

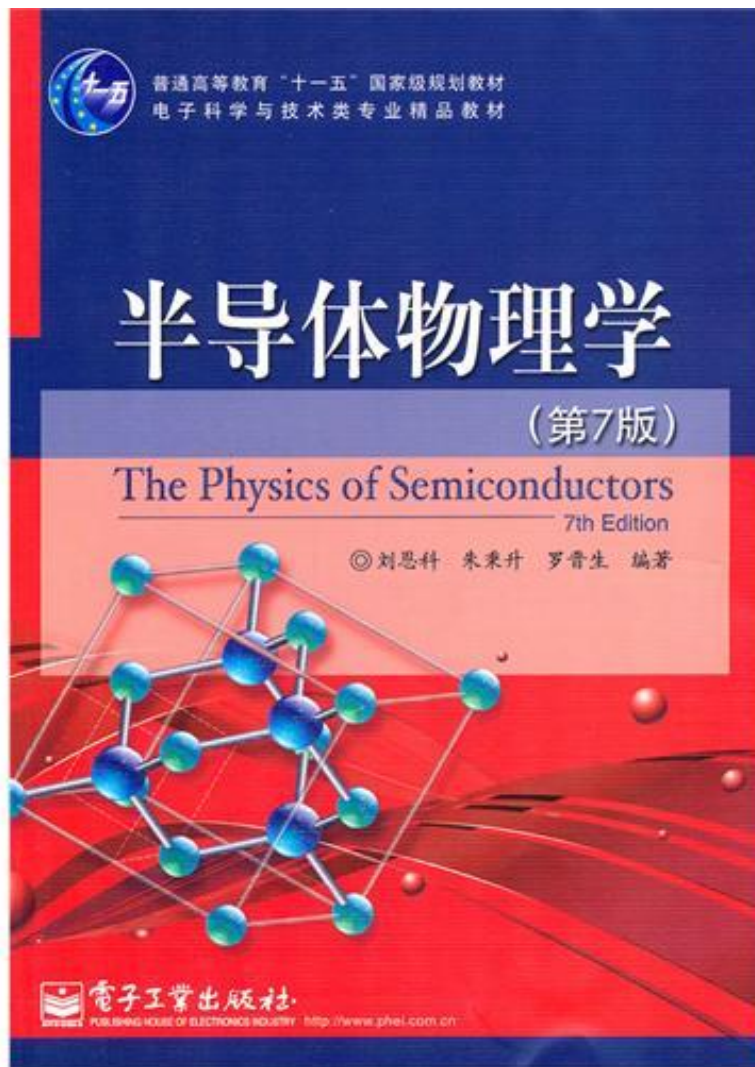
华中科技大学光学与电子信息学院本科教学

半导体物理（电子16级）

姜胜林、刘欢、张光祖

2018. 10





1

半导体中的电子状态

2

半导体中载流子的统计分布

3

载流子输运与导电

4

非平衡载流子

5

p-n结

6

金属和半导体的接触

7

半导体表面与MIS结构

8

半导体异质结

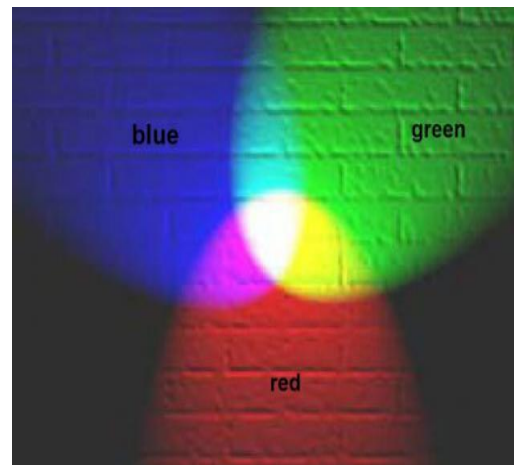
9

半导体的光、热、磁效应

2014年诺贝尔物理学奖——蓝光LED



Shuji Nakamura Hiroshi Amano Isamu Akasaki



RGB三色LED：白光照明

赤崎勇，天野浩，中村修二：“发明了高效的蓝色发光二极管”

LED物理基础：非平衡载流子



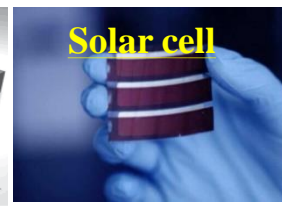
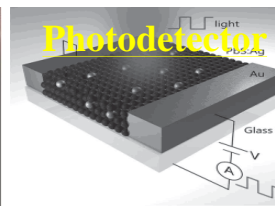
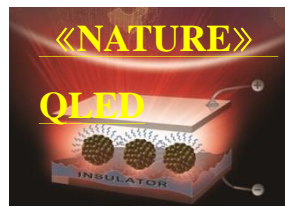
非平衡载流子的 基本性质及其运动规律 (产生、运动、复合)

很多半导体器件工作原理的基础
半导体物理重要内容之一

重要的半导体特性

二极管整流
晶体管的放大
光电导
光伏
发光

.....



学习内容与目标

01

非平衡状态

- 掌握概念及定义

02

非平衡载流子的产生

- 掌握光电效应的物理本质

03

非平衡载流子的复合

- 了解LED发光原理

学习内容与目标

01

非平衡状态

- 掌握概念及定义

02

非平衡载流子的产生

- 掌握光电效应的物理本质

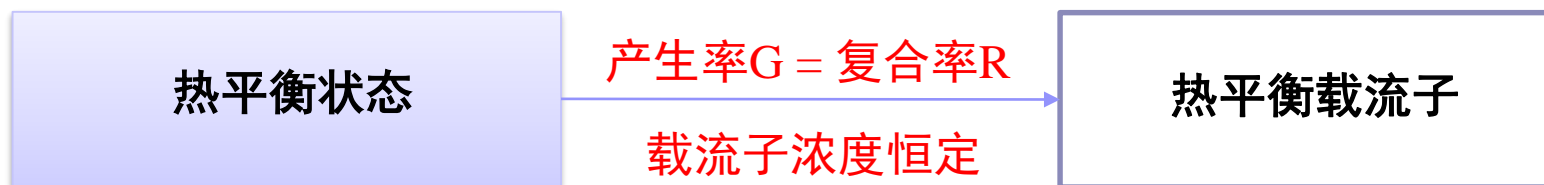
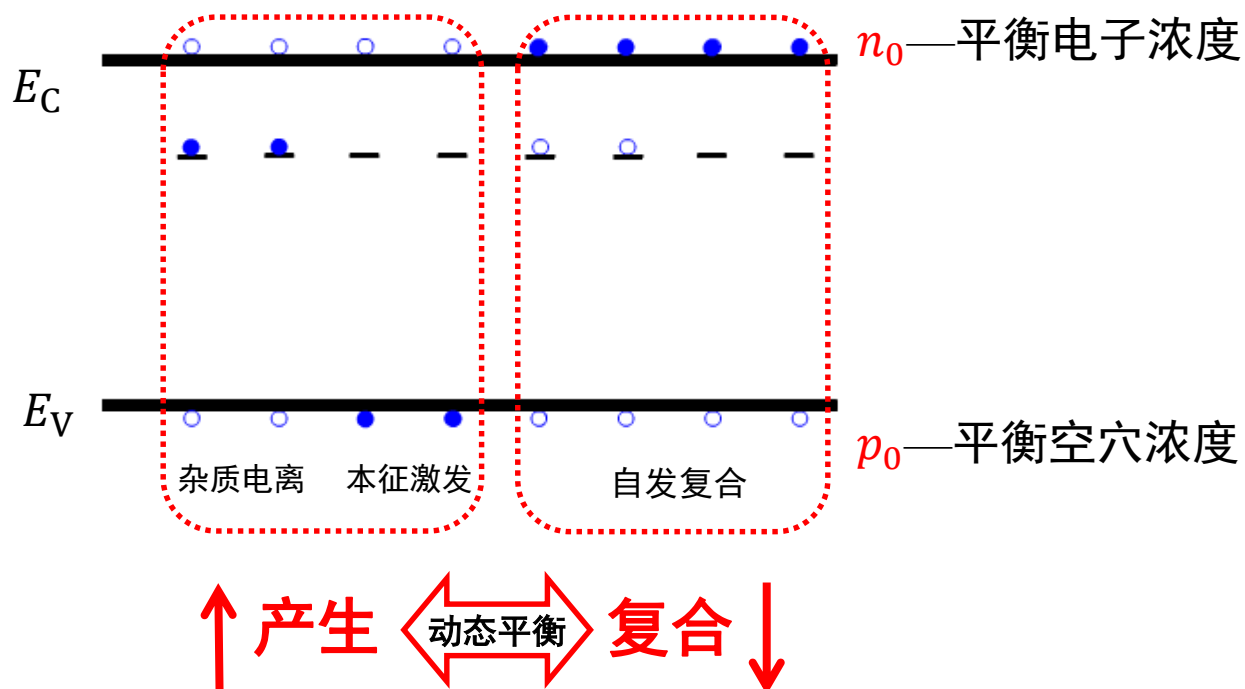
03

非平衡载流子的复合

- 了解LED发光原理

回顾——热平衡状态与热平衡载流子

热平衡载流子运动示意图



在任何时候半导体都会保持热平衡状态吗？

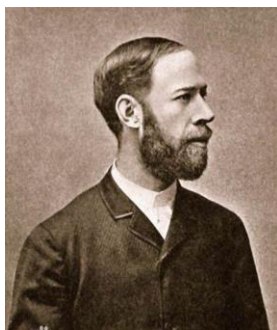
半导体的热平衡状态是相对的、有条件的！



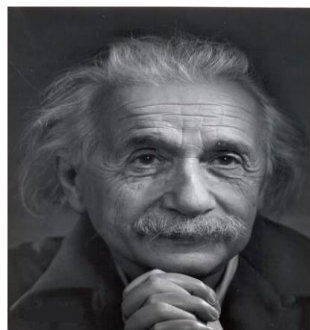
外界作用（例如合适波长的光照）可以破坏热平衡状态

非平衡状态：平衡条件被破坏而处于与热平衡态相偏离的状态

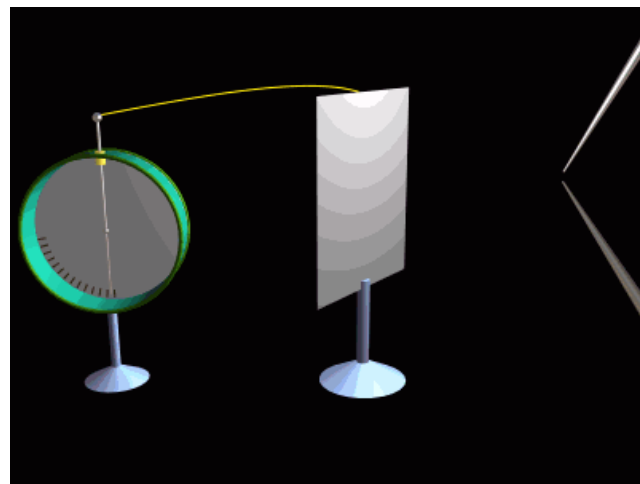
典型的非平衡状态实例——光电效应



Heinrich Rudolf Hertz



Albert Einstein



爱因斯坦提出光量子假说, 成功解释了光电效应, 获1921年诺贝尔物理学奖

学习内容与目标

01

非平衡状态

- 掌握概念及定义

02

非平衡载流子的产生

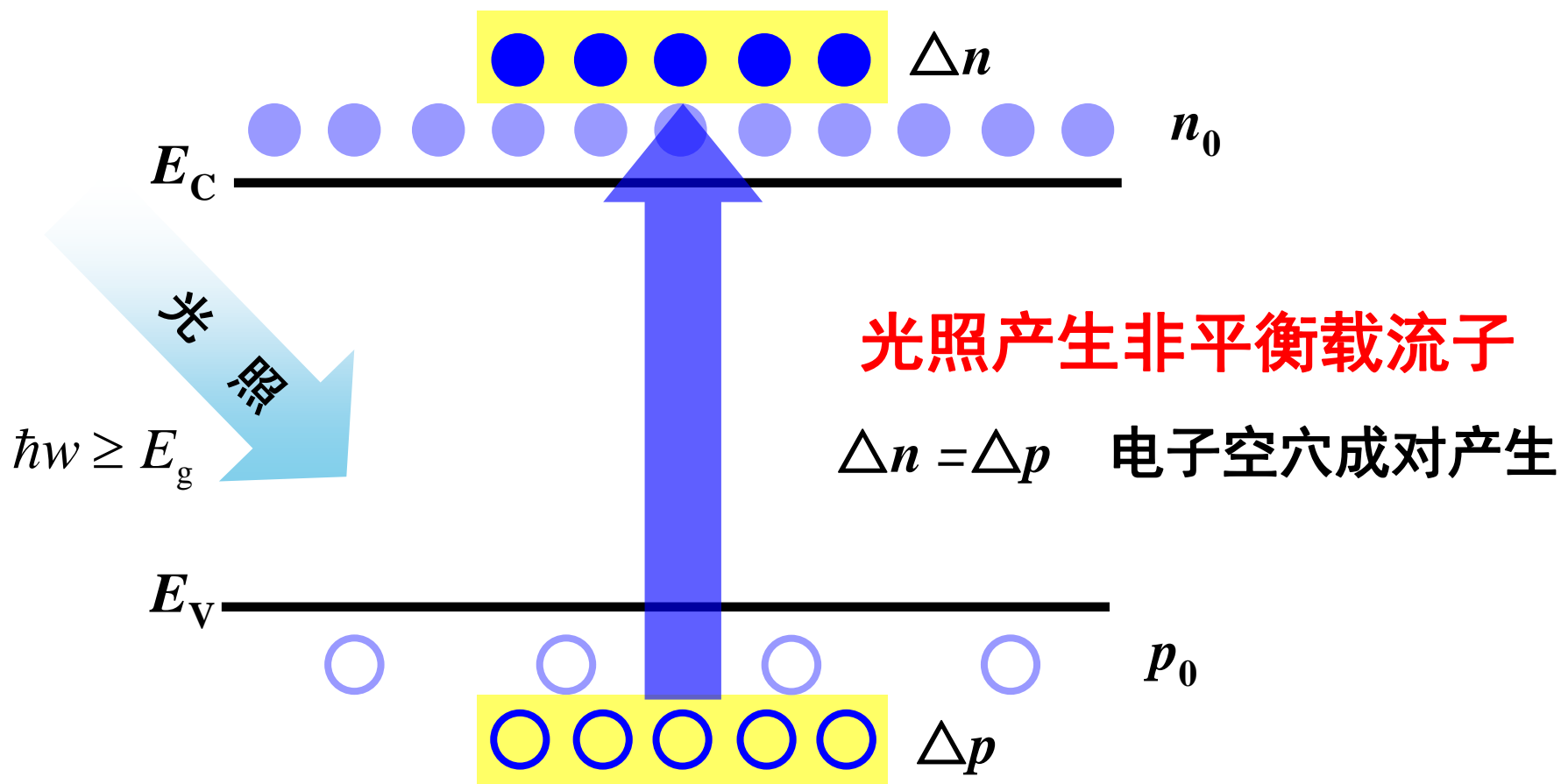
- 掌握光电效应的物理本质

03

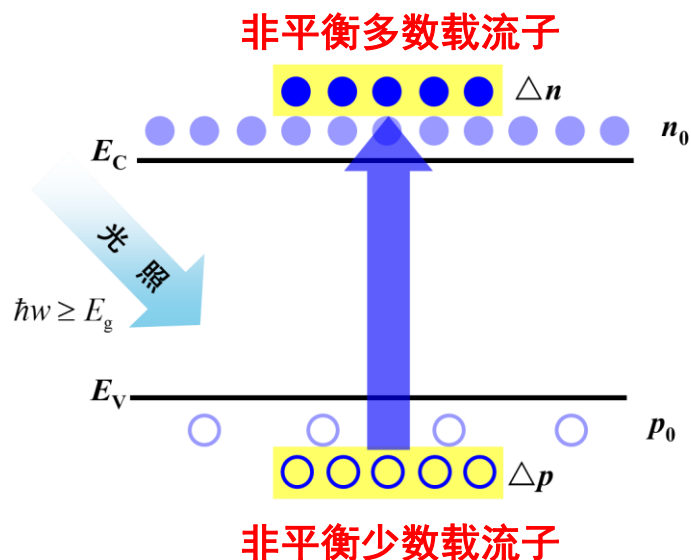
非平衡载流子的复合

- 了解LED发光原理

非平衡载流子的产生（产生率 $G >$ 复合率 R ）



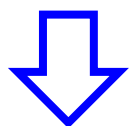
非平衡载流子：比平衡状态多出来的载流子（excess carriers）



非平衡载流子浓度

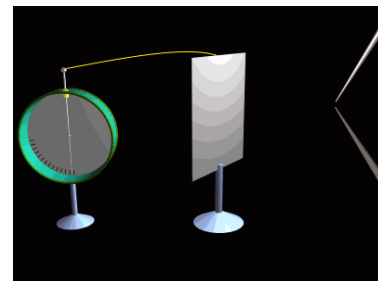
$$\begin{cases} \Delta n = n - n_0 \\ \Delta p = p - p_0 \end{cases}$$

n 、 p 表示非平衡状态时载流子浓度
 n_0 、 p_0 表示热平衡状态时载流子浓度



光注入：载流子浓度增大，电导率增大，产生光生电流

光电效应



说明：

- ① 一般情况下，注入的非平衡载流子浓度比平衡时的多数载流子浓度要少得多。以光注入为例：

$$\Delta n (= \Delta p) \ll n_0 \text{ (n型)}$$

$$\Delta p (= \Delta n) \ll p_0 \text{ (p型)}$$

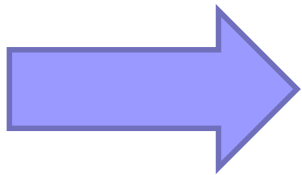
满足此条件的注入称为小注入。反之，称为大注入。

小注入对载流子浓度的影响小： Yes or No?

小注入对载流子浓度的影响

小注入的典型例子

- 掺杂浓度为 10^{16}cm^{-3} 的n型硅 ($n_0=10^{16}\text{cm}^{-3}$)
- 注入的非平衡载流子浓度 $\Delta n = \Delta p = 10^{10}\text{cm}^{-3}$



平衡时少数载流子（空穴）的浓度

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 2.25 \times 10^4 \times \text{cm}^{-3}$$

$$\Delta p \gg p_0$$

少子的浓度增大
6个量级

说明：小注入能显著影响少数载流子的浓度

因此非平衡**少数载流子**的影响就显得更为重要
通常说的非平衡载流子一般都是指**非平衡少数载流子**



“多数载流子”



“非平衡载流子”



“少数载流子”

学习内容与目标

01

非平衡状态

- 掌握概念及定义

02

非平衡载流子的产生

- 掌握光电效应的物理本质

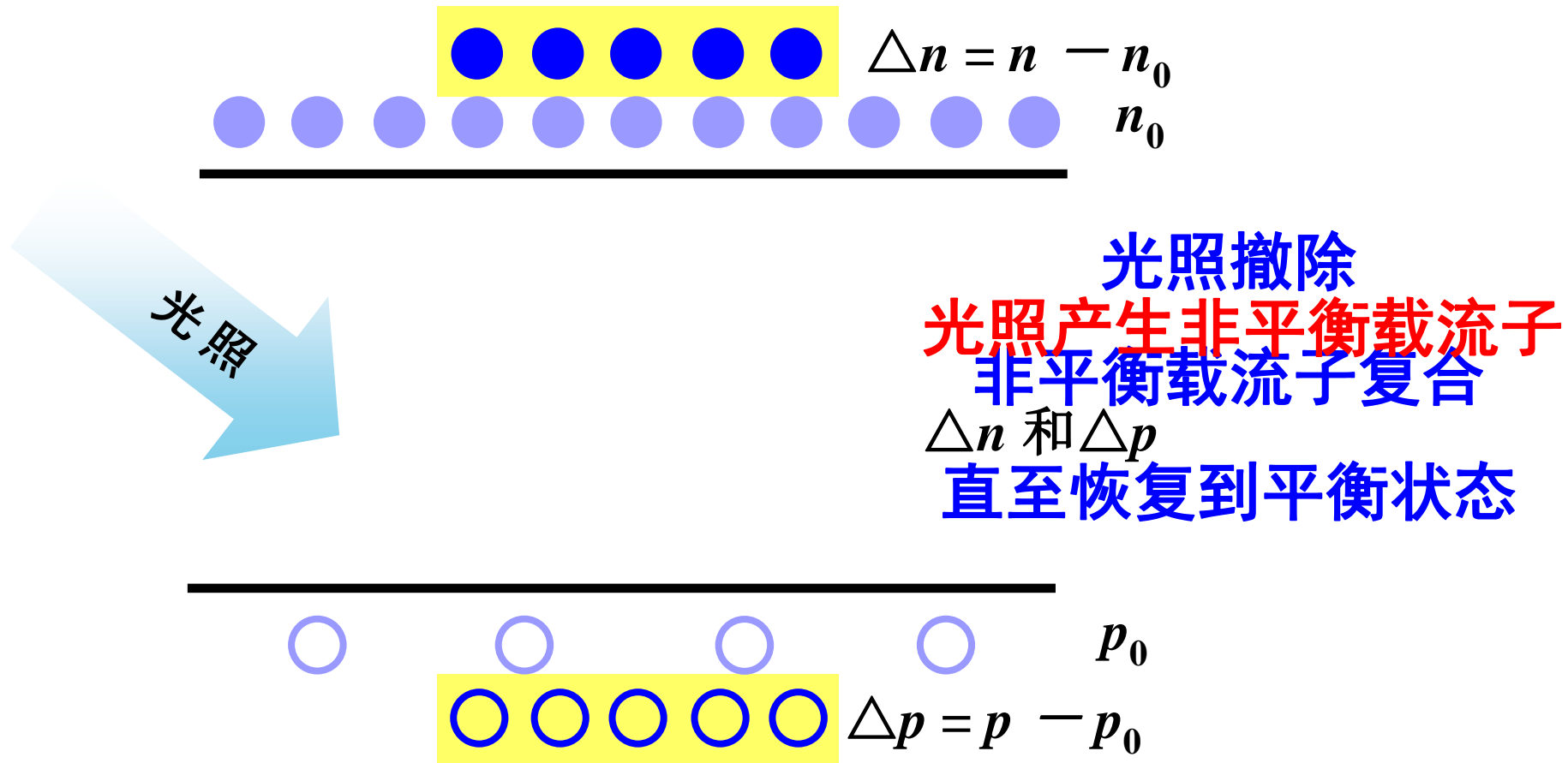
03

非平衡载流子的复合

- 了解LED发光原理

非平衡载流子的复合（复合率 $R >$ 产生率 G ）

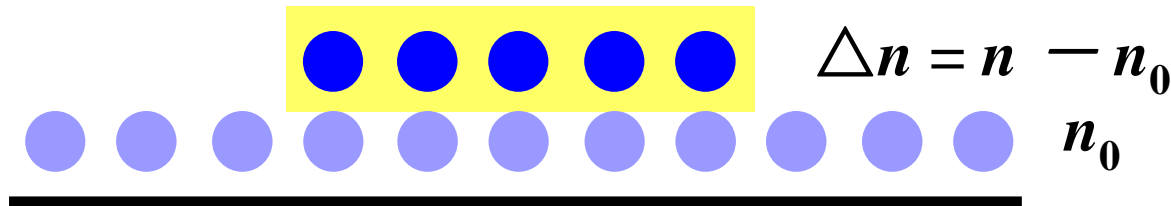
思考：光照停止时，半导体将发生什么变化？



LED发光二极管的物理基础

辐射复合：以发射光子的形式释放出多余的能量

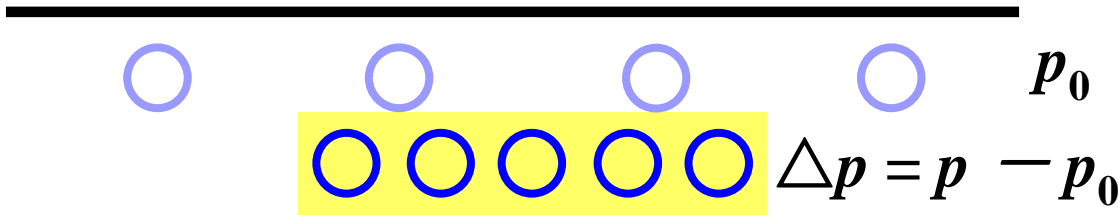
Radiative Recombination



发光



发光颜色受禁带宽度影响！



研究前沿：量子点发光二极管（课外阅读）

nature International weekly journal of science

Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Authors

Archive > Volume 515 > Issue 7525 > Letters > Article

NATURE | LETTER

日本語要約

Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots

Xingliang Dai Zhenxing Zhang Yizheng Jin Yuan Niu Hujia Cao Xiaoyong Liang Liwei Chen
Jianpu Wang Xiaogang Peng

[Affiliations](#) | [Contributions](#) | [Corresponding authors](#)

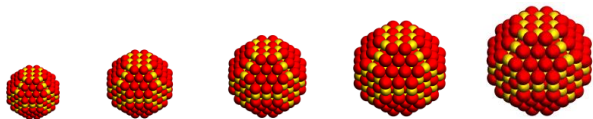
Nature **515**, 96–99 (06 November 2014) | doi:10.1038/nature13829
Received 09 May 2014 | Accepted 29 August 2014 | Published online 29 October 2014



改变量子点的尺寸



调控禁带宽度、发光颜色



物理基础：量子限域效应



中华人民共和国科学技术部

Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China

[微博微信](#) | [English](#) | [公务邮箱](#) | [加入收藏](#)



站内搜索

[首页](#) | [组织机构](#) | [新闻中心](#) | [信息公开](#) | [科技政策](#) | [科技计划](#) | [办事服务](#) | [公众参与](#) | [专题专栏](#)

当前位置: 科技部门户 > 新闻中心 > 科技动态 > 科技部工作

www.most.gov.cn

【字体: 大 中 小】

战略性先进电子材料重点专项—“量子点发光显示关键材料与器件研究”项目启动会在杭州召开

日期: 2016年11月24日

来源: 科技部

2016年10月26日, 2016年国家重点研发计划战略性先进电子材料重点专项—“量子点发光显示关键材料与器件研究”项目启动会在浙江大学召开。项目牵头单位浙江大学相关领导、项目负责人及各课题负责人、项目咨询专家、科技部高技术中心相关人员等30余人参加了会议。

“量子点发光显示关键材料与器件研究”项目拟利用我国研发QLED的先发优势、量子点材料合成与配体化学的国际领先地位, 建立喷墨打印制造主动矩阵-QLED (AM-QLED) 显示屏这一全新的技术路线, 夯实全产业链科学基础, 打造源头创新自主知识产权体系, 使我国显示行业占据科技制高点, 进而实现“换道超车”, 形成QLED创新产业群。

会议由浙江大学科学技术研究院副院长史红兵主持, 浙江大学副校长严建华表示浙江大学会与各单位一起齐心协力、迎难而上、精心规划、倾心建设, 共同实现项目的总体目标。科技部高技术研究发展中心相关人员介绍了“战略性先进电子材料”重点专项2016年度部署和立项情况、专项管理规则流程以及执行过程中常见的问题, 对项目管理、质量管控、宣传、经费使用以及咨询专家职能等方面提出了新的要求和建议。

Tandem colloidal quantum dot employing a graded recombination layer

Xihua Wang^{1†}, Ghada I. Koleilat^{1†}, Jiang Tang¹, **Huan Liu^{1,2}**, Illan Lukas Brzozowski¹, D. Aaron R. Barkhouse¹, Larissa Levina¹, Sjoerd Hoogland¹, and Edward H. Sargent^{1*}

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 8 JUNE 2014 | DOI: 10.1038/NMAT4007

Air-stable n-type colloidal quantum dot solids

Zhi-Jun Ning¹, Oleksandr Voznyy¹, Jun Pan², Sjoerd Hoogland¹, Valerio Adinolfi¹, Jixian Xu¹, **Min Li³**, Ahmad R. Kirmani², Jon-Paul Sun⁴, James Minor¹, Kyle W. Kemp¹, Haopeng Dong¹, Lisa Rollny¹, André Labelle¹, Graham Carey¹, Brandon Sutherland¹, Ian Hill⁴, Aram Amassian², **Huan Liu³**, Jiang Tang⁵, Osman M. Bakr² and Edward H. Sargent^{1*}

Chemiresistive gas sensors employing solution-processed metal oxide quantum dot films

Huan Liu, Songman Xu, Min Li, Gang Shao, Huaibing Song, Wenkai Zhang, Gao, Haisheng Song, and Jiang Tang

新型半导体材料——量子点

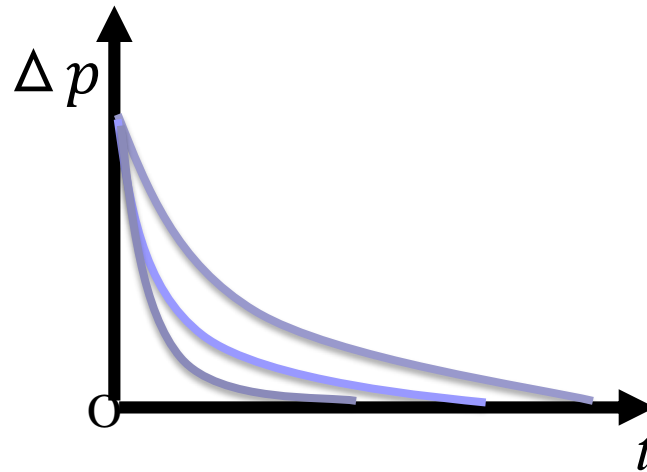
Sensitive Room-Temperature H₂S Gas Sensors Employing SnO₂ Quantum Wire/Reduced Graphene Oxide Nanocomposites

Zhilong Song, Zeru Wei, Baocun Wang, Zhen Luo, Songman Xu, Wenkai Zhang, Haoxiang Yu, Min Li, Zhao Huang, Jianfeng Zang, Fei Yi, and **Huan Liu***

Physically Flexible, Rapid-Response Gas Sensor Based on Colloidal Quantum Dot Solids

Huan Liu, Min Li, Oleksandr Voznyy, Long Hu, Qiuyun Fu,* Dongxiang Zhou, Zhe Xia, Edward H. Sargent, and Jiang Tang*

非平衡载流子寿命 τ



非平衡载流子的浓度随时间衰减

实验表明：非平衡载流子在外界激励消失后可以存在一定时间
非平衡载流子的平均生存时间称为**寿命** (τ)

思考：寿命如何测量？哪些因素决定寿命长短？

4. 寿命的测量 (直流光电导衰减法)

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

光注入非平衡载流子 $\Delta n = \Delta p$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$\sigma = (n_0 + \Delta n)q\mu_n + (p_0 + \Delta p)q\mu_p$$

$$= (n_0q\mu_n + p_0q\mu_p) + (\Delta nq\mu_n + \Delta pq\mu_p)$$

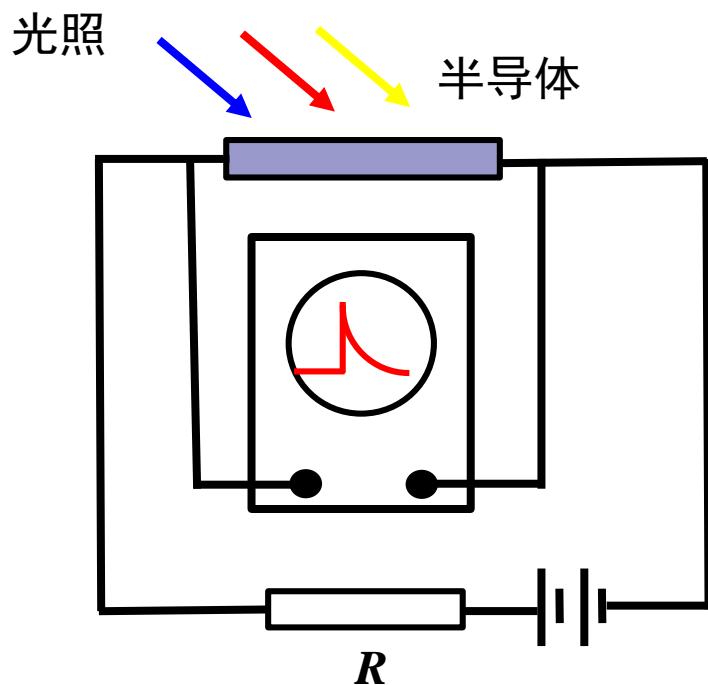
$$\sigma_0$$

平衡 (暗) 电导

$$\Delta\sigma = \Delta pq(\mu_n + \mu_p)$$

附加电导

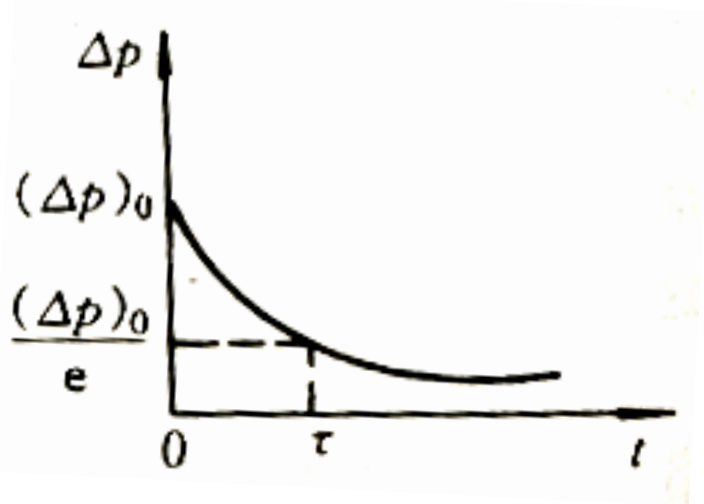
直流光电导衰减法测少子寿命



- 串联电阻 R 很大，电路里电流几乎恒定
- 示波器上半导体的电压降变化可直接反映附加电导率变化
- 从而动态观测非子的注入与复合过程

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = (1/\sigma - 1/\sigma_0) \quad \sigma_0 = -\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \approx -\frac{\Delta \sigma}{\sigma_0}$$

非平衡载流子浓度随时间按指数规律衰减



$$-\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{\Delta p}{\tau}$$



$$\Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-t/\tau}$$

$1/\tau$ 为复合概率

$\Delta p/\tau$ 为复合率

τ 为非平衡载流子浓度衰减到原来数值 $1/e$ 所经历时间

- ◆ τ 值越大，衰减越慢；即寿命越长，非平衡载流子的复合速度越慢
 τ 值越小，衰减越快；即寿命越短，非平衡载流子的复合速度越快
- ◆ 相对非平衡多数载流子而言，非平衡少数载流子的影响处于起决定性作用的主导地位，多子寿命没有太大意义，因此非平衡载流子的寿命通常指非平衡少数载流子的寿命（**少子寿命**）

4.2 准费米能级

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right)$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_0 T}\right)$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

热平衡时非简并半导体
(系统有统一的费米能级)

状态密度 $g(E)$

$g_C(E)$ 和 $g_V(E)$

电子如何按照
能量分布

微
积
分
数
学
推
导

允许量子态按能量的分布

电子占据允态的几率 $f(E)$

费米分布

玻耳兹曼分布

能量

$g(E)$

量子态分布

$f(E)$

电子在量子态中分布

E 到 $E+dE$ 之间的电子数目 $f(E)g(E)dE$

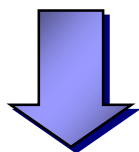
非平衡状态下：系统没有统一的费米能级

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$np \neq n_i^2$$

导带（价带）内部热跃迁频繁，能达到热平衡
载流子数量上偏离了平衡态，但其能量分布仍与平衡态相同
费米能级和统计分布函数对导带和价带各自仍然适用



导带与价带之间隔着禁带，
可以认为导带与价带之间不平衡

局部费米能级（准费米能级）：导带/价带费米能级



E_{Fn} 为导带费米能级，也称作电子准费米能级

对导带电子而言，数目越多则费米能级越高

对价带空穴而言，数目越多则费米能级越低

E_{Fp} 为价带费米能级，也称作空穴准费米能级

$n > n_0$ E_{Fn} 高于 E_F

$p > p_0$ E_{Fp} 低于 E_F

非平衡状态下，准费米能级仍然标志着电子填充能级的水平，
只不过由于导带与价带的不平衡而将二者的费米能级区分开来

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right) \quad p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_0 T}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = n_0 + \Delta n \quad n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_0 T}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fn}}{k_0 T}\right) = n_i \exp\left(-\frac{E_i - E_{Fn}}{k_0 T}\right) \\ p = p_0 + \Delta p \quad p = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{k_0 T}\right) = p_0 \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_F}{k_0 T}\right) = n_i \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_i}{k_0 T}\right) \\ np \neq n_i^2 \quad np = n_0 p_0 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0 T}\right) = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0 T}\right) \end{array} \right.$$

➤ 非平衡载流子浓度越大，准费米能级偏离平衡费米能级 E_F 越远

➤ E_{Fn} 与 E_{Fp} 之间的距离反映了半导体偏离热平衡态的程度

如果 $E_{Fn} = E_{Fp}$ ，则两个能带之间达到平衡，成为统一的 E_F

引入准费米能级，有助于形象地了解非平衡态的情况

准费米能级偏离平衡费米能级 E_F 的情况

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_F - E_{Fn}}{k_0 T}\right)$$

$$n > n_0$$

$$E_{Fn} > E_F$$

电子准费米能级比平衡费米能级高

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_F}{k_0 T}\right)$$

$$p > p_0$$

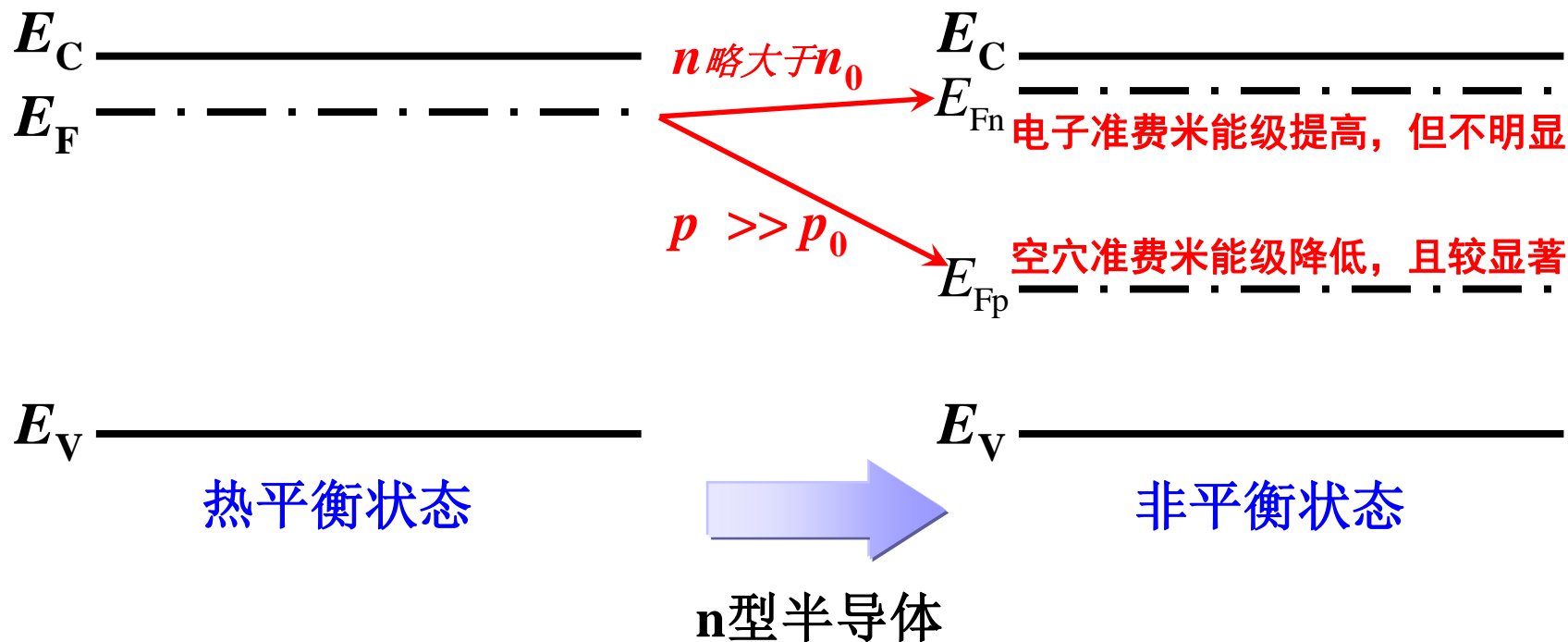
$$E_{Fp} < E_F$$


空穴准费米能级比平衡费米能级低

多数载流子的准费米能级偏离程度 (小)

少数载流子的准费米能级偏离程度 (大)

谁更显著?




$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{\text{Fn}} - E_{\text{Fp}}}{k_0 T}\right)$$

E_{Fn} 和 E_{Fp} 偏离的大小直接反映出 np 乘积和 n_i^2 相差的程度

偏离越大，则非平衡状态越显著

偏离小，则越接近平衡态

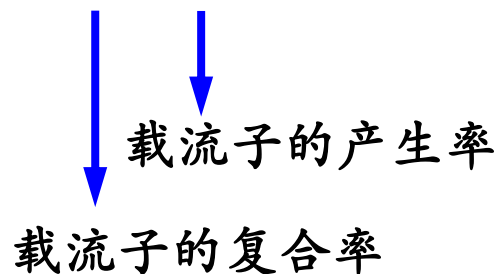
相等时，即为平衡态

4.3 非平衡载流子的复合 - 如何影响寿命?

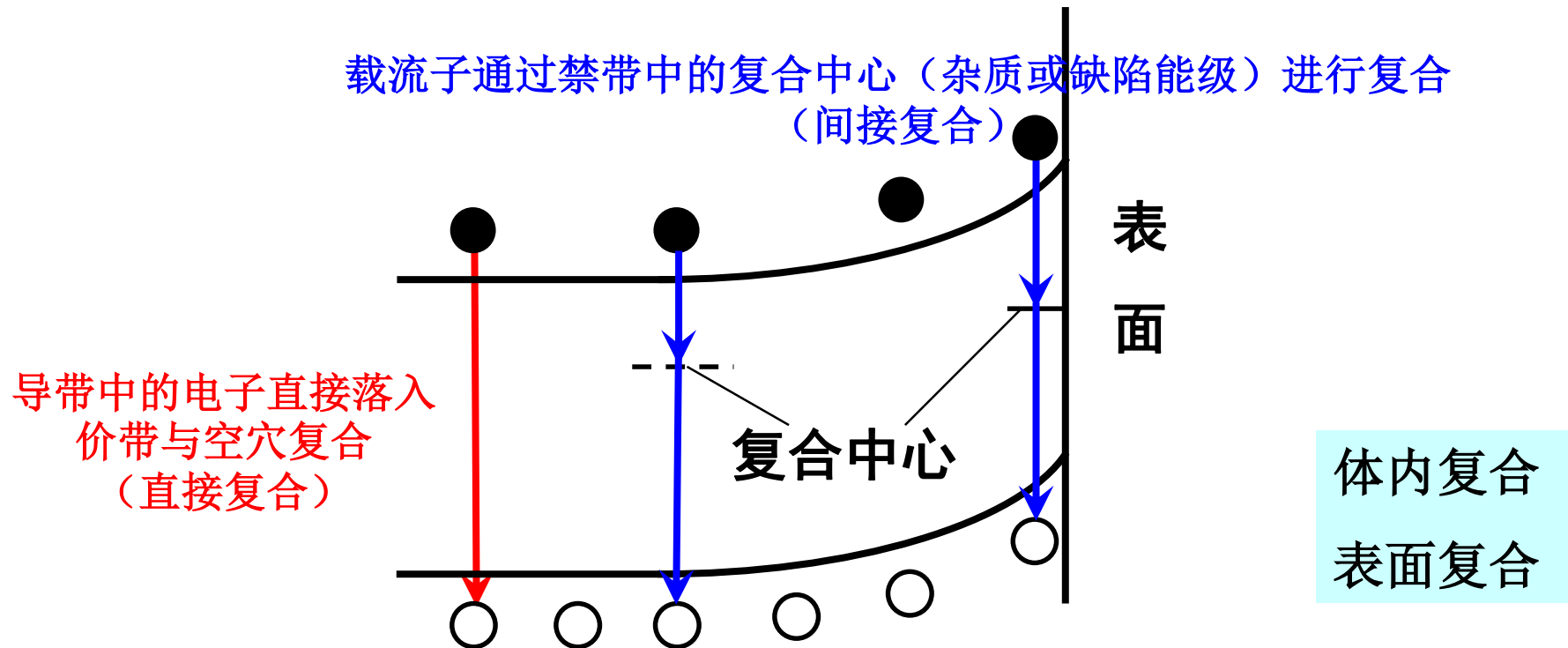


半导体内部的微观机制导致系统可由非平衡态向平衡态过渡

非平衡载流子的净复合率 $U = R - G = \Delta p / \tau$



载流子复合的微观机制



载流子复合，释放出多余的能量

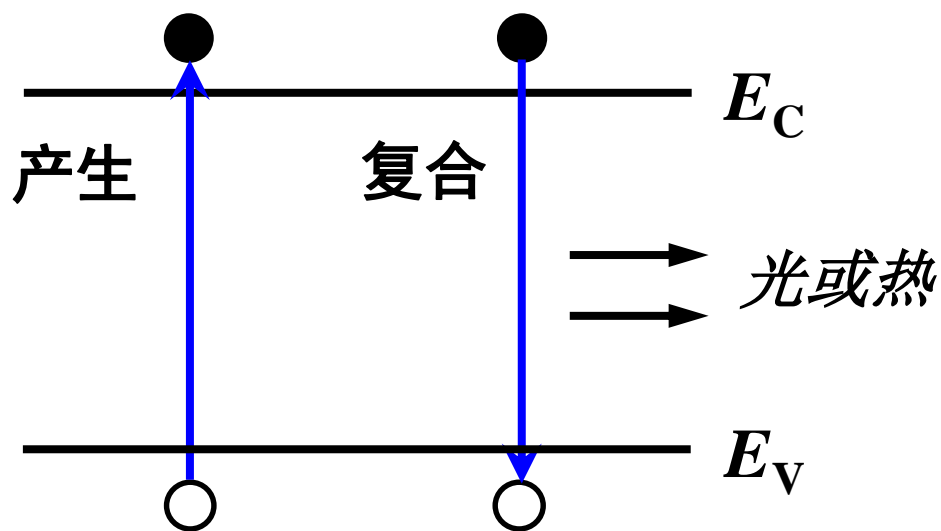
发射光子（发光，辐射复合）

发射声子（晶格升温，无辐射复合）

转移给其它载流子（Auger俄歇复合）

1.直接复合

定义：导带中的电子直接落入价带与空穴复合



一般而言，禁带宽度越小的半导体中直接复合的几率越大。所以，在窄禁带宽度半导体中（如InSb, 0.18eV），直接复合占优势。

载流子复合率正比于 n 、 p

$R = rnp$ （ r 为平均复合几率，它与载流子热运动有关，取决于温度）

载流子产生率 $G = G_0 = R_0 = rn_0p_0$

在非简并情况下，价带中的空穴相对于价带中的总状态数是极其微小的（基本全满），导带中的电子数同样如此（基本全空），故载流子产生率几乎不受载流子浓度的影响，仅是温度函数！！！！

直接复合时，非子的复合率 $U_d = R - G = rnp - rn_0p_0$

以n型为例

(1) 小注入条件下 $\Delta p \ll n_0 + p_0$

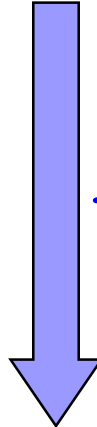
$$\tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)} \approx \frac{1}{rn_0}$$

- 温度和掺杂一定时，寿命是一个常数
- 寿命与载流子浓度成反比，即半导体电导率越高，寿命就越短!!!

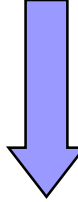
(2) 大注入条件下 $\Delta p \gg n_0 + p_0$

$$\tau = \frac{1}{r\Delta p}$$

- 此时，寿命不再是常数，而是与非子浓度成反比


$$\left\{ \begin{array}{l} n = n_0 + \Delta n \\ p = p_0 + \Delta p \\ \Delta n = \Delta p \end{array} \right.$$

$$U_d = R - G = r(n_0 + p_0)\Delta p + r(\Delta p)^2$$

$$U_d = \Delta p / \tau$$


$$\tau = \frac{\Delta p}{U_d} = \frac{1}{r[(n_0 + p_0) + \Delta p]}$$

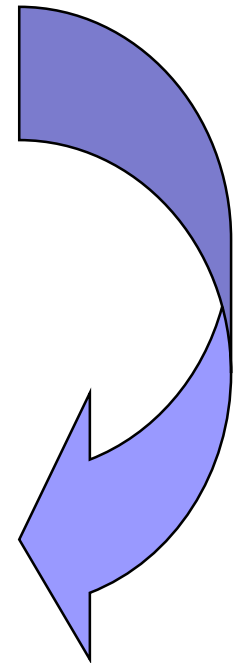
可结合室温下本征光吸收的数据进行理论计算出 r
直接复合机制下室温时:

硅: $r = 10^{-1}$ 据此, $\tau = 3.5 \text{ s}$

锗: $r = 6.5 \times 10^{-1}$ 据此, $\tau = 0.3 \text{ s}$

而实际情况, 硅、锗的寿命值最大不过几毫秒

因此, 对于硅、锗而言, 直接复合并不是
最主要的复合机构

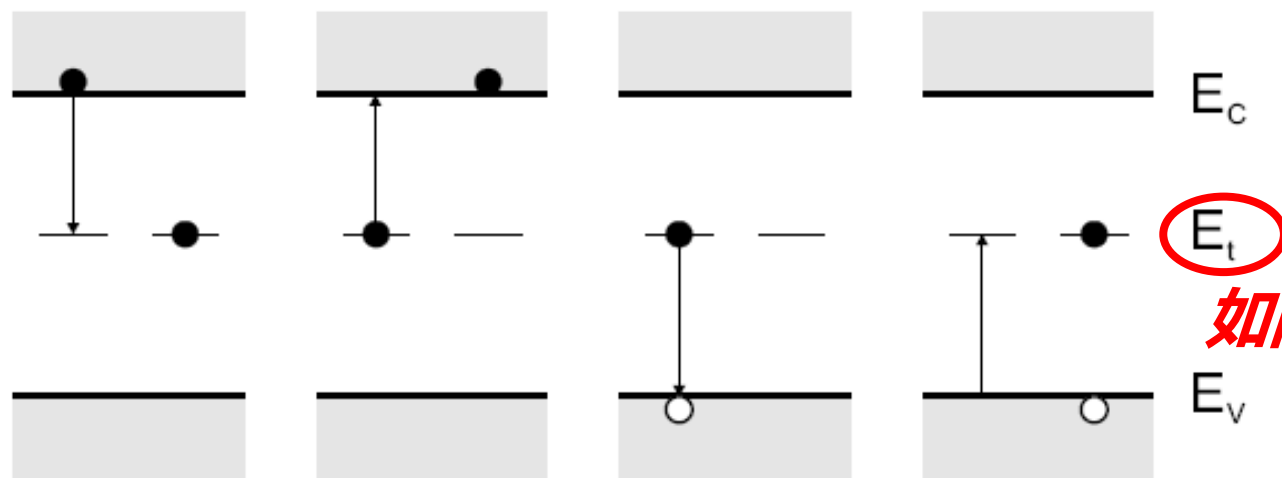


2.间接复合

实验现象：半导体中杂质越多，或晶格缺陷越多时，寿命越短

定义：非平衡载流子通过**禁带中的杂质和缺陷能级**进行的复合

复合中心：对非平衡载流子的复合起促进作用的杂质和缺陷



如同多了一个台阶

甲
俘获电子

乙
发射电子

丙
俘获空穴

丁
发射空穴

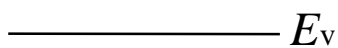
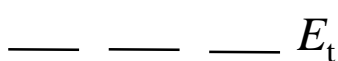
(对复合中心 E_t 而言)

甲

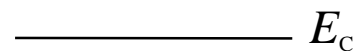


复合中心

俘获电子

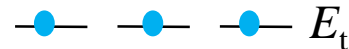


丙

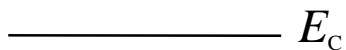


复合中心

俘获空穴

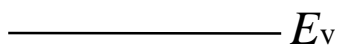


乙

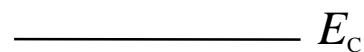


复合中心

发射电子

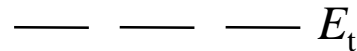


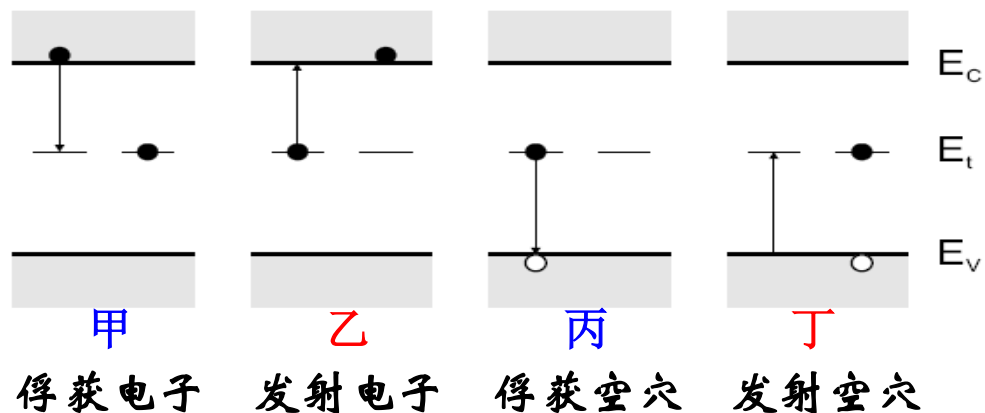
丁



复合中心

发射空穴





(N_t 复合中心浓度, n_t 复合中心能级上电子浓度)

甲：电子由导带落入空的复合中心能级，称为复合中心**俘获电子**的过程

电子俘获率 $= r_n n (N_t - n_t)$, r_n 电子俘获系数

乙：电子由复合中心被激发到导带（甲的逆过程），称为**发射电子**过程

电子产生率 $= s_- n_t$, (导带基本是空的，与 n 无关), s_- 电子激发几率

丙：电子由复合中心能级落入价带与空穴复合，称为复合中心**俘获空穴**的过程

空穴俘获率 $= r_p p n_t$, r_p 空穴俘获系数

丁：电子由价带被激发到空的复合中心能级（丙的逆过程），称为**发射空穴**过程

空穴产生率 $= s_+ (N_t - n_t)$, (价带基本是满的，与 p 无关), s_+ 空穴激发几率

复合中心

复合

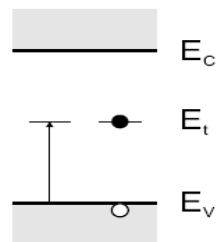
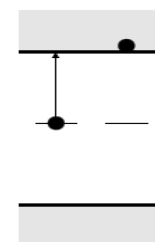
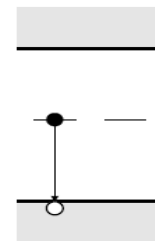
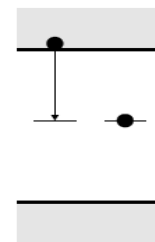
俘获电子（甲） 电子俘获率 = $r_n n (N_t - n_t)$

俘获空穴（丙） 空穴俘获率 = $r_p p n_t$

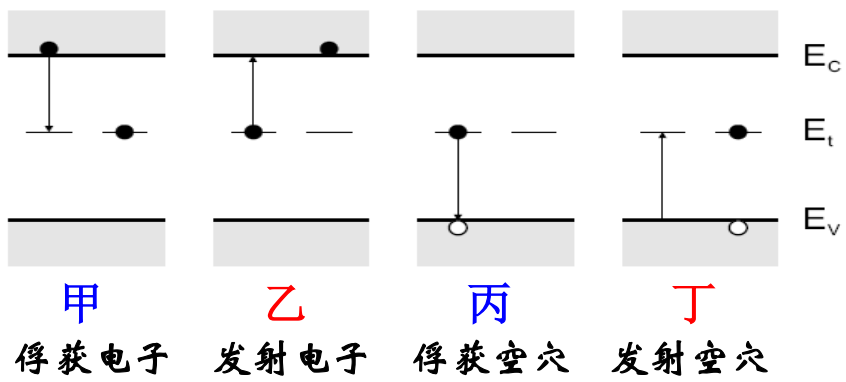
产生

发射电子（乙） 电子产生率 = $s_- n_t$

发射空穴（丁） 空穴产生率 = $s_+ (N_t - n_t)$



平衡状态下 ($n=n_0$) : 甲=乙 $\Rightarrow r_n n_0 (N_t - n_{t_0}) = S_- n_{t_0}$



非简并情况下:

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right)$$

$$n_{t_0} = N_t f(E_t) = \frac{N_t}{\exp\left(\frac{E_t - E_F}{k_0 T}\right) + 1}$$

(回忆: 电子占据施主能级的概率, 此处忽略分布函数中的简并因子)

$$r_n N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_0 T}\right) = S_-$$

$$\text{令 } n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$S_- = r_n n_1$$

复合中心**俘获**电子的能力强
则它**发射**电子的能力也强

平衡状态下 ($p=p_0$) : 丙=丁

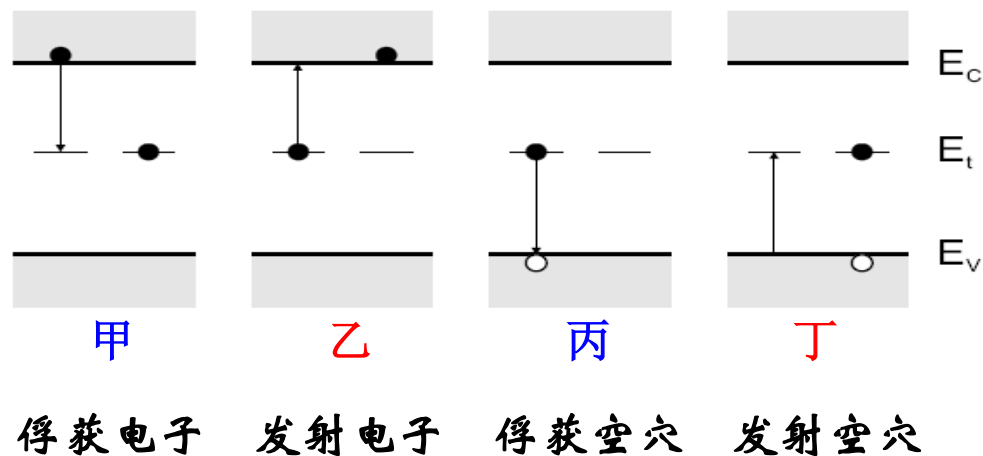
$$\text{令 } p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_0 T}\right)$$

$$S_+ = r_p p_1$$

复合中心**俘获**空穴的能力强
则它**发射**空穴的能力也强

对立过程的内在联系

非平衡状态下:



非平衡载流子净复合率 $U = R - G = \Delta p / \tau$

间接复合机制下，单位时间单位体积内

导带减少的电子数目（甲－乙）＝价带减少的空穴数目（丙－丁）

$U = \text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁}$ ，（平衡态下，甲＝乙，丙＝丁， $U=0$ ）

成对复合

非平衡载流子的复合率 $U = \text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁}$

利用“甲+丁=乙+丙”，

求得
$$n_t = N_t \frac{(nr_n + p_1 r_p)}{r_n(n + n_1) + r_p(p + p_1)}$$

$$n_1 p_1 = n_i^2$$

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_0 T}\right)$$

间接复合机制下净复合率的通式

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n(n + n_1) + r_p(p + p_1)}$$

**实验现象：半导体中杂质越多，
或晶格缺陷越多时，寿命越短**

$$U = \Delta p / \tau$$

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n \\ p = p_0 + \Delta p \\ \Delta n = \Delta p \end{cases}$$

N_t 越大, τ 越小

$$\tau = \frac{\Delta p}{U} = \frac{r_n(n_0 + n_1 + \Delta p) + r_p(p_0 + p_1 + \Delta p)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

$$\tau = \frac{\Delta p}{U} = \frac{r_n(n_0 + n_1 + \Delta p) + r_p(p_0 + p_1 + \Delta p)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0 + \Delta p)}$$

(1) 小注入条件下 $\Delta p \ll n_0 + p_0$

复合中心的
 r_n 、 r_p 一般差别不大

$$\tau = \frac{r_n(n_0 + n_1) + r_p(p_0 + p_1)}{N_t r_n r_p (n_0 + p_0)} \quad \text{与非子浓度无关}$$

• n型半导体(强n型区): $n_0 \gg p_0, n_1, p_1$ $\tau = \tau_p = \frac{1}{N_t r_p}$

取决于对少子的俘获系数 (怎样理解?)

• p型半导体(强p型区): $p_0 \gg n_0, n_1, p_1$ $\tau = \tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$

(2) 大注入条件下 $\Delta p \gg n_0 + p_0$

$$\tau = \frac{1}{N_t r_n} + \frac{1}{N_t r_p} = \tau_n + \tau_p$$

怎样的杂质能级才是有效的复合中心？

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

$$\tau_p = \frac{1}{N_t r_p}$$

$$\tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$$

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{k_0 T}\right)$$

一般情况

$$r_n = r_p = r$$

$$U = \frac{N_t r (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i \operatorname{ch}\left(\frac{E_t - E_i}{k_0 T}\right)}$$

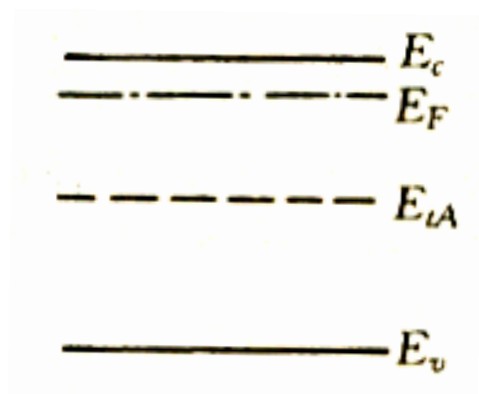
$$E_t = E_i$$

U 趋向极大

位于禁带中央附近的深能级是最为有效的复合中心

(远离禁带中央的浅能级，不能起有效的复合中心作用)

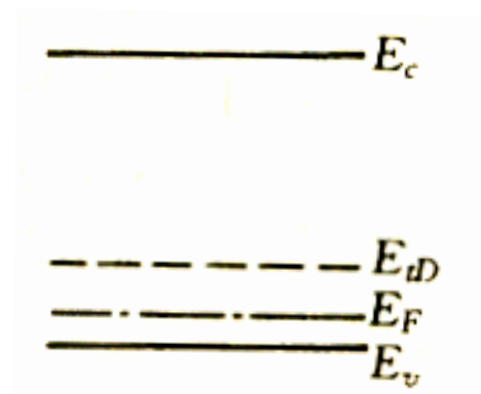
间接复合的实例：金在硅中的复合作用（自学）



n型: E_{tA} 起作用

Au^- 对空穴的 r_p

金在硅中可形成双重能级（受主能级 E_{tA} 和施主能级 E_{tD} ），两个都是深能级，但并不是同时起作用！

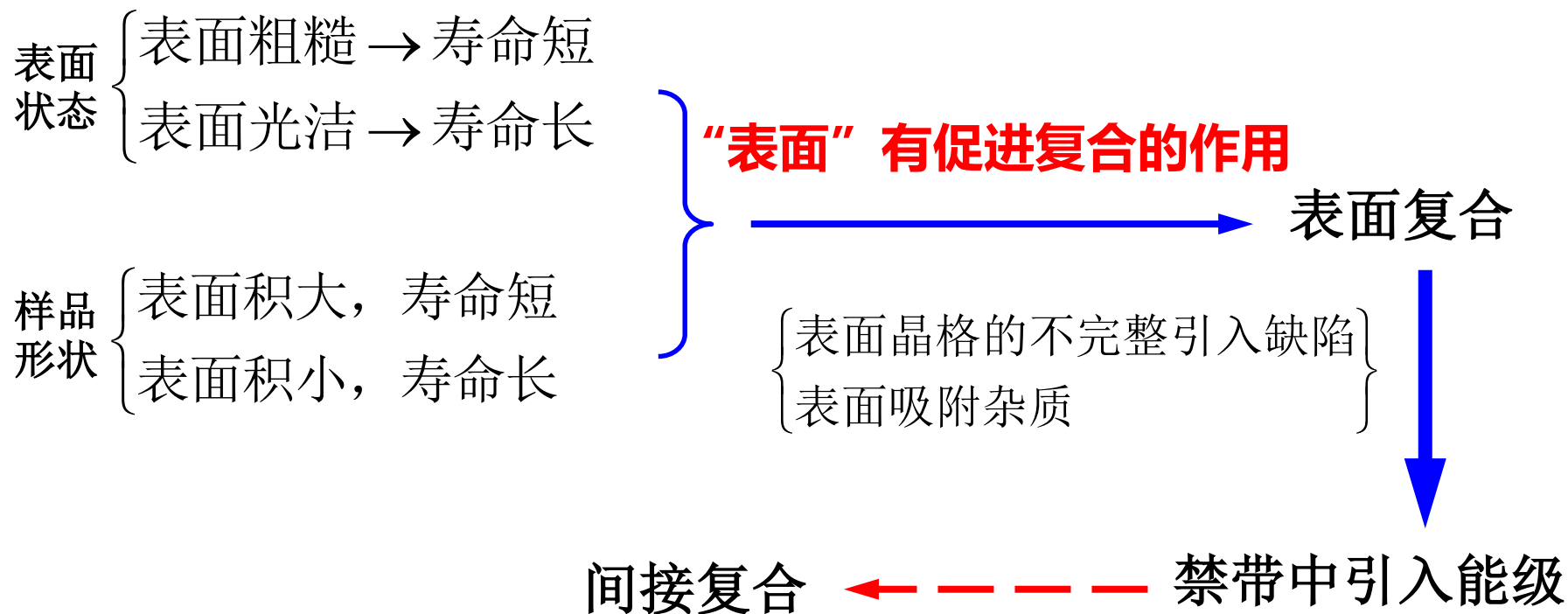


p型: E_{tD} 起作用

Au^+ 对电子的 r_n

- 通过控制金浓度，能够有效改变少数载流子寿命
- 少量的有效复合中心即可大大缩短寿命，而对电阻率影响小
- 在开关器件及有关电路中作为缩短少数载流子寿命的有效手段

3.表面复合



- 同时考虑体内复合与表面复合时, 寿命要比单纯由体内复合决定时的寿命短

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s}$$

- 良好而稳定的表面有利于降低表面复合, 从而提高晶体管和集成电路的稳定性和可靠性
- 某些物理测量中, 为了消除金属探针注入效应的影响, 要设法增大表面复合

小结:

“寿命”是描述非子复合快慢的物理量，它与半导体材料的性质（缺陷、杂质及表面状态等）密切相关。对 τ 的测量是鉴定半导体材料纯度和晶体结构完整性的常规手段之一：少子寿命越长，材料纯度和晶体结构完整性就越理想。

比较

直接复合

间接复合

小注入

$$\tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)}$$

强n型

$$\tau = \tau_p = \frac{1}{N_t r_p}$$

强p型

$$\tau = \tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$$

大注入

$$\tau = \frac{1}{r\Delta p}$$

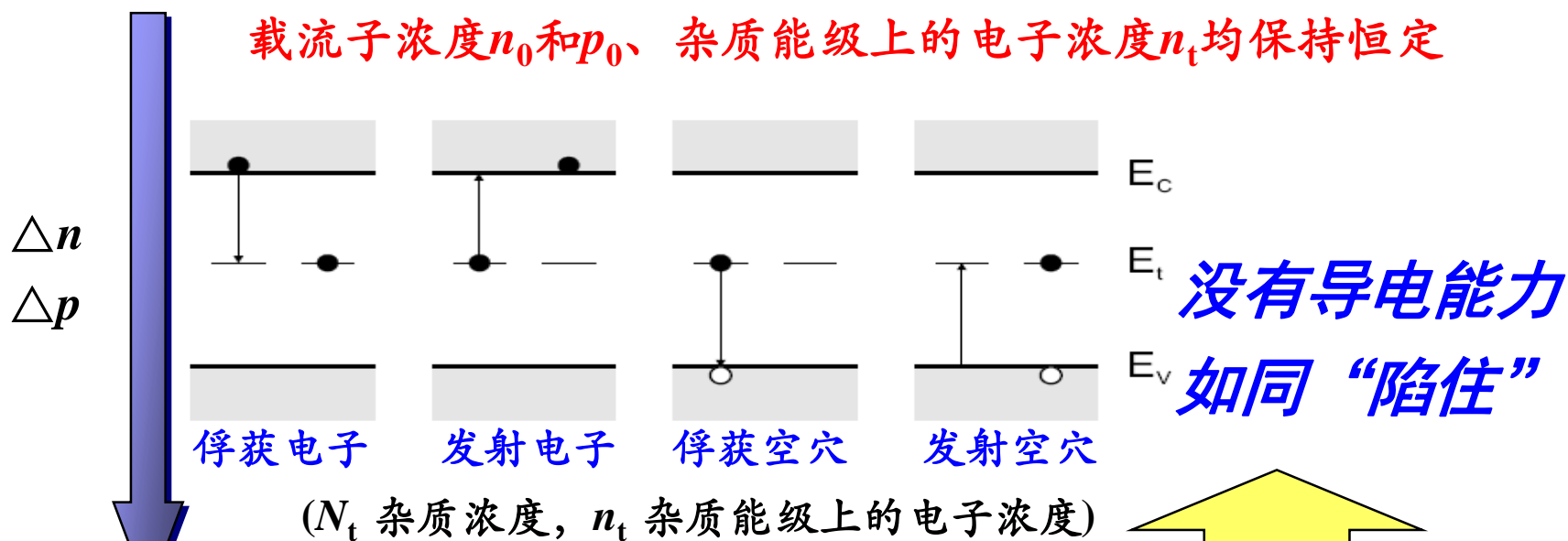
$$\tau = \frac{1}{N_t r_n} + \frac{1}{N_t r_p} = \tau_n + \tau_p$$

4.4 陷阱效应

热平衡时

杂质能级上的电子通过载流子的俘获和发射过程，与载流子之间保持平衡

载流子浓度 n_0 和 p_0 、杂质能级上的电子浓度 n_t 均保持恒定



非平衡状态

杂质能级上的电子浓度发生改变

$\left\{ \begin{array}{l} n_t \text{ 增加, 收容了部分非平衡电子} \\ n_t \text{ 减少, 收容了部分非平衡空穴} \end{array} \right.$

1.定义

陷阱的存在大大增长了从非平衡态恢复到平衡态的弛豫时间

陷阱效应：杂质能级积累非平衡载流子的作用。

所有杂质能级都有一定的陷阱效应，但一般只把具有显著陷阱效应（即积累的非平衡载流子数目可以和导带/价带中的非平衡载流子数目相比拟）的杂质能级称为陷阱，相应的杂质或缺陷称为陷阱中心。

思考1：陷阱中心和复合中心的区别？

先通过发射形成载流子，然后再通过其它复合中心复合

复合中心： $r_n \approx r_p$ 能够俘获两种不同载流子而复合掉

而陷阱中心对两种载流子的俘获能力必然相差很大

电子陷阱： $r_n \gg r_p$ 易俘获电子而难以俘获空穴，电子无法复合，“陷”在杂质能级上

空穴陷阱： $r_p \gg r_n$ 易俘获空穴而难以俘获电子，空穴无法复合，“陷”在杂质能级上

思考2：杂质能级成为陷阱中心还与哪些因素相关？

除了对载流子俘获系数的大小区别之外，还取决于**杂质的数量**
及其能级的位置

$$\text{能级上电子积累 } \Delta n_t = \frac{N_t n_1}{(n_0 + n_1)^2} \Delta n$$

N_t 越大越有利于陷阱作用

$$n_1 = n_0 \text{ 时, } (\Delta n_t)_{\max} = \frac{N_t}{4n_0} \Delta n = \frac{N_t}{4} \cdot \frac{\Delta n}{n_0}$$

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_0 T}\right)$$

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right)$$

NOTE:

陷阱效应对多数载流子并不显著，一般都是指**少数载流子的陷阱效应**

p型半导体中的电子陷阱
n型半导体中的空穴陷阱

杂质能级与平衡时的费米能级重合时，陷阱作用最强 (Why?)

- ◆ E_t 在 E_F 以下时，已被电子填满，不能起陷阱作用
- ◆ E_t 在 E_F 以上时，基本空着，适于陷阱，但越高则越易激发到导带，陷阱作用随之减弱

4.5 非平衡状态下载流子的运动

1. 非平衡载流子的扩散运动

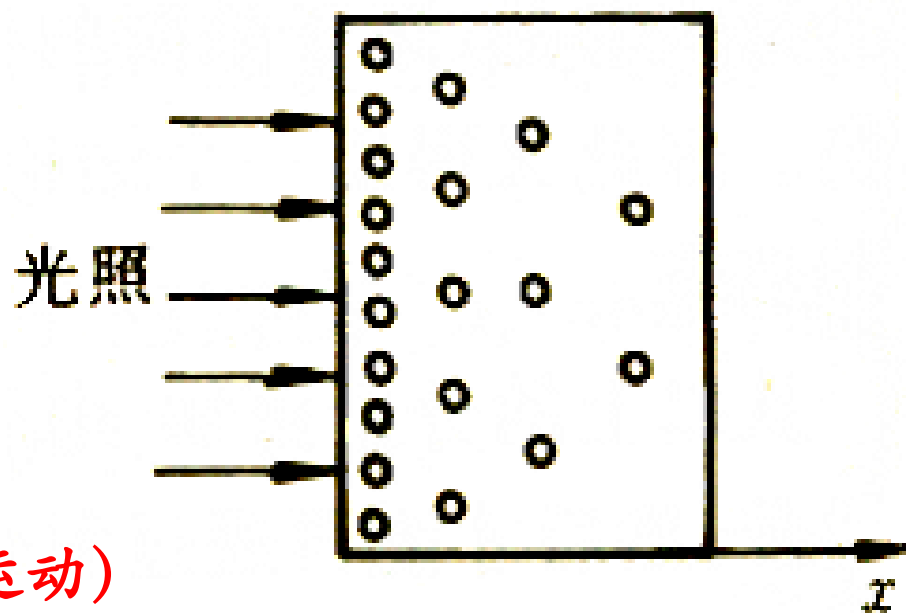
平衡态时，对均匀半导体而言载流子浓度恒定且分布均匀，无扩散运动

当浓度不均匀时，或者说存在
浓度梯度时：**扩散运动**

“**边产生、边扩散、边复合**”

(样品足够厚时)

(如果有外电场作用则还有漂移运动)



非平衡载流子由表向里进行扩散

考察一维情况下, $\Delta p(x)$

n型半导体中非平衡少数载流子（空穴）的扩散运动

$$\text{浓度梯度} = \frac{d\Delta p(x)}{dx}$$

空穴扩散流密度 S_p ：单位时间通过垂直于 x 轴的单位面积的空穴数目

一维扩散定律

$$S_p(x) = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$$

由浓度高处向低处扩散

空穴扩散系数, 单位 cm^2/s , 反映扩散本领的大小

光照恒定时，表面处非子浓度恒定，其在内部各处的浓度也保持恒定，即不随时间变化，产生、扩散和复合三者动态平衡——稳态扩散

空穴积累率（产生后向体内扩散而在体内某处单位体积内的积累数目） =
空穴复合率（扩散过程中因复合而消失）

$$-\frac{dS_p(x)}{dx} = D_p \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} = \frac{\Delta p(x)}{\tau_p} \quad \text{一维稳态扩散方程}$$

$$\text{其通解为： } \Delta p(x) = A \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_p}\right)$$

其中 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ，定义为非平衡载流子的扩散长度，它与非子的扩散系数及寿命有关，标志着非子在因复合而消失前所能扩散深入样品的平均距离

对于足够厚的样品
代入边界条件：

$$\begin{cases} x \rightarrow \infty \text{时}, \Delta p(\infty) \rightarrow 0 \\ x = 0 \text{时}, \Delta p(0) = (\Delta p)_0 \end{cases}$$

得到 $\Delta p(x) = (\Delta p)_0 e^{-x/L_p}$

表明非平衡载流子浓度从光照表面向内部按指数衰减

当 $x = L_p$ 时： $\Delta p(L_p) = (\Delta p)_0 / e$

扩散长度 L_p 等于非平衡载流子从注入表面向体内边扩散边复合的运动过程中，其浓度由 $(\Delta p)_0$ 降低到 $(\Delta p)_0/e$ 所经过的 **距离**

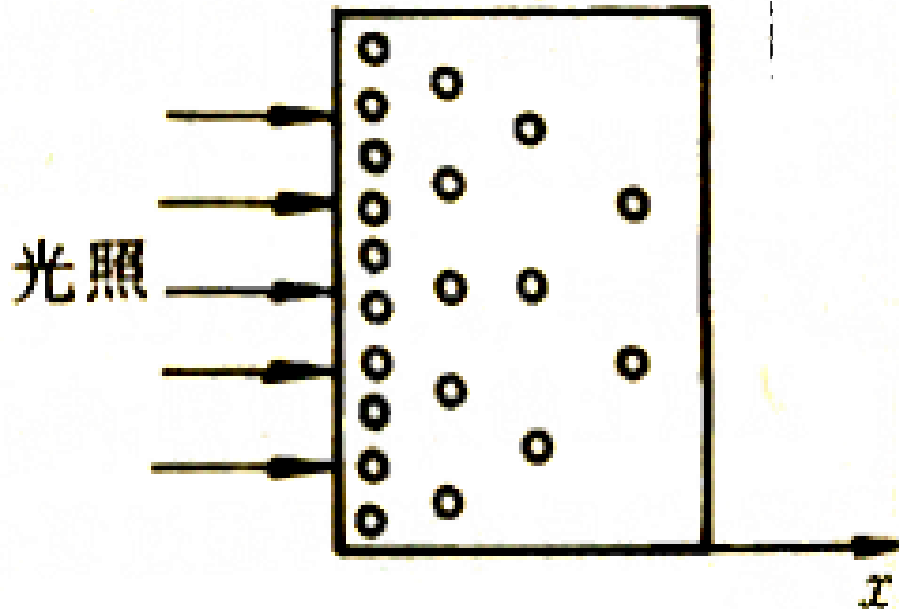
不要混淆！ 光照撤离后非子浓度随时间按指数规律衰减 $\Delta p(t) = (\Delta p)_0 e^{-t/\tau}$
 $\Delta p(\tau) = (\Delta p)_0 / e$

2.非平衡载流子的扩散电流

扩散流密度

$$S_p(x) = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$$

$$S_n(x) = -D_n \frac{d\Delta n(x)}{dx}$$



扩散电流密度

$$(J_p)_{\text{扩}} = -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} > 0$$

$$(J_n)_{\text{扩}} = qD_n \frac{d\Delta n(x)}{dx} < 0$$

两种电流方向相反

(因为扩散运动方向相同，
而电性相反)

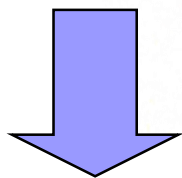
$$\frac{d\Delta p(x)}{dx} < 0 \quad \frac{d\Delta n(x)}{dx} < 0$$

3.非平衡载流子的漂移运动和漂移电流

“边产生边扩散边复合”

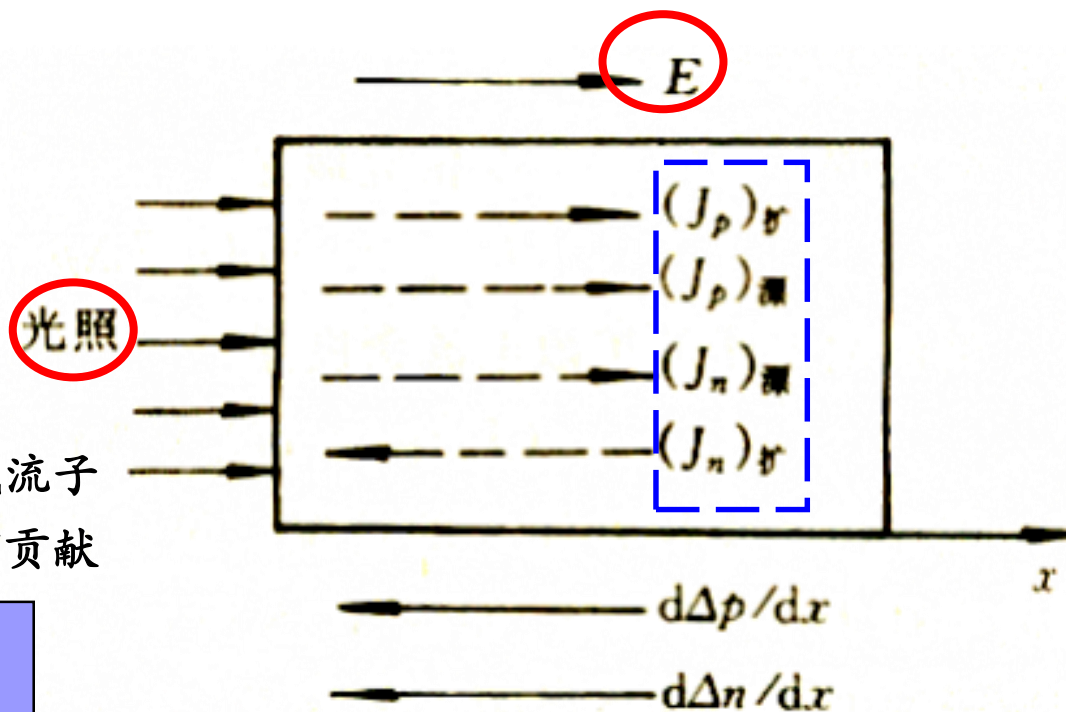
(如果有外电场作用则
还有漂移运动)

除了平衡载流子以外，非平衡载流子
对漂移电流也有贡献

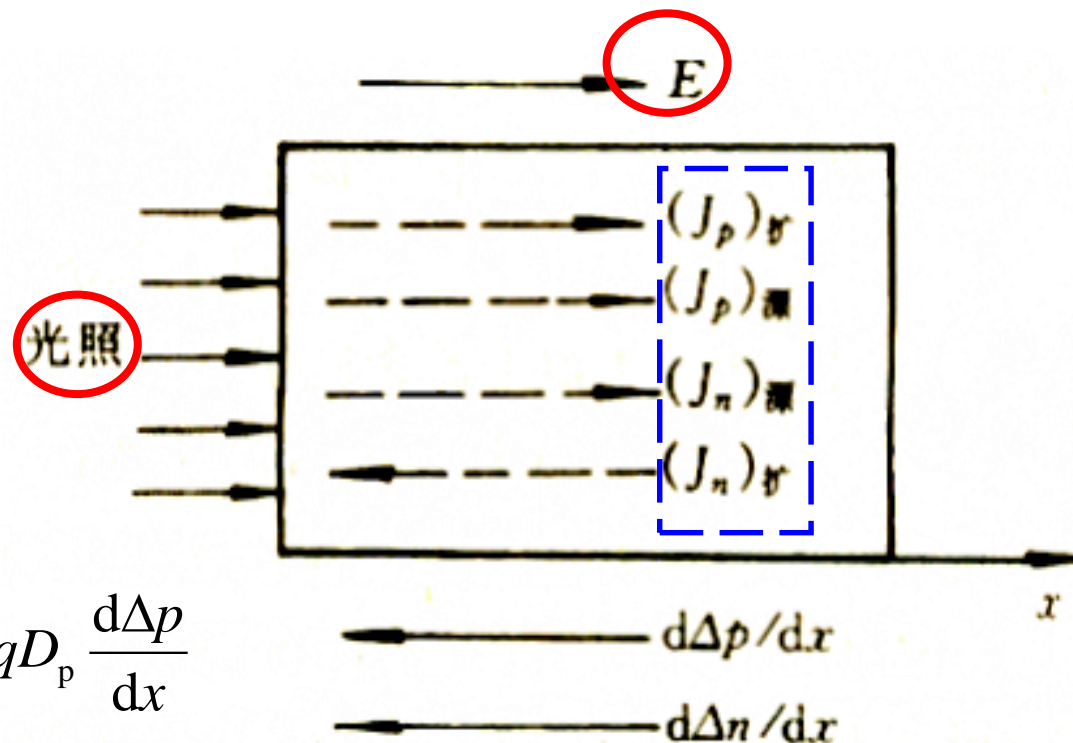


$$(J_n)_{\text{漂}} = n\mu_n q |E| = (n_0 + \Delta n)q\mu_n |E|$$

$$(J_p)_{\text{漂}} = p q \mu_p |E| = (p_0 + \Delta p)q\mu_p |E|$$



载流子的漂移和扩散



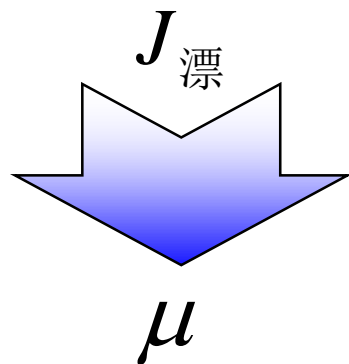
扩散和漂移同时存在时：

$$J_p = (J_p)_{\text{漂}} + (J_p)_{\text{扩}} = pq\mu_p |E| - qD_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

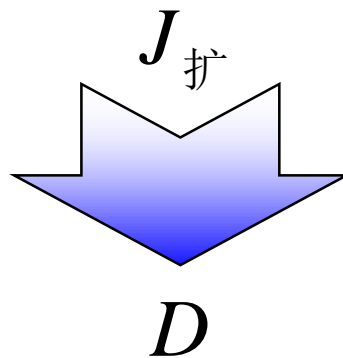
$$J_n = (J_n)_{\text{漂}} + (J_n)_{\text{扩}} = nq\mu_n |E| + qD_n \frac{d\Delta n}{dx}$$

$$J = J_p + J_n = \underbrace{q |E| (p\mu_p + n\mu_n)}_{J_{\text{漂}}} + \underbrace{q \left(D_n \frac{d\Delta n}{dx} - D_p \frac{d\Delta p}{dx} \right)}_{J_{\text{扩}}}$$

$$J = J_p + J_n = \boxed{q |E| (p\mu_p + n\mu_n)} + \boxed{q \left(D_n \frac{d\Delta n}{dx} - D_p \frac{d\Delta p}{dx} \right)}$$



在外加电场作用下的漂移运动



存在浓度梯度时的扩散运动

均反映了载流子作定向运动（形成宏观电流）的难易程度

漂移运动（迁移率） μ_n 、 μ_p }
 扩散运动（扩散系数） D_n 、 D_p }

存在联系

爱因斯坦关系式

$$\boxed{\frac{D}{\mu} = \frac{k_0 T}{q}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{电子: } \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{k_0 T}{q} \\ \text{空穴: } \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_0 T}{q} \end{array} \right.$$

NEXT: 进一步讨论扩散和漂移同时存在时的少子的运动规律

均匀半导体，光照恒定时，表面处非子浓度恒定，其在内部各处的浓度也保持恒定，即不随时间变化，产生、**扩散**和**复合**达到平衡——稳态扩散 “**边产生边扩散边复合**”

空穴积累率（因扩散而积累）= 空穴复合率（因复合而消失）

$$-\frac{dS_p(x)}{dx} = D_p \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} = \frac{\Delta p(x)}{\tau_p}$$

一维稳态扩散方程

有外电场作用则还有漂移运动，**恒场下**因漂移而产生的空穴积累率 $= -\frac{1}{q} \frac{dJ}{dx} = -\frac{d\Delta p(x)}{dx} \mu_p |E|$

非稳态下（比如光照撤除）

还是时间的函数

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \mu_p |E| - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

描述了非平衡（少数）载流子的运动规律

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \mu_p |E| - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

材料不均匀时（平衡载流子 p_0 也随 x 变化）

外电场不均匀（场强 E 也随 x 变化）

以及其他外界条件引起的浓度变化（ g_p ）

思考：载流子运动方程的通式是什么？

漂移运动和扩散运动同时存在，并考虑载流子复合和产生的各种因素

5.连续性方程 仍考察一维情况下n型半导体中的少数载流子空穴

空穴浓度
(x, t)

扩散：空穴积累率 = $-\frac{dS_p(x)}{dx} = D_p \frac{d^2 p}{dx^2}$

漂移：空穴积累率 = $-\frac{1}{q} \frac{d(J_p)_{\text{漂}}}{dx}$

其他： g_p $= -\mu_p |E| \frac{dp}{dx} - \mu_p p \frac{d|E|}{dx}$

复合： $\Delta p / \tau_p$

稳态时： $D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \mu_p |E| \frac{dp}{dx} - \mu_p p \frac{d|E|}{dx} + g_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$

非稳态时：

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p |E| \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial |E|}{\partial x} + g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

连续性方程反映了半导体中少数载流子运动的普遍规律，它是研究半导体器件原理的基本方程之一。

自学：连续性方程的应用

(1) 电导衰减法测寿命

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p |E| \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial |E|}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p$$

- ◆ 光照在均匀的n型半导体中**均匀地**产生非平衡载流子

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \Delta p}{\partial t}$$

- ◆ 假设没有电场，且 $g_p=0$

- ◆ $t=0$ 时，光照停止， $(\Delta p)_0$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} \Rightarrow \Delta p = (\Delta p)_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

(2) 求恒定注入下的电流密度

假设在一块均匀掺杂的n型半导体表面恒定注入少数载流子 Δp ，计算无电场且 $g_p=0$ 时，小注入情况下的电流密度。

$$\text{恒定注入少子 } \partial p / \partial t = 0 \quad \xrightarrow[\mathbf{g_p=0}]{\mathbf{E=0}} \quad D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

(一维稳态扩散方程式)

样品足够厚 $\longrightarrow \Delta p(x) = (\Delta p)_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$

$$J_p = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx} = \frac{D_p}{L_p} (\Delta p)_0 q \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) = \Delta p(x) q \frac{D_p}{L_p}$$

说明：样品足够厚时，注入的空穴所形成的扩散电流相当于该处的空穴非子以速度 D_p/L_p 运动的结果。注入表面处（ $x=0$ ）的空穴电流密度为 $q \frac{D_p}{L_p} (\Delta p)_0$

$J_p = p q \bar{v}_d$