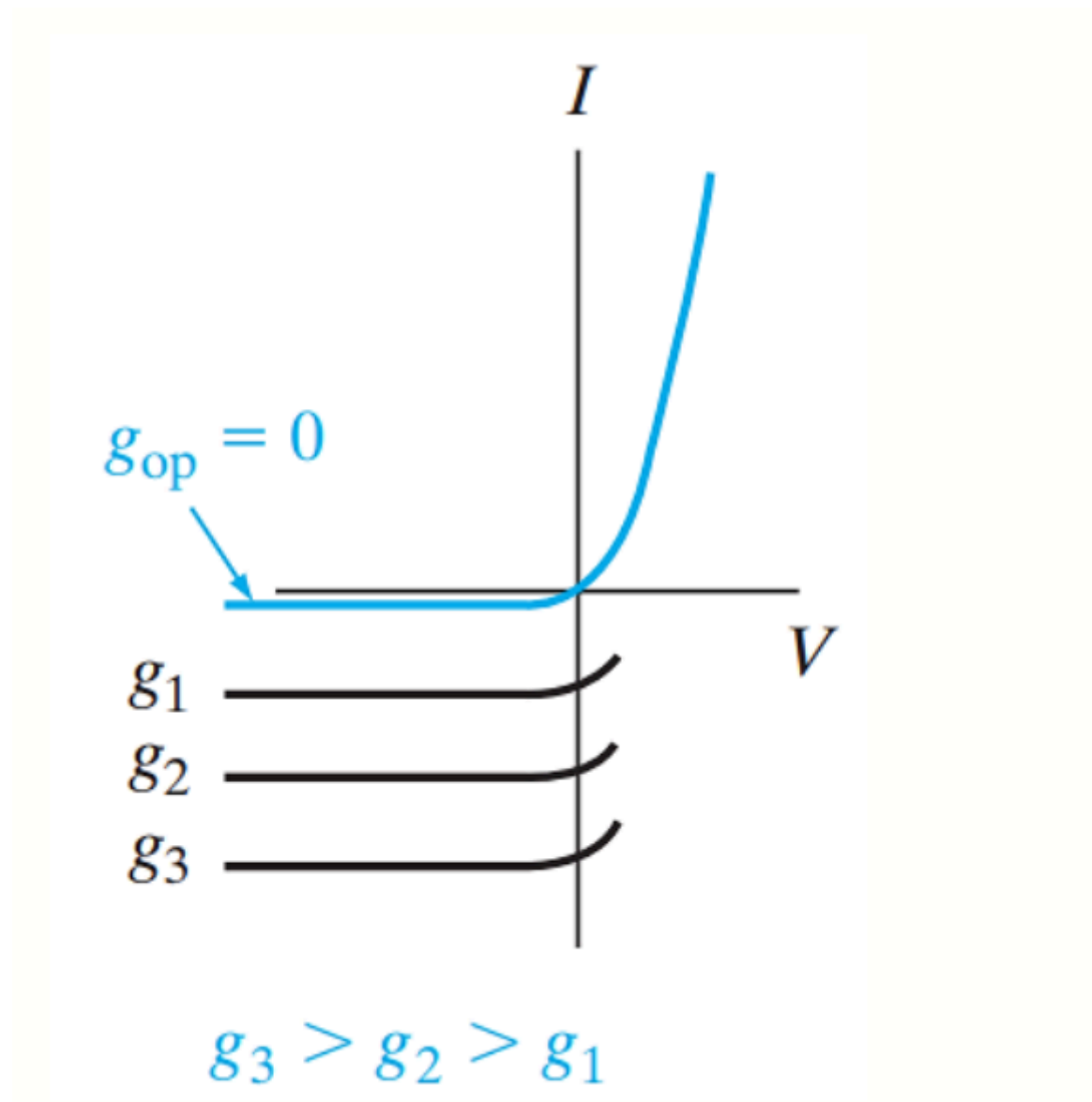


Figure 2: 光电流影响下的反向偏置

短路: $V = 0, I = -I_{\text{op}}$

短路: $I = 0$, 用公式可以推出 $V_{\text{oc}} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{\text{op}}}{I_{\text{th}}} + 1 \right]$

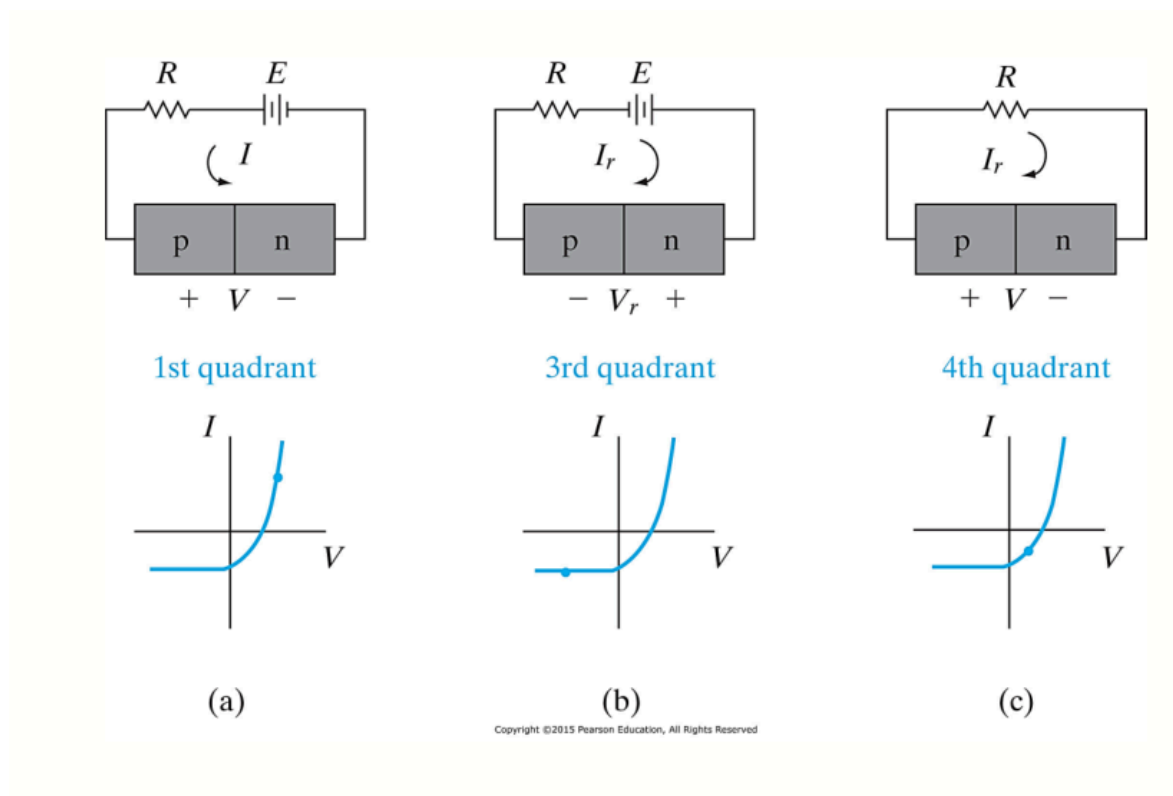


Figure 3: 不同情况下的工作点

注意第三个图, 自驱动的话虽然有光电压, 但电流和内建电场方向一致. 耗尽层增大, 能产生更大的光电流(灵敏度增大), 但是呢由于漂移时间长, 导致响应时间变长, 所以实际耗尽层厚度选择是采用的折中的方案, 所以一般是要建立一个 p-i-n 光二极管对耗尽层宽度进行控制.

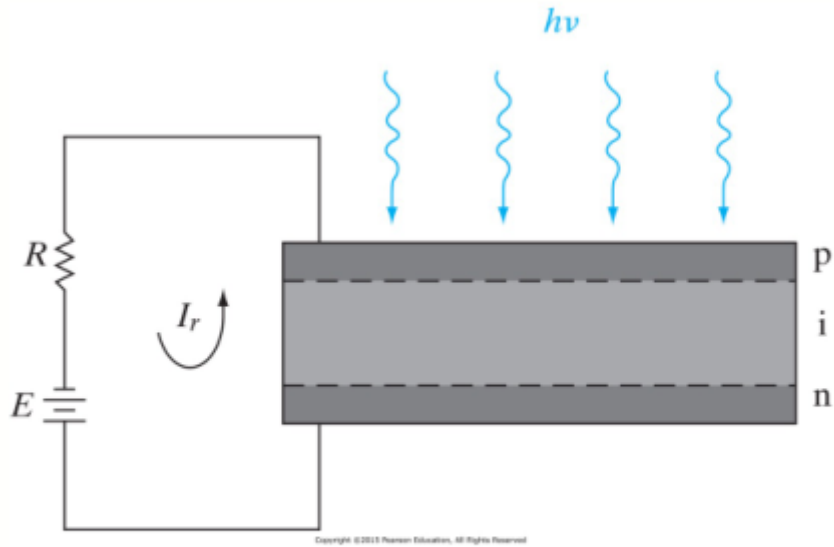


Figure 4: p-i-n 光二极管,i 极宽度约等于是耗尽层宽度,黑暗下电流小,能侦测的波长范围更大

Avalanche Photodiode(雪崩光二极管)

- 具有很高的灵敏度(很大的光电流)

Responsivity(用于衡量光二极管的效能)

$$R = \frac{I_{\text{op}}}{P} (A/W) \quad [3]$$

I_{op} :光电流

P :光照的功率

实际上 Equation 3 是定义式,实际上这个值是由波长等因素决定的,

$$R = \eta \frac{q}{hf} = \eta \frac{\lambda_{\mu m}}{1.23985} \quad [4]$$

η :是量子效率(quantum efficiency).

h 是普朗克常数

Responsivity (Typical Photodetector Characteristic)

Photodetector	Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)
Silicon PN	550-850	0.41-0.7
Silicon PIN	850-950	0.6-0.8
InGaAs PIN	1310-1550	0.85
InGaAs APD	1310-1550	0.80
Germanium	1000-1500	0.70

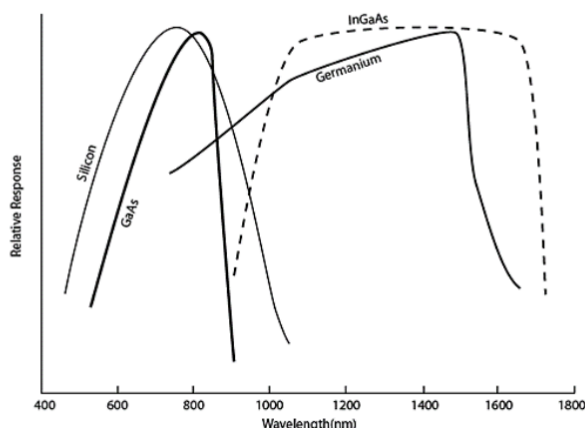


Figure 5: 不同材料对特定的波长响应比较好

$$\eta = \frac{\text{产生的电子-空穴对的数量}}{\text{吸收的光子数量}} \quad [5]$$

无光照电流(dark current)

- 增加反偏电压,能增加 dark current
- Si 的 dark current 比 Ge 的小

工作区(只有两种选择)

A photodiode can be operated in one of two modes:

- Photoconductive (reverse bias)
- Photovoltaic (zero-bias).

Mode selection depends upon the application's speed requirements and the amount of tolerable dark current (leakage current).

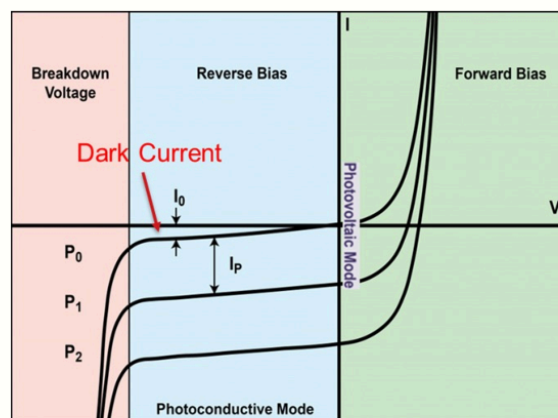


Figure 6: 光二极管的工作区

- Photoconductive(反偏), 电流和光照功率线性相关
- Photovoltaic(零偏置), 有最小的 dark current

LED(Light-Emitting Diode) 发光二极管

发光原理

LED 是由直接带隙晶体管组成, 在 p-n 结的交界处, 电子和空穴复合, 释放出能量, 以光子的形式发射出来, 这种过程称为辐射复合($E_g = hv$)

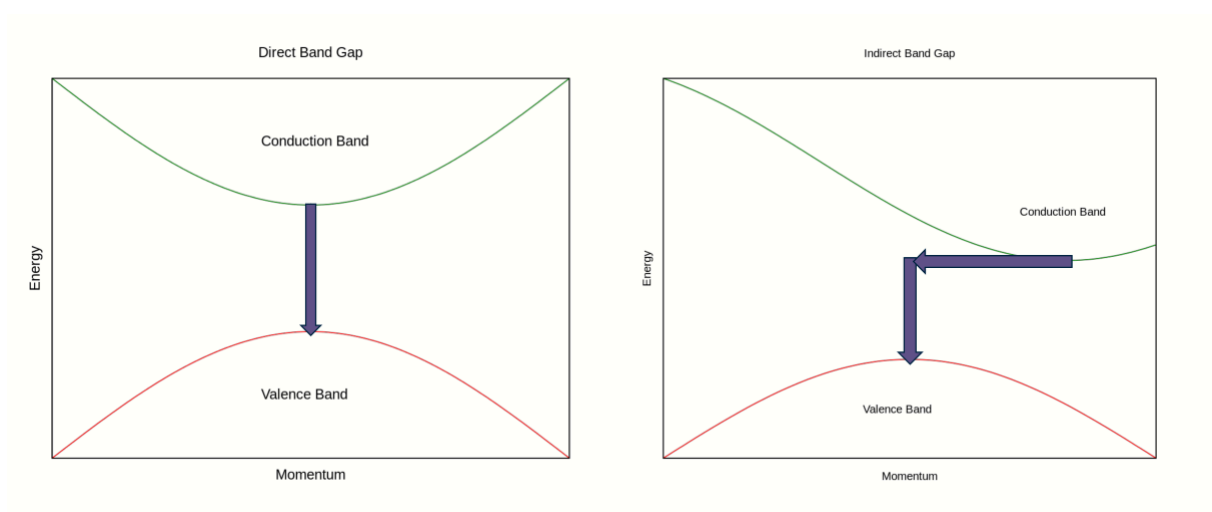


Figure 7: 直接带隙与间接带隙

- Efficiency
- Color Variation
- Longevity
- Instant On/Off
- Directionality
- Compact Size
- Environmental Benefits
- High Reliability

Figure 8: LED 的优点

类型

- Standard Visible LEDs:发出可见光的
- Infrared (IR) LEDs:发出红外线(例如遥控器,夜视仪)
- High-Power LED:发出光的能量特别高,例如航空照明
- RGB LEDs:包括 RGB 三种灯,用于显示各种颜色,例如 LED 屏

Components of a Conventional LED

A conventional LED consists of several key components include:

- Epoxy lens/case
- Wire bond
- Reflective cavity
- Semiconductor die
- Lead frame (anvil and post)
- Flat spot
- Anode and Cathode

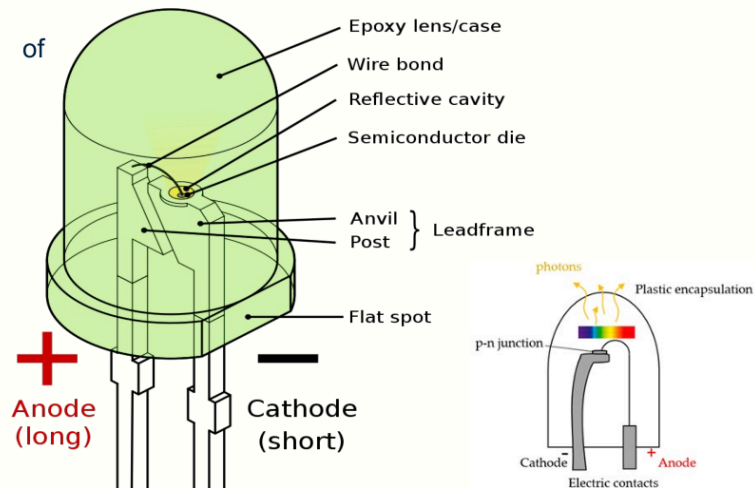


Figure 9: LED 的组成,包括半导体芯片,内反射腔...

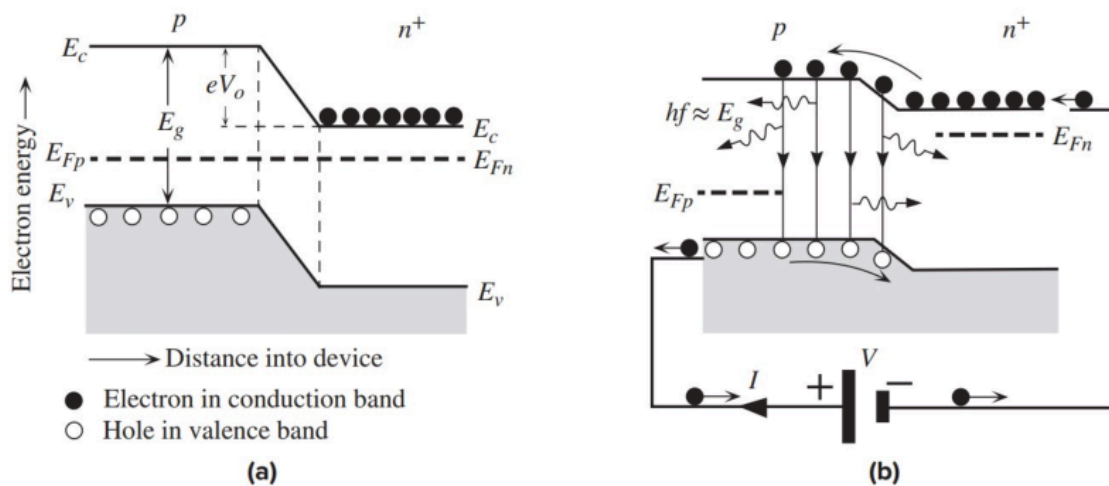


Figure 10: 没有加偏置的时候,P 和 N 区的费米能级是一样大的, 加上了偏置之后, $E_{Fn} - E_{Fp} = eV$ (偏置电压)

LED 的发光方式是 Electroluminescence(由于少数载流子注入导致复合).

- spontaneous photon emission(自发光子发射):由于电子和空穴之间复合过程的统计性质, 发射的光子是随机方向的; 它们是由电子和空穴之间的自发复合过程产生的。

依据材料分类

- Homojunction (同质结) 质结是由同一种半导体材料构成的 p-n 结, 尽管 p 区和 n 区的掺杂浓度不同, 但两边的材料具有相同的能带结构 (即相同的带隙能量 E_g), 复合, 产生光的效率低.
- Heterojunction (异质结): 异质结是由两种不同带隙的半导体材料构成的结区域。例如, GaAs 和 AlGaAs 是常见的组合。
- Double-Heterostructure (DH, 双异质结构)

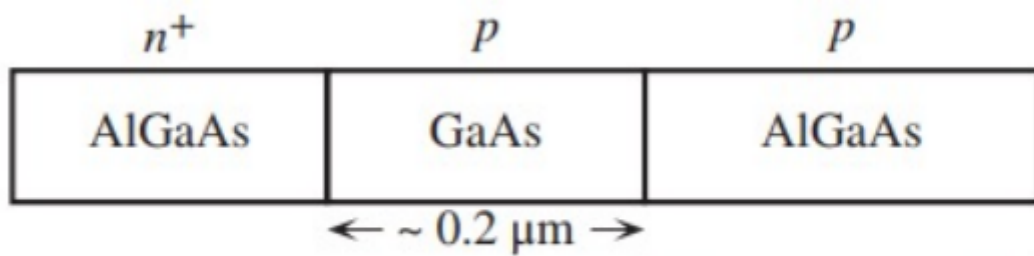


Figure 11: DH, 双异质结构

Quantum Well High Intensity LEDs(量子阱高强度 led)

1. 量子阱的基本结构

- 定义：量子阱是由一个窄带隙半导体材料（例如GaAs，带隙 E_{g1} ）夹在两个宽带隙半导体材料（例如AlGaAs，带隙 E_{g2} ）之间形成的超薄层。
- 尺寸：量子阱层的厚度通常非常薄（小于50 nm），接近电子的德布罗意波长。
- 功能：宽带隙材料充当限制层（Confining Layers），将电子和空穴限制在中间的窄带隙材料内，从而实现更高效的载流子复合和光子发射。

2. 量子化能级

- 量子化现象：
 - 在极薄的量子阱层中，电子的运动被限制在一个方向（通常是x方向）。
 - 由于这种限制，电子的能级不再是连续的，而是离散的，形成量子化的能级（例如 E_1, E_2, E_3 ）。
 - 类似地，空穴也会形成量子化能级（例如 E'_1, E'_2 ）。
- 电子和空穴复合：
 - 带电荷的电子和空穴在最低能级（例如 E_1 和 E'_1 ）复合，释放光子。
 - 光子的能量 $h\nu$ 等于量子阱材料的能级差 $E_1 - E'_1$ 。

Figure 12: 改成最接近的两个能级处复合

通过改变量子阱的厚度和材料组成,LED 的波长可以改变.

发光材料

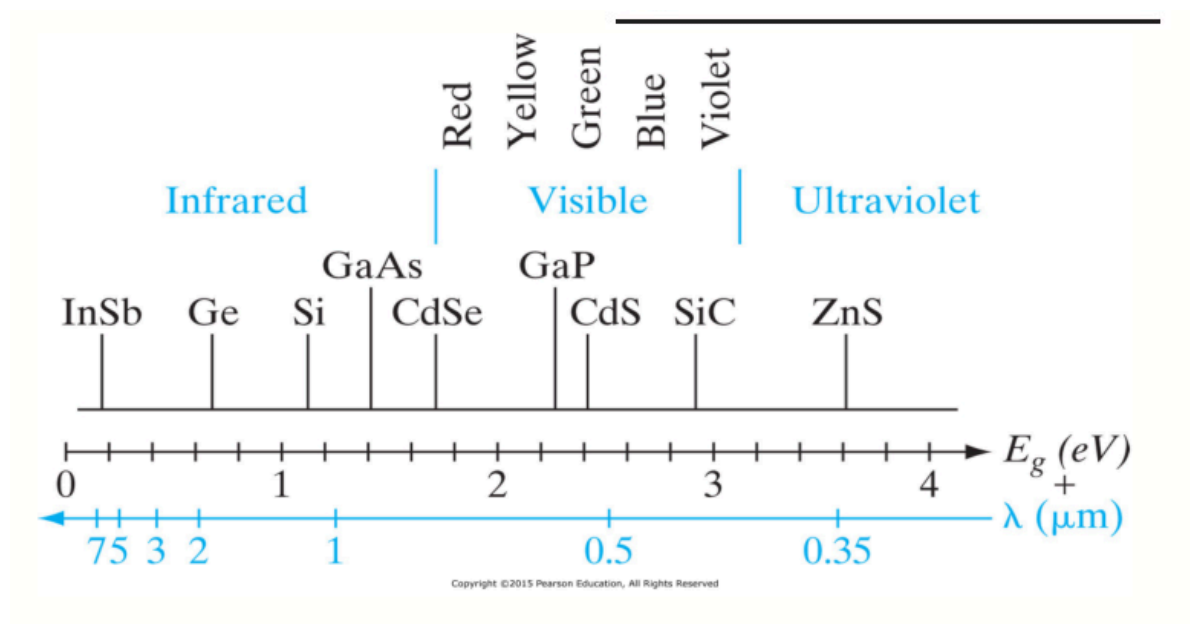


Figure 13: 材料和波长

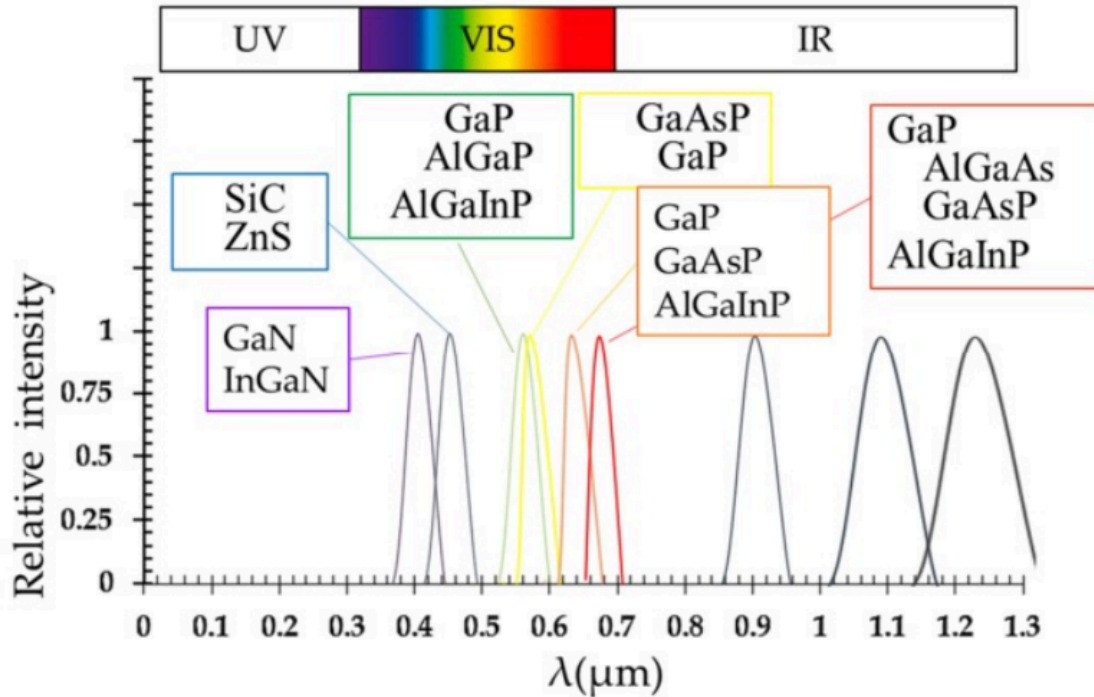


Figure 14: 材料的发射光谱,平均波长越小的材料,越窄
要获得可见光,带隙要大于 $1.8eV$ (基本公式: $E_g = hv = h\frac{c}{\lambda}$)

Quantum Efficiency(量子效率)

$$\eta_{EQE}(\text{外部量子效率}) = \eta_{IQE}(\text{内部量子效率})\eta_{EXT}(\text{萃取效率}) \quad [6]$$

$$\eta_{IQE} = \frac{\text{激发区域单位时间发出的光子数目}}{\text{激发区域注入的电子数目}} \quad [7]$$

$$\eta_{EXT} = \frac{\text{单位时间内进入外部自由空间的光子数目}}{\text{激发区域单位时间发出的光子数目}} \quad [8]$$

Light Escape Cone in LED(避光锥)

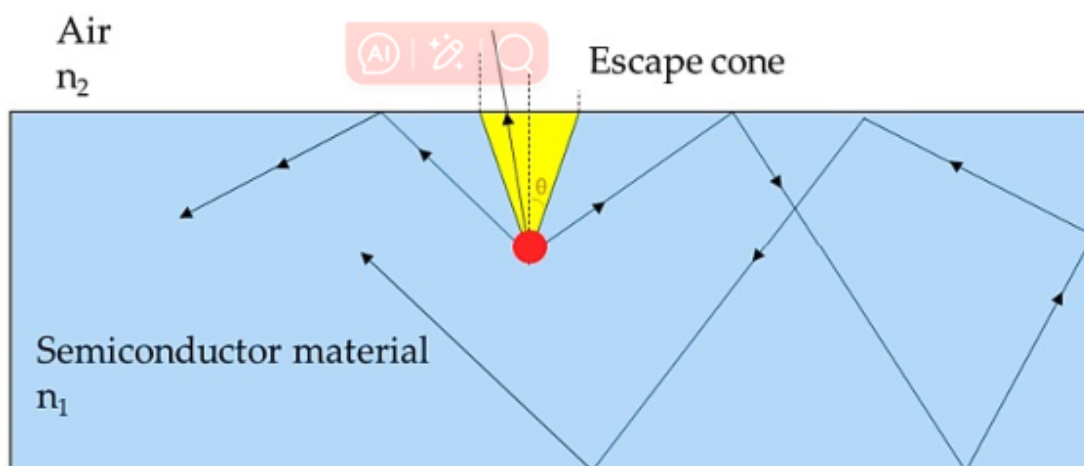
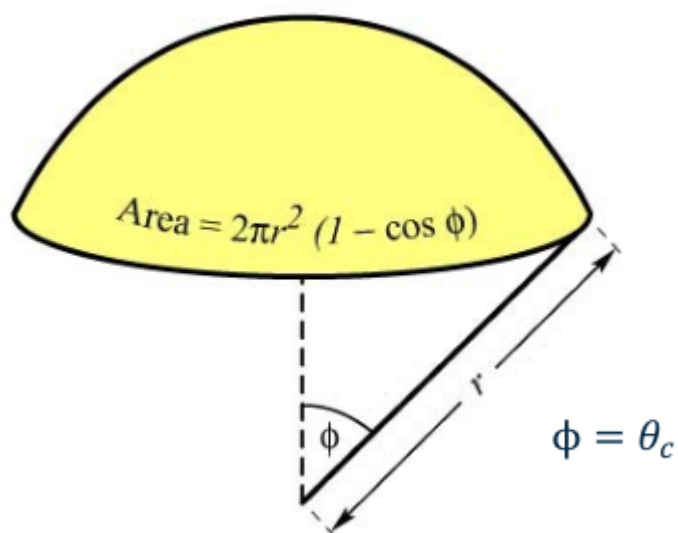


Figure 15: 入射角必须少于避光锥的角度,才能避免全反射,有机会折射入外部

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad [9]$$



$$\text{Area} = 2\pi^2(1 - \cos \theta_c) \quad [10]$$

可以逃逸的比例,用表面积计算: $= \frac{2\pi^2(1 - \cos \theta_c)}{4\pi r^2} = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta_c)$ [11]

由于半导体材料的反射率大,能逃逸的比例很小,一半会加一个 $n = 1.5$ 的塑料封装.

Solar Cells

大多数太阳能电池使用晶体硅,因为硅基半导体制造现在是一种成熟的技术,可以制造出具有成本效益的设备。(效率 18%:多晶硅,22-24%:单晶硅),都是 homojunctions.

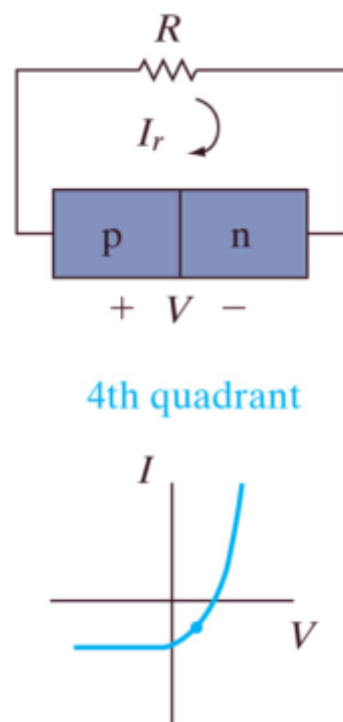


Figure 16: 就是再这种情况下才能把光能转换为电能

发电原理

n 区是狭窄而且重参杂的, guang

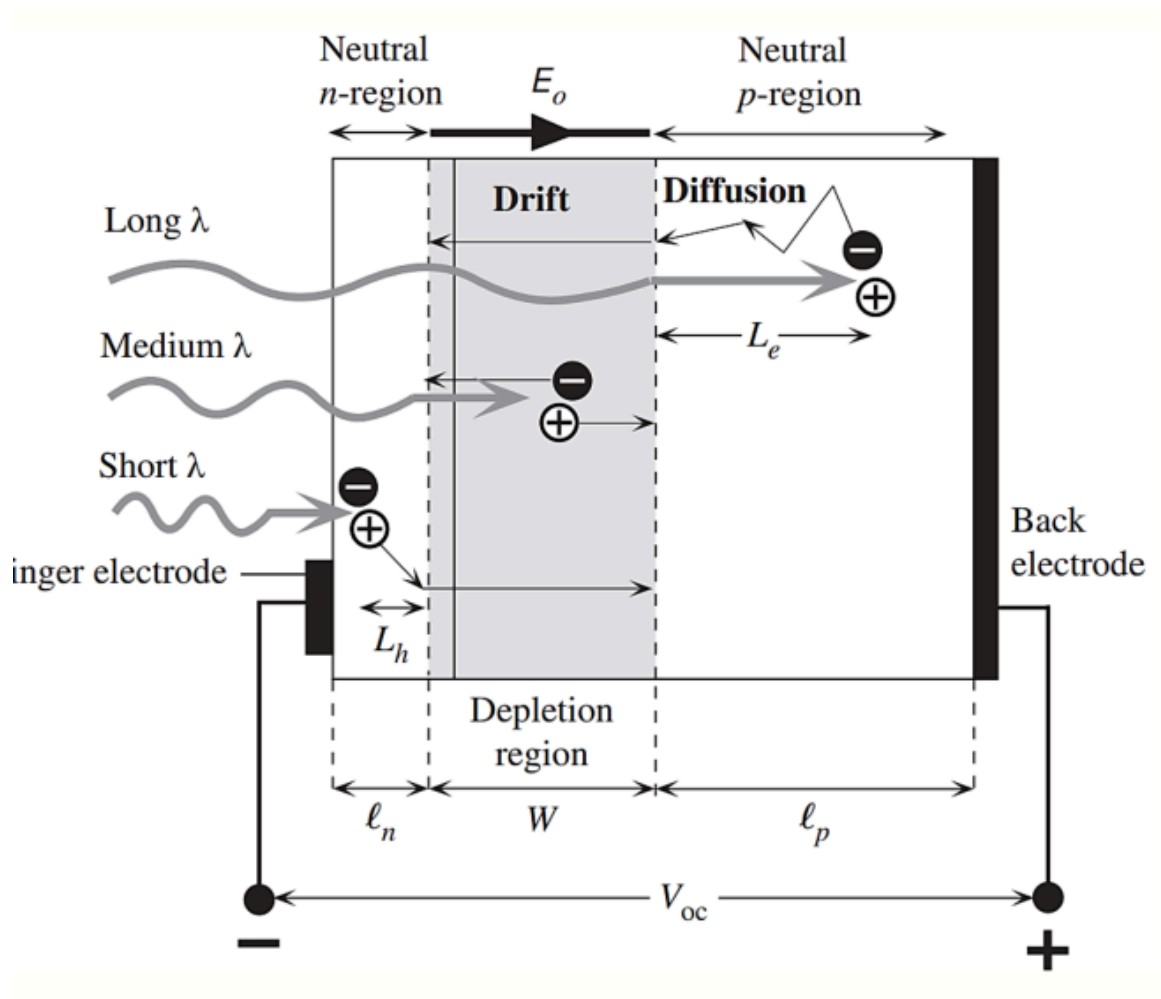


Figure 17: 发电原理

- 当光线（太阳光）照射到太阳能电池时，不同波长的光会穿透不同深度：
 - **短波长光 (短 λ)**：在靠近n区表面被吸收，产生电子-空穴对。
 - **中波长光 (中 λ)**：在p-n结附近被吸收。
 - **长波长光 (长 λ)**：可以深入p区，被吸收后产生载流子。
- 被光子吸收后，半导体内的电子从价带跃迁到导带，留下一个空穴，形成**电子-空穴对**。

Figure 18: 发电原理

由于 n 侧非常窄，大部分光子在耗尽区和 p 区被吸收, 再耗尽区产生的电子-空穴对立即被 内建电场分离,

电极设计

连接到 n 侧的电极必须允许照明进入器件，同时具有小的电阻, 一般采用指状电极设计，它们排列成细长条状，并覆盖 n 区的表面。

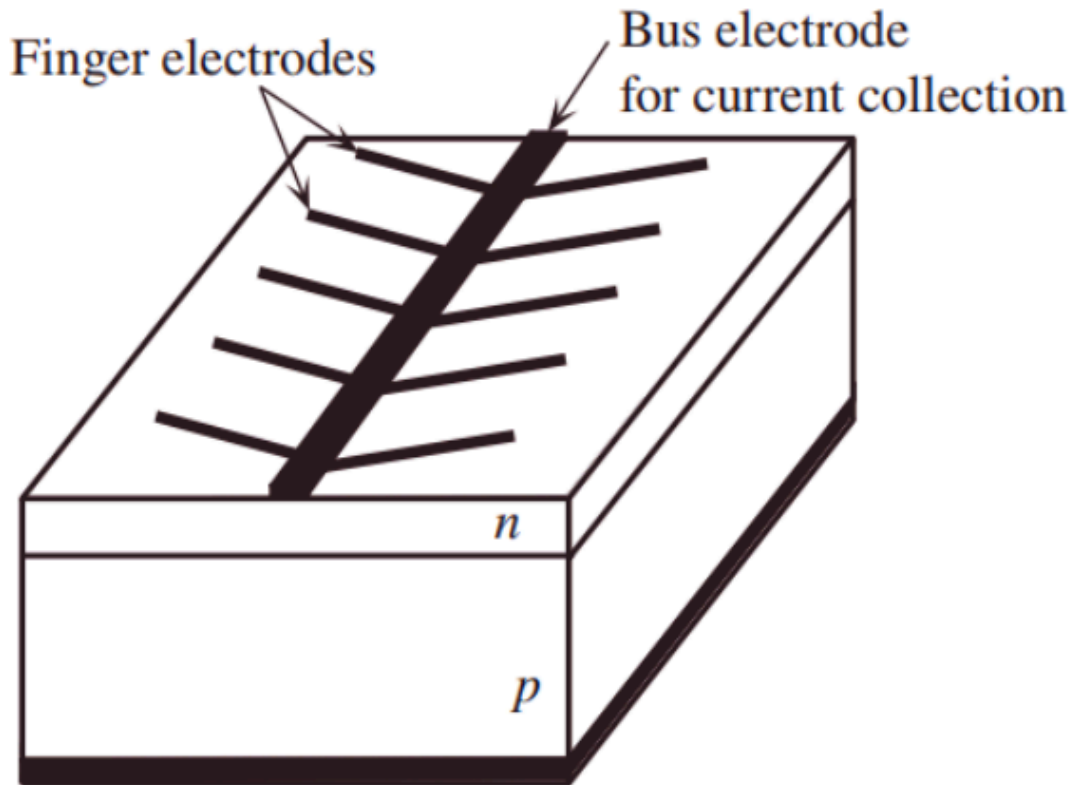


Figure 19: 指纹电极设计

Antireflective Layer(抗反射涂层)

主要用于减少光的反射损失，提高光的透射，从而增加进入半导体的光量，提升光电转换效率。位于半导体材料和空气之间。

light transmitted to the semiconductor.

- To compute amount of **reflectivity (R)**, the parameters below are defined:

n_0, n_1 , and n_2 are refractive index

d_1 : thickness of n_1 (nm)

λ : wavelength of light (nm)

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2\pi \cos 2\theta^\circ}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2\pi \cos 2\theta^\circ}$$

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$\theta = \frac{2\pi \cdot n_1 \cdot d_1}{\lambda}$$

(need to convert to degree)

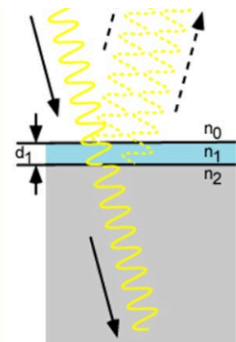


Figure 20: 反射光强占入射光强的比例

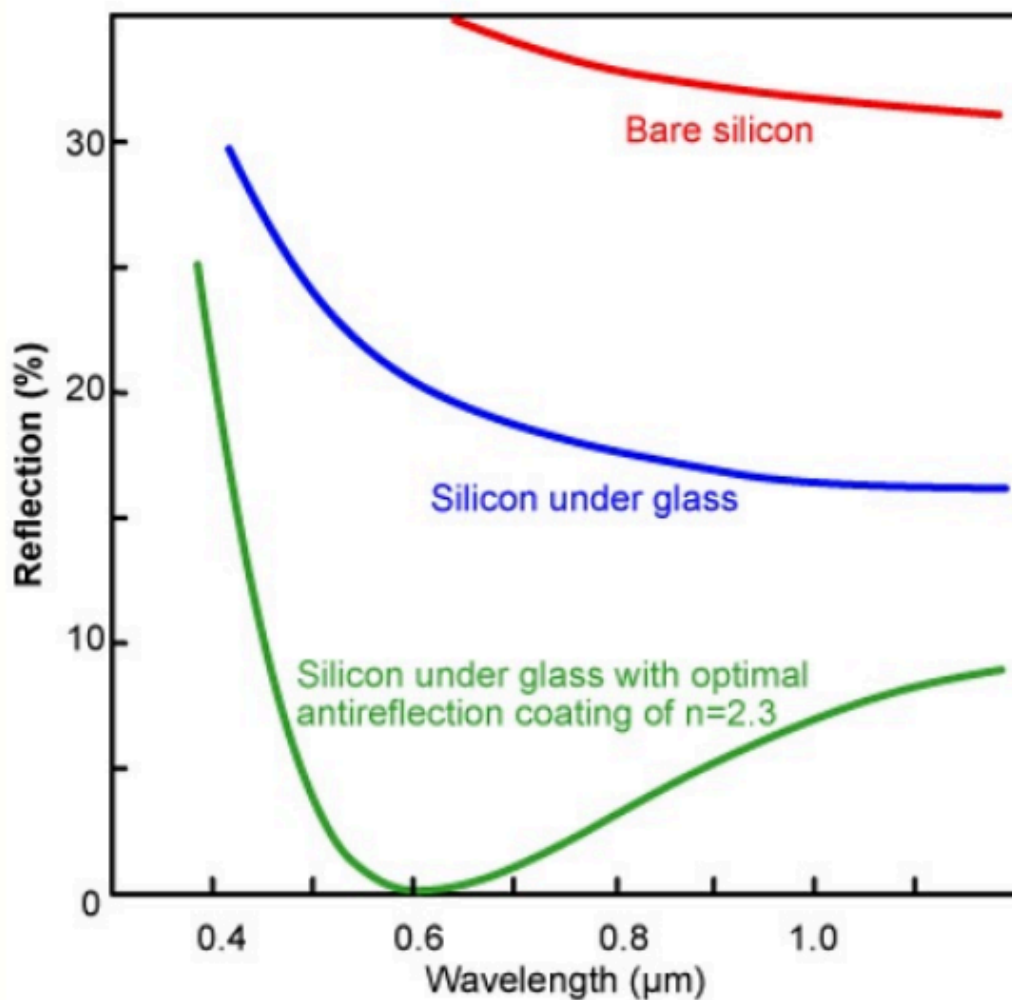


Figure 21: 0.6 微米是太阳光功率最大的波长,要设计为这个波长的反射率最低

小面积芯片产生的能量比较小, 要提高表面积. 光伏电池以串联和/或并联电路连接, 以产生更高的电压、电流和功率水平, 光伏组件由密封在环保层压板中的光伏电池电路组成, 是光伏系统的基本组成部分. 规模较小的称为 Panel, 较大的叫做 Array.

- 分类

- ▶ Monocrystalline Silicon Solar Cells(单晶硅太阳能电池片,更加高效 [包括空间占用高效],但是成本更高)
- ▶ Polycrystalline Silicon Solar Cells(多晶硅太阳电池)
- ▶ Thin-Film Solar Cells(薄膜太阳能电池,虽然薄,可以变形,但是效率比晶体硅低)

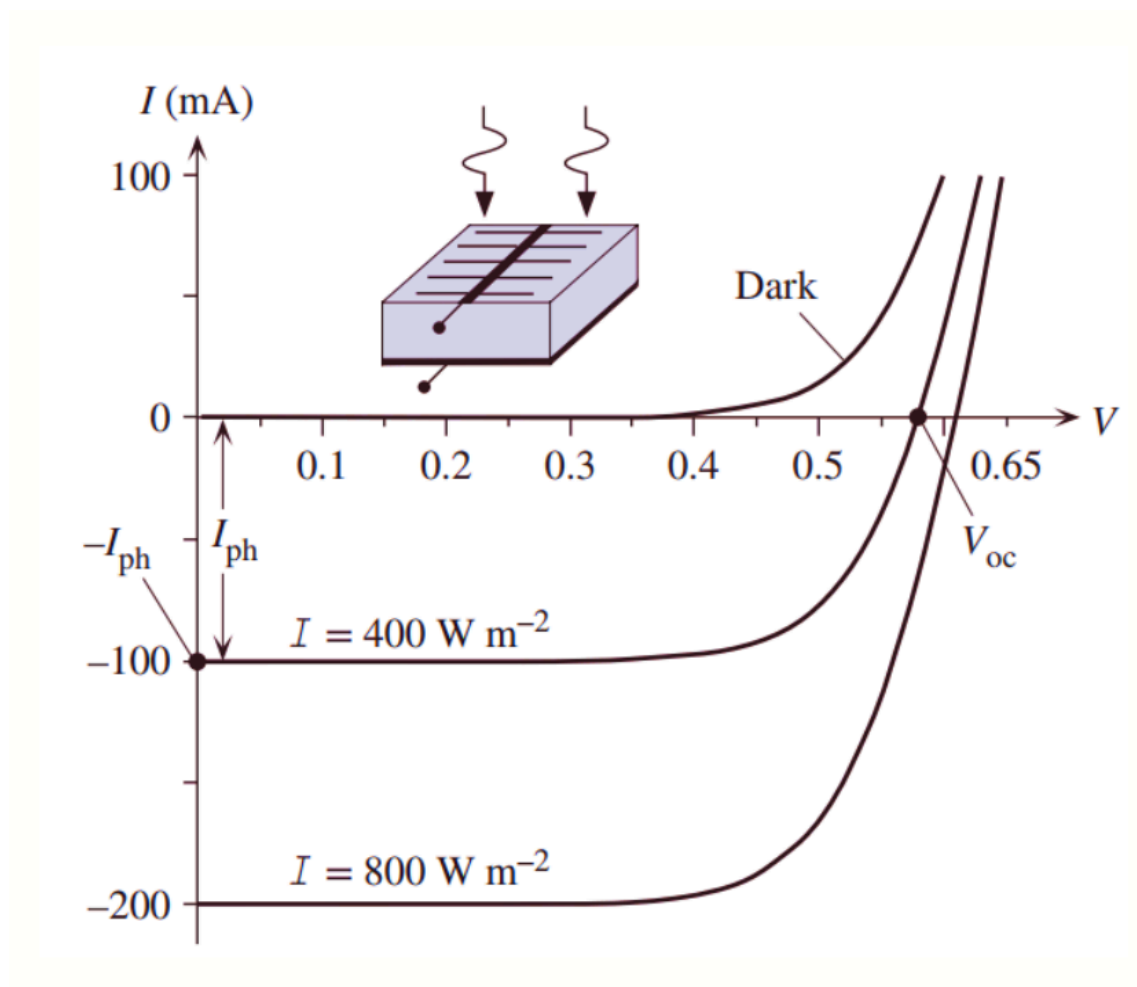


Figure 22: 在不同的光照条件下的 I-V 曲线, I_{ph} :短路电流, V_{oc} :开路电压

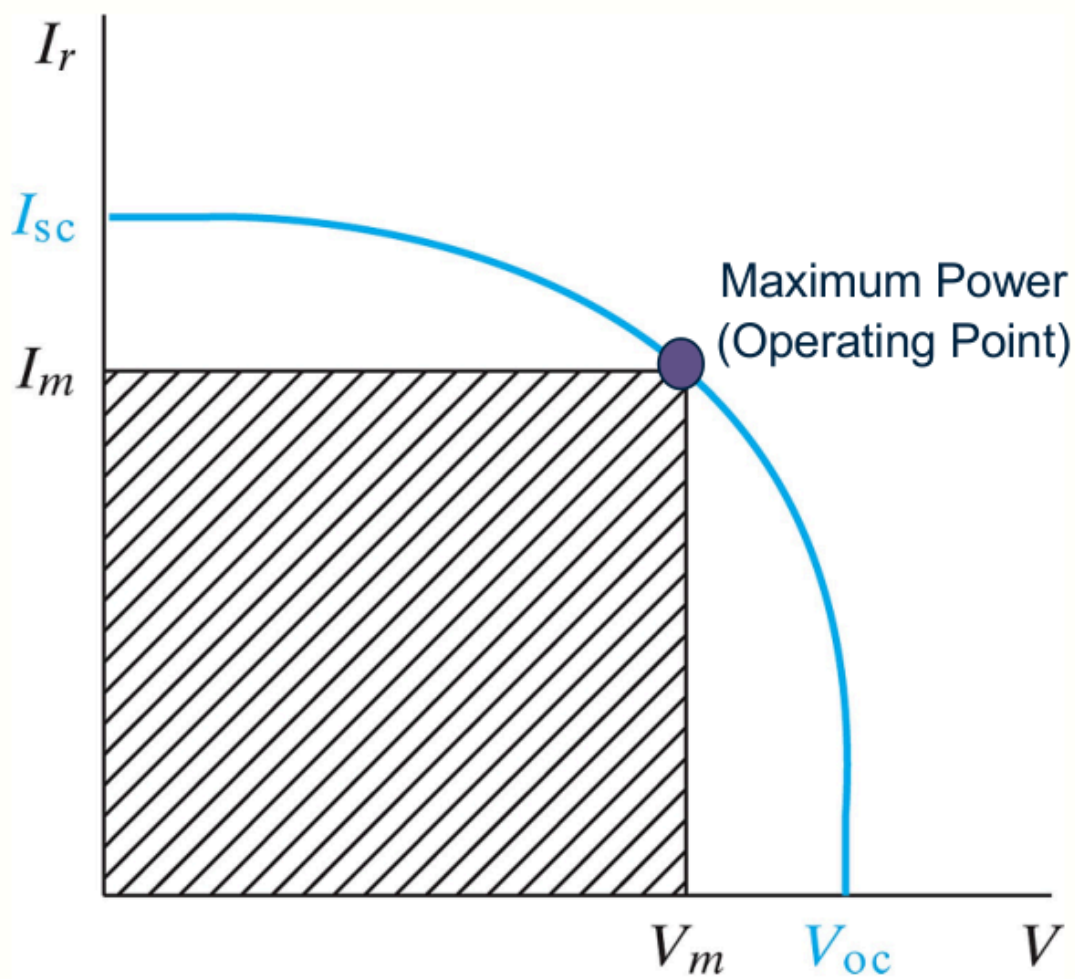


Figure 23: 换个方向画,可以找到功率最大的点

最大功率矩形面积占 V_{oc}, I_{sc} 面积叫做 fill factor FF

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad [12]$$

如果 I-V 曲线越接近矩形,就越理想,这个 FF 就是衡量这个的