

	大题	解释、说明
Chapter 1		金刚石结构 (2001) 金刚石结构的密排面 (2003) Si 晶体结构和结合性质 (2006)
Chapter 2	(计算) Au 在 Si 中产生双重能级 (96、99) (说明) Si、Ge、GaAs 能带特点 (93、96、97、98) (证明) $E-k$ 关系 (94)	直接、间接禁带半导体 (00) 等电子陷阱 (97) 半导体能带结构 (07)
Chapter 3	(推导) 二维电子气模型求模式密度、导带电子浓度表达式 (93、96、05) (证明) 知 n 、 p , 求 n_i 、 E_i 及 n 、 p 与 n_i 关系 (03) (图) $n - \frac{1}{T}$, 区分本征区、强电离区、弱电离区以及理由 (01) (推导) 球形等能面抛物带求 g (G) (96、00)	态密度有效质量 (99) 载流子有效质量 (06) 半导体的掺杂补偿效应 (06) 施主杂质及其电离能 (07)
Chapter 4	(推导) $\sigma = \frac{ne^2}{m} \langle \tau \rangle$ (01) (计算) Fe 在 Ge 中产生双重能级 (98) (说明) 霍尔效应及在半导体中主要应用 (93、98) (计算) GaAs 中含浅施主、深受主 (97) (说明) $R = -\frac{1}{ne}$ 、 $R = \frac{1}{np}$, R 为何反比载流子浓度 (94) (图) 对 $\ln \sigma - \frac{1}{T}$ 曲线作相关说明 (93)	影响载流子迁移率的因素 (06) 动量弛豫时间 (00) 霍尔效应及在半导体中应用 (03) 热载流子效应 (06)
Chapter 5	(说明) 直接、间接复合及各过程影响因素, 平均自由时间 (05、06) 深能级通常是有效复合中心 (94、97、00) $\Delta n \neq \Delta p$ 下, $\tau_{\text{多子}} \neq \tau_{\text{少子}}$; $R = r_{\text{eff}} (np - n_i^2)$; 少子寿命 (99) (证明) 爱因斯坦关系 $D = \frac{KT}{e} \mu$ (00) (推导) 一维扩散分布、扩散流 (93、97、07) $R = \frac{N_i r_n r_p}{r_n (n + n_i) + r_p (p + p_i)} (np - n_i^2)$ (94) 间接复合四个过程 nMOS 的 C-V 曲线 (06)	非平衡载流子的寿命 (06) 爱因斯坦关系 (94) 复合中心 (03) 陷阱效应 (01) 过剩载流子的扩散长度、扩散速度 (01) 俄歇复合 (07) 带间俄歇复合 (98、00) 准费米能级 (97、00) 准平衡 (94、97、98、07)
Chapter 6	(计算) 线性缓变 pn 结 (06) 知 P、N 浓度, 求势垒、电场电荷分布 (05) (说明) 正向偏压下 pn 结 (98、03) (证明) $C(V) = \left[\frac{\epsilon \epsilon_0 e N^*}{2(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}}$ (97、01) (证明) $J = J_0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$, $j_n = e \frac{D_n}{L_n} n_0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$, j_p 关系式 (94、00)	隧道 (齐纳) 击穿 (06) 隧道二极管 (99) 扩散电容 (98) 平带电压 (96) 欧姆接触

1993 年

一、导出非简并情形下电子浓度 n 随费米能级 E_F 的变化

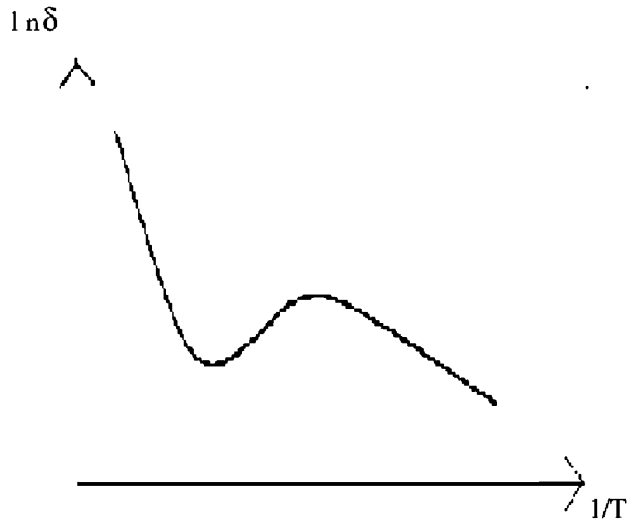
$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

式中 E_c 为导带底能量， N_c 为导带有效态密度。（20 分）

二、设入射光在半导体的 n 型半导体表面很薄的表面层内被吸收并激发电子空穴对。求导出过剩载流子的一维稳定扩散系数，并就所得的结果中有关的量做适当的说明。（30 分）

三、说明霍尔效应在半导体中的重要应用。（10 分）

四、半导体电导率 σ 的对数 $\ln \sigma$ 随温度倒数 $1/T$ 的变化如图示，试对之作点说明。（15 分）



五、MIS 结构的平带电压和哪些因素有关？（10 分）

六、说明 Si、GaAs 的能带结构的特点，并据之评述两者物理性质的差异及在应用中的优缺点。（15 分）

1994 年

一、名词解释：爱因斯坦关系、准平衡 (10 分)

二、试证明半导体能带结构（即 $E-k$ 关系），可告诉你哪些重要知识？试举例说明。(15 分)

三、 $R = -\frac{1}{ne}$ 或 $R = -\frac{1}{pe}$ （略去霍尔因子），从物理上说明 R 的大小为何反比于载流子浓度？

(15 分)

四、通过复合中心的复合速率 R 可写作：

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

其中 n 、 p 、 N_t 分别为电子、空穴和复合中心浓度， n_i 为本征载流子浓度， r_n 、 r_p 为电子和空穴的俘获系数， $n_1 = N_t e^{\frac{E_t - E_c}{kT}}$ ， $p_1 = N_t e^{\frac{E_t - E_v}{kT}}$ ，式中 E_t 为复合中心的能级位置，试求 n 型和 p 型材料在低阻区和高阻区的小信号寿命，说明为什么有效复合中心通常是深能级。 (20 分)

五、设 MS 结构氧化层中正离子的分布遵守：

$$\rho(x) = A(x - \frac{1}{2}d_i)^2$$

其中 d_i 为氧化层厚度，设正离子面密度为 Q_{ox} ，试求这些电荷对平带电压的贡献。(15 分)

六、对于同质 pn 结，证明在空间电荷区边界处作为少子电流的电子注入电流 j_n 和空穴注入电流 j_p 可写作（说明关键步骤）：

$$j_n = \frac{eD_n}{L_n} n_p^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad j_p = \frac{eD_p}{L_p} p_n^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

其中 n_p^0 和 p_n^0 为 p 区和 n 区平衡时的电子和空穴浓度， D_n 、 D_p 、 L_p 、 L_n 分别为电子、空穴的扩散系数和扩散长度。试证明若空间电荷区的产生和复合可略去， j_n 和电流之比对于图中所示的异质 pn 结（ n 型一侧为宽禁带），证明：

$$\frac{j_n}{j} = \frac{1}{1 + \frac{N_A D_p L_n}{N_D D_n L_p} e^{-\frac{V_{\epsilon_g}}{kT}}}$$

其中 $V_{\epsilon_g} = \epsilon_{gn} - \epsilon_{gp}$ ， N_D 、 N_A 分别为 n 区、 p 区掺杂浓度。 (25 分)

1996 年

一、证明：在非简并的非均匀半导体中，电子电流由下式给出：

$$j = n\mu_n \frac{dE_{Fe}}{dx}$$

式中 E_{Fe} 为电子准费米能级。 (15 分)

二、对于球形等能面得抛物性带，导出作为能量函数的态密度，并进而导出非简并条件下电子浓度作为 E_F 的函数。 (20 分)

三、说明反向 pn 结电流趋于饱和的原因，并以你认为最简单的方法导出该饱和电流的表达式（略去空间电荷区产生、复合）。 (15 分)

四、在说明影响 MOS 结构平带电压的诸因素的基础上，写出平带电压表达式。 (20 分)

五、说明 Si、Ge、GaAs 能带结构的主要特点，并在此基础上评论以上诸材料的优缺点。 (10 分)

六、金在硅中产生两重能级：受主能级在 E_i 以上 0.03eV，施主能级在 E_i 以下 0.27eV，设在

硅中掺金 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，磷 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，问在上述条件下：

- 1、在较低温度下，费米能级位于何处？
- 2、在硅中存在几种荷电状态的金，它们的浓度各为多少？
- 3、室温下载流子浓度各为多少？ (20 分)

1997 年

一、名词解释：平带电容、等电子陷阱、准平衡、准费米能级 (15 分)

二、GaAs 中，含有浅施主 S：电离能 0.006eV，浓度为 $5 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ ；含有 Gr：浓度为 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ，在 GaAs 中产生一深受主能级，位于导带以下 0.65eV。试求：

(1) 费米能级位于何处？

(2) 导电类型为 n 型还是 p 型？为什么？

(3) 该材料的室温电阻率。

(4) 又，若其他条件不变，S 浓度改为 $8 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ ，室温电阻率又如何？

(GaAs 电子有效质量 $m_n = 0.067 m_0$ ，电子迁移率为 $8800 \text{ cm}^2 / \text{Vgsec}$ ，导带等效态密度为 $N_c = 2.509 \times 10^{19} (m_n / m_0)^{3/2} / \text{cm}^3$ 。室温 kT 值 0.0258eV。略去自旋简并因子的影响) (20 分)

三、设入射光在半无穷的 n 型半导体表面很薄的表面层内被吸收，并激发电子、空穴对。试导出过剩载流子的一维扩散分布及扩散流，并就所得结果中有关的量做适当说明。 (15 分)

四、通过分析间接复合所涉及的诸过程，说明有效的复合中心应是深能级。 (10 分)

五、突变异质 pn 结两侧的掺杂浓度分别为 N_A 、 N_D ，介电常数分别为 ϵ_p 、 ϵ_n 。试导出空间电荷区厚度 d 和势垒电容 c 作为 $V_d - V$ 的函数。 V_d 为自建势，V 为外加电压。(可以利用同质结的有关结果) (20 分)

六、说明并图示正向偏置下的肖特基二极管中多了费米能级变化的几种可能情况，说明各种情形所对应的物理条件及相应的解决问题的理论 (10 分)

七、说明 Si、GaAs 能带结构的主要特征，并据之评述两者物理性质的差异及在应用中的优缺点。 (10 分)

1998 年

一、 名词解释：准平衡、带间俄歇复合、扩散电容、深耗尽、调制掺杂异质结构
(20 分)

二、 Fe 在 Ge 中产生两重受主能级,一个在 E_v 以上 0.35eV, 一个在 E_c 以下 0.27eV,

设 Ge 中 Fe 的含量为 5×10^{14} , 问当 Ge 中 P 的含量为主, $2.5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$,

$7.5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 时费米能级位于何处? 两种情形下的室温电导率为多少?

($\mu_n = 3900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$; $\mu_p = 1900 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$; $N_c = 2.6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$;

$N_v = 4.8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$; 300K 时的 $kT = 0.026 \text{eV}$; $\ln 10 = 2.3$) (20 分)

三、 说明霍尔效应在半导体中的主要作用。 (10 分)

四、 画出正向偏压下 pn 结能带图, 图示并说明准费米能级变化情况。导出小信号条件下 pn 结电流表达式, 并就反向情况作出说明。 (25 分)

五、 说明利用对 MOS 结构 CV 特性的测量, 确定 Si 表面氧化层中 Na 离子含量的原理。 (15 分)

六、 说明 Si、GaAs 能带结构的主要特征, 并评述两者物理性质的差异及在应用中的优缺点。

(10 分)

1999 年

一、名词解释：态密度有效质量、漂移速度过冲、隧道二极管、深耗尽 (20 分)

二、深能级杂质 Au 在 Si 中产生两重能级，一重在禁带上半部，在 E_C 以下 0.54eV，为受主

能级 E_A^{Au} ，另一重灾禁带下半部，在 E_V 以上 0.29eV，为施主能级 E_D^{Au} ：

1、Si 中的 Au 可能有几种荷电状态？

2、图示在每种荷电状态下，各能级的电子占据情形如何？

3 当 Si 中的 Au 一半为中性、一半为负电荷时， E_F 位于何处？这时 Si 为何种导电类型？

4、你如何能通过改变所掺浅能级杂质的类型和数量，使 E_F 在 E_C 、 E_A^{Au} 、 E_D^{Au} 、 E_V 之间变化？ (20 分)

三、就既存在电场又存在载流子梯度的一半情形导出以下关系式：

$$j_n = \mu_n n \frac{dE_{FE}}{dx} \quad \text{式中 } j_n \text{ 为电子电流密度，} \mu_n \text{ 为电子迁移率，} n \text{ 为电子浓度，} \\ E_{FE} \text{ 为电子准费米能级。} \quad (20)$$

四、1、说明在 Δn 不等于 Δp 的一般情形下，少子寿命不等于多子寿命。

2、对于各种复合机制，复合速率 R 可写成以下形式：

$$R = r_{eff}(np - n_i^2)$$

说明，在 $n \gg p$ (或 $p \gg n$) 且 Δn 不等于 Δp 的一般情形下，复合速率同通常只和过剩少子浓度有关。由之所得到的寿命为少子寿命。

3、在一 n 型半导体中，存在少子空穴的陷阱。过剩载流子通过该陷阱的复合可忽略不计，复合通过另一复合渠道进行。试在 R 的表示式的基础上说明，在同等条件下，和没有陷阱存在的样品相比，陷阱的存在可导致光电导灵敏度的增加。 (15 分)

五、1、扼要说明，略去空间电荷区复合，小信号 pn 结电流可表示为 (着重说明关键步骤)：

$$j = e \left(\frac{D_p p_n^0}{L_p} + \frac{D_n n_p^0}{L_n} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

说明，它也可以表示为

$$j = e \left(\frac{L_p p_n^0}{\tau_p} + \frac{L_n n_p^0}{\tau_p} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$\text{或者 } j = e \left(\frac{D_p}{L_p n_n^0} + \frac{D_n}{L_n p_p^0} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) n_i^2$$

式中 p_n^0 、 L_p 、 D_p 、 τ_p 分别为 n 区空穴的平衡浓度、扩散长度、扩散系数和寿命， n_p^0 、 L_n 、 D_n 、 τ_n 分别为 p 区电子的平衡浓度、扩散长度、扩散系数和寿命。 n_n^0 、 p_p^0 分别为 n 区电子和 p 区空穴的平衡浓度。 n_i 为本征载流子浓度。

2、在诸式的基础上，说明 pn 结电流时结区过剩电子和空穴的产生和复合所形成的电流。

3、并具体说明 pn 结的反向饱和电流和材料的禁带宽度及结的工作温度密切相关。

(20 分)

六、MIS 结构的阈值电压 V_T 对应于什么具体物理条件？理想 MS 结构的阈值电压是由哪几部分构成，大小如何？绝缘层中的电荷如何影响阈值电压？对于 p 型半导体构成的 MS 结构，若栅电压 V_G 大于阈值电压 V_T ，高于阈值电压的那部分电压是由什么电荷贡献的？单位面积的电荷量为多少？

(15 分)

2000 年

一、名词解释：动量弛豫时间、直接禁带半导体和间接禁带半导体、准费米能级带间俄歇复合、平带电容 (20 分)

二、对于简单能带，球形等能面得抛物性带，导出态密度 $g(\epsilon)$ 的表达式(ϵ 表示载流子的动能)。(15 分)

三、在非简并条件下，证明在迁移率 μ 和扩散系数 D 之间存在以下爱因斯坦关系：

$$D = \frac{KT}{e} \mu$$

试说明非简并条件在何处使用。(20 分)

四、以你认为最简洁的方式说明，深能级杂质通常是有效复合中心，浅能级杂质是否在一定条件下起复合作用，为什么？(20 分)

五、pn 结电流可写作

$$J = J_0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$\text{其中 } J_0 \text{ 可以写作 } J_0 = \left(\frac{D_n n_p^0}{L_n} + \frac{D_p p_n^0}{L_p} \right) e$$

等几种不同形式 (n_p^0 和 p_n^0 为 p 区和 n 区平衡少数浓度)，试沿 J_0 的各种形式说明 pn 结电流的性质及其和材料性质的关系。(15 分)

六、说明：1、什么是 MIS 结构的平带结构？它和哪些因素有关？

2、如何由实验上确定平带电压？

3、如何用高频 C-V 方法，测量 MOS 系统 SiO_2 层中 Na^+ 离子的含量？(20 分)

2001 年

一、名词解释

金刚石结构、过剩载流子的扩散长度和扩散速度、陷阱效应、肖特基势垒、MS 结构中的界面态 (25 分)

二、图中示意画出了施主浓度 $N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型 Si 中电子浓度随温度的变化, 指出与杂质弱电离区、杂质强电离区、本征激发区相对应的线段, 并说明之。(请先把示意图画在答题纸上, 然后按要求回答。) (25 分)

三、导出突变 pn 结的势垒电容 C 与外加电压 V 的依赖关系:

$$C(V)=\left[\frac{\epsilon\epsilon_0eN^*}{2(V_D-V)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

其中 $N^*=\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}$ 为约化杂质浓度, N_D 、 N_A 分别为 N 型和 P 型的掺杂浓度, V_D 为自建势。

(25 分)

四、写出求解在均匀电场作用下载流子分布函数的波尔兹曼积分微分方程, 讨论驰豫时间近似解法, 导出电导率表达式:

$$\sigma = \frac{ne^2}{m} \langle \tau \rangle$$

2002 年

- 1、有效复合中心、深能级杂质
- 2、空间电荷区所产生复合电流
- 3、 SiO_2 中可移动 Na^+ 测量，试验方法
- 4、类氢模型

2003 年

一、名词解释

金刚石结构的密排面、霍尔效应及其在半导体中的应用、复合中心 (30 分)

二、已知热平衡条件下导带电子浓度 n 和价带空穴浓度 p 的表达式：

$$n = N_c e^{-(E_c - E_f)/KT} \quad p = N_v e^{-(E_f - E_v)/KT}$$

其中 N_c 、 N_v 分别为导带和价带的有效态密度， E_c 、 E_v 分别为导带底和价带顶的能量。

1、求出本征载流子浓度 n_i 和本征费米能级 E_i 表达式

2、论证 n 、 p 与 n_i 、 E_f 之间有如下关系

$$n = n_i e^{-(E_f - E_i)/KT} \quad p = n_i e^{-(E_i - E_f)/KT} \quad (30 \text{ 分})$$

三、已知 PN 结 N 区施主浓度为 N_D ，P 区受主浓度为 N_A ，且 $N_D \gg N_A$ 。

1、画出加正向偏压 V 时 PN 结的能带图，讨论费米能级的变化。

2、写出注入到 P 区边界的过剩载流子（又称非平衡载流子）的浓度及电子电流的表达式。

3、分别讨论 N 区施主浓度 N_D ，P 区受主浓度 N_A ，半导体禁带宽度 E_g 的不同，对电流值的影响。 (30 分)

四、图中示意画出 P 型半导体 MOS 结构的理想 C-V 曲线。

1、指出图中标出的 I 区、II 区、III 区对应的 MOS 电容半导体表面的电荷状态。

2、指出图中 III 区中三条曲线 (III_A 、 III_B 、 III_C) 之间的区别及其原因。

3、证明图中 II 区的 G-V 曲线，有以下关系：

$$C = C_i / \left(1 + \frac{2V}{V_0}\right)^{1/2} \quad \text{其中 } C_i \text{ 为氧化层电容, } V_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 e N_A}{C_i^2} \quad (30 \text{ 分})$$

五、图中给出了形成异质结的两种半导体材料的能带参数， χ_w 、 χ_N 为电子亲和能，

ϵ_{gN} 、 ϵ_{gw} 为禁带宽度。

1、若宽带半导体为 N 型，窄带半导体为 P 型，画出平衡时异质结的能带图。

2、讨论异质结结构有利于提高电子电流与空穴电流之比的原因。

3、给出窄带一层的表面形成二维电子气的条件。 (30 分)

2005 年

一、给出了一组电容曲线（MS 结构电容），根据图判断曲线之间的氧化层厚度谁大谁小。另外还要求根据图判断掺杂浓度大小（相比较）的问题。总的来说，该题考查的是对 MS 结构电容 曲线的理解及 MS 结构电容的知识。

二、给出了一实验图，要求进行解释。该题考的是对 MS 结构电容低频、高频、深耗尽等状态的理解。尤其注意高频与深耗尽间的不同之处。

三、有一 PN 结，由 P 区和 N 区构成，N 区分为两部分，靠近 P 区那部分的浓度是剩下的 N 区浓度的一半，N 区浓度低的那部分厚度为 L ，但是 N 区的空间电荷区长度大于 L 。

问：1、PN 结的势垒是多少？

2、求其电场分布。

3、画出空间电荷区的电荷分布图（浓度分布）。（题中 P 区浓度为 N_A ，N 区浓度为 $N_D/2$ ）

四、给出了间接复合过程图。1、要求详细说明甲乙丙丁这四个过程，及其大小与哪些因素有关。为什么？2、根据复合速率表达式导出杂质能带分别位于禁带上部和下部时平均自由时间的表达式（每种分别有四种情况：强 P、强 N、弱 P、弱 N）

五、以二维电子气模型求模式密度，并导出导带电子浓度表达式。

2006 年

一、名词解释

载流子的有效质量、热载流子效应、隧道（齐纳）击穿、半导体的掺杂补偿效应、非平衡载流子（过剩载流子）的寿命 (30 分)

二、简答题

- 1、说明 Si 的晶体结构和 Si 晶体结合的性质，简述二者之间的联系。
- 2、简述影响半导体载流子迁移率的主要因素，并说明提高半导体载流子迁移率的可能途径。
- 3、什么是直接复合和间接复合，简要说明直接复合和间接复合的基本特征。 (30 分)

三、假设线性缓变 pn 结的掺杂浓度满足 $N_a - N_d = aX$ ，其中， N_a 为受主浓度， N_d 为施主浓度， $-X_0 < X < X_p$ 为空间坐标。

- 1、在耗尽近似条件下，求解该 pn 结的电场和电势分布。
- 2、画出平衡、正偏、反偏情形下的能带图，分别标出本征费米能级，费米或准费米能级的变化趋势。 (30 分)

四、假定 nMOS 电容结构的金属栅电极的功函数为 ϕ_M ，半导体 Si 的亲势为 χ ，衬底掺杂浓度为 N_d （功函数为 ϕ_s ），栅氧化层厚度为 t_{ox} 。在制备 nMOS 电容时氧化层中形成密度为 Q_f 的正的固定电荷。

- 1、假设该正的固定电荷形成在氧化层与 Si 界面处，写出其平带电压表达式，示意画出该结构的平衡能带图；
- 2、如果该正的固定电荷形成在氧化层中部 $1/2 t_{ox}$ 处，平带电压如何变化？比较固定电荷分别位于界面和氧化层中部时的低频 C-V 特性曲线；
- 3、假设在氧化层与 Si 衬底界面存在呈 U 型连续分布的施主型界面态（禁带中央界面态密度极大），示意画出这种情况下的 C-V 特性曲线并与不存在界面态比较。 (30 分)

五、已知金属 M 与 N 型半导体单晶硅 Si 接触形成肖特基势垒，其中，金属 M 的功函数为 ϕ_M ，半导体的掺杂浓度为 N_d 。由于工艺因素在 M/S 接触面形成了高的界面态。假定该界面态密度为无穷大，界面态能级位置位于距价带顶 $1/3 E_g$ 处（ E_g 为 Si 禁带宽度）。

- 1、分别画出平衡和外加正向偏压 V 时的能带图，并标出肖特基势垒高度和费米能级或准费米能级的变化趋势；
- 2、在耗尽近似条件下，求出平衡和外加偏压 V 时的空间电荷区厚度 W 的表达式；
- 3、求解肖特基电容随外加偏压的变化关系，并画出其 C-V 曲线。 (30 分)

2007 年

一、名词解释（30 分）

施主杂质及其电离能、欧姆接触、准平衡态、平带电压、半导体能带结构、俄歇复合

二、简答题（30 分，每题 15 分）

1、简要说明 PN 结击穿的两种主要机制，并讨论掺杂浓度和温度对击穿电压的影响。

2、已知金属 M 的功函数为 ϕ_M ，n-Si 半导体的功函数为 ϕ_S ，其中 $\phi_M > \phi_S$ ，由于 M/S 界

面态的钉扎效应，该 M/S 结构的肖特基势垒高度被钉扎在 ϕ_B 值，画出平衡情形下该

M/S 结构的能带图；在耗尽近似条件下，求 M/S 结构的电容随偏压 V 变化的表达式。

三(30 分)

有一束光照射在 N 型半导体表面，在半导体表面形成过剩载流子的注入。假设该半导体的厚度 w 远小于少数空穴的扩散长度 L_p ，同时在半导体的另一表面存在极高的复合中心态密度。

1、在稳定小注入条件下，画出相应的能带图并标出各物理量的空间变化趋势；

2、假设注入的过剩载流子在半导体中的扩散满足扩散方程 $D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} = \frac{\Delta p}{\tau}$ ，其中 D_p 是

扩散系数， τ 是寿命。求解稳定小注入条件下，半导体中空穴浓度的分布表达式；

3、求解在该稳定小注入条件下，光照引起的光电流的表达式。

四（30 分）

在半导体禁带中 E_t 能级处存在一浓度为 N_t 的复合中心。

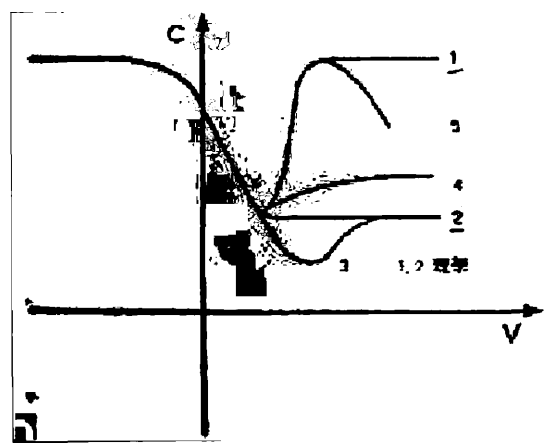
1、示意说明半导体通过 E_t 复合中心实现间接复合的四个基本过程满足的物理规律；

2、如果在半导体的光谱实验中，观察到三个不同波长 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 的特征光谱，其中，

$$h\nu_1 = h\nu_2 + h\nu_3, \text{ 说明该半导体的类型并解释其原因；}$$

3、如果在光谱实验中，只观察到两个不同波长（ ν_2 、 ν_3 ）的特征光谱，说明该半导体的类型并解释其原因。

五（30 分）如下所示，曲线 1 和曲线 2 分别是 nMOS 结构在准静态和低频情形下测得的理想 C-V 曲线，曲线 3、4、5 是实际测得的 C-V 曲线，其中曲线 3 相对于理想曲线 2 有一个下降后又恢复到曲线 2；曲线 4 在反型区可观察到饱和现象，但饱和值高于曲线 2、低于曲线 1 的值；曲线 5 在达到极大后开始下降。分别解释引起曲线 3、4、5 偏离理想 1 或 2 的原因和相关的物理机制。



参考答案

1994 年

一、爱因斯坦关系： $D = \frac{KT}{e} \mu = 25.85 \left(\frac{T}{300K} \right) \left(\frac{\mu}{1000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}} \right) [\text{cm}^2/\text{s}]$

成立条件：粒子满足波尔兹曼分布（经典统计）

准平衡：（参考 1997 年）

二、答：对于无限晶体，波矢 \vec{k} 可以连续取值；对某一确定的 \vec{k} 值，薛定谔方程：

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(\mathbf{r}) \right] \varphi(\mathbf{r}) = E \varphi(\mathbf{r})$$

存在一系列分立的能量本征值 E_n 和相应的本征函数

$\varphi_n(\mathbf{r})$ 。能量本征值随波矢 \vec{k} 连续变化，可以写作 $E_n(\vec{k})$ ，可以用 n 、 \vec{k} 表征电子状态

知 $\vec{k} = \vec{k} + \vec{k}_n$ ，其中倒格矢 $\vec{k}_n = n_1 \vec{b}_1 + n_2 \vec{b}_2 + n_3 \vec{b}_3$ ，

\vec{b}_1 、 \vec{b}_2 、 \vec{b}_3 为倒格基矢，

$$\begin{cases} \vec{b}_1 = 2\pi \frac{\vec{a}_2 \times \vec{a}_3}{\Omega} \\ \vec{b}_2 = 2\pi \frac{\vec{a}_3 \times \vec{a}_1}{\Omega} \\ \vec{b}_3 = 2\pi \frac{\vec{a}_1 \times \vec{a}_2}{\Omega} \end{cases} \quad \text{其中 } \Omega = \vec{a}_1 \cdot (\vec{a}_2 \times \vec{a}_3)$$

考虑一维下 $k' = k + \frac{2\pi n}{a}$

$$\therefore \varphi(x) = e^{i(k + \frac{2\pi n}{a})x} \left[u_k(x) e^{-i\frac{2\pi nx}{a}} \right]$$

\therefore 晶体中能量 E 随 \vec{k} 周期性变化，对应不同的 n ，电子状态分别限制在一定能量间隔内

（能带），相邻能带间存在禁带，且 $E_n(\vec{k}) = E_n(-\vec{k})$

三、由霍尔效应定义知： $E_y = R j_x B_z$

具体考虑（以 p 型中空穴为例）： $-e B_z \sum_i v_i = -pe B_z v_{dx}$

$$\therefore \text{稳定条件下动量平衡方程：} \begin{cases} peE_x + peB_z v_{dy} = \frac{pmv_{dx}}{\tau} \\ peE_y - peB_z v_{dx} = \frac{pmv_{dy}}{\tau} \end{cases}$$

对于 n 型中的电子有

$$\begin{cases} -neE_x + neB_z V_{dy} = -\frac{nmV_{dx}}{\tau} \\ -neE_y - neB_z V_{dx} = -\frac{nmV_{dy}}{\tau} \end{cases}$$

$$Q V_{dy} = 0$$

$$\therefore E_y = \pm B_z V_{dx} \begin{cases} p \\ n \end{cases}$$

$$\text{考虑到 } E_y = 0, \text{ 解出 } V_{dx} \text{ 代入上式, 有 } E_y = \pm \frac{eB_z}{m} \tau E_x \begin{cases} p \\ n \end{cases}$$

$$\text{代入 } E_x = \frac{j_x}{\sigma}, \text{ 并且 } \sigma_p = \frac{pe^2\tau}{m_p}, \sigma_n = \frac{ne^2\tau}{m_n}, \text{ 有 } E_y = \begin{cases} \frac{1}{pe} j_x B_z \rightarrow p\text{型} \\ -\frac{1}{ne} j_x B_z \rightarrow n\text{型} \end{cases}$$

$$\text{与 } E_y = R j_x B_z \text{ 比较得到 } R = \begin{cases} \frac{1}{pe} \rightarrow (p) \\ -\frac{1}{ne} \rightarrow (n) \end{cases}$$

Q 霍尔效应决定于 V_{dx} , 在同样大小的电流 j 下, n (或 p) 越小, V_{dx} 越大, 可见霍尔系数大小直接和载流子浓度相关, 载流子浓度越低 R 越大。

四、电子俘获: $C_n = r_n n (N_t - n_t)$

$$\text{电子激发: } E_n = S_n n_t$$

$$\text{空穴俘获: } C_p = r_p p n_t$$

$$\text{空穴激发: } E_p = S_p (N_t - n_t)$$

$$Q \quad n_t = \frac{N_t}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{KT}}}, N_t - n_t = \frac{N_t}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{KT}}}$$

$$\text{且平衡时有 } C_n = E_n, C_p = E_p \quad \text{可得} \begin{cases} S_n = N_c e^{\frac{E_c - E_t}{KT}} r_n = r_n n_1 \\ S_p = N_v e^{\frac{E_t - E_v}{KT}} r_p = r_p p_1 \end{cases}$$

$$\text{稳态时 } R = C_n - E_n = C_p - E_p$$

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

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

$$\text{设 } p = p_0 + \Delta p, n = n_0 + \Delta n, \therefore R = \frac{N_i r_n r_p}{r_n(n+n_1) + r_p(p+p_1)} (p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta p \Delta n)$$

小 信 号 下 , 认 为 $\Delta n = \Delta p$ 且 $\Delta n, \Delta p = (n_0 + p_0)$

$$\therefore R = \frac{N_i r_n r_p}{r_n(n+n_1) + r_p(p+p_1)} (n_0 + p_0) \Delta n$$

$$\therefore \tau = \frac{r_n(n+n_1) + r_p(p+p_1)}{N_i r_n r_p (n_0 + p_0)}$$

1、 设 E_i 在禁带下部 ($p_1 \gg n_1$)

$$\left. \begin{array}{l} (1) \text{强n型 } (n_0 \gg p_1 \gg n_1 \gg p_0) : \tau = \frac{1}{N_i r_p} \\ (2) \text{强p型 } (p_0 \gg p_1 \gg n_1 \gg n_0) : \tau = \frac{1}{N_i r_n} \end{array} \right\} \text{低阻区}$$

$$\left. \begin{array}{l} (3) \text{弱n型 } (p_1 \gg n_0 \gg p_0 \gg n_1) : \tau = \frac{1}{N_i r_n} \frac{p_1}{n_0} \\ (4) \text{弱p型 } (p_1 \gg p_0 \gg n_0 \gg n_1) : \tau = \frac{1}{N_i r_n} \frac{p_1}{p_0} \end{array} \right\} \text{高阻区}$$

2、 设 E_i 在禁带下部 ($n_1 \gg p_1$)

$$\left. \begin{array}{l} (1) \text{强n型 } (n_0 \gg n_1 \gg p_1 \gg p_0) : \tau = \frac{1}{N_i r_p} \\ (2) \text{强p型 } (p_0 \gg n_1 \gg p_1 \gg n_0) : \tau = \frac{1}{N_i r_n} \end{array} \right\} \text{低阻区}$$

$$\left. \begin{array}{l} (3) \text{弱n型 } (n_1 \gg n_0 \gg p_0 \gg p_1) : \tau = \frac{1}{N_i r_p} \frac{n_1}{n_0} \\ (4) \text{弱p型 } (n_1 \gg p_0 \gg n_0 \gg p_1) : \tau = \frac{1}{N_i r_p} \frac{n_1}{p_0} \end{array} \right\} \text{高阻区}$$

$$\text{知 } \begin{cases} n_1 = N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i - E_i}{KT}} \\ p_1 = N_v e^{-\frac{E_v - E_i}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i - E_i}{KT}} \end{cases} \quad \text{代 入 } R \text{ 表 达 式 , 其 中}$$

$$\tau_p = \frac{1}{N_i r_p} (\text{强n型}); \quad \tau_n = \frac{1}{N_i r_n} (\text{强p型})$$

$$\therefore R = \frac{(n_p - n_0 p_0)}{\tau_p (n + n_i e^{\frac{E_i - E_f}{KT}}) + \tau_n (p + n_i e^{\frac{E_i - E_f}{KT}})}$$

五、①固定于半导体表面的电荷对平带电压贡献为： $-\frac{Q_{ox}}{C_i} = -\frac{Q_{ox} d_i}{\epsilon_i \epsilon_0}$

②氧化层中电荷对平带电压贡献为： $-\frac{Q_{ox}'}{d_i}$

$$Q_{ox}' = \int_0^{d_i} \frac{\rho(x)x}{d_i} dx = \int_0^{d_i} A(x - \frac{1}{2}d_i)^2 \frac{x}{d_i} \cdot dx = \frac{1}{24} A d_i^3$$

$$\therefore -\frac{Q_{ox}'}{C_i} = -\frac{A d_i^3}{24} \cdot \frac{d_i}{\epsilon_0 \epsilon_i} = -\frac{A d_i^4}{24 \epsilon_0 \epsilon_i}$$

六、①知

$$\begin{cases} j_n = e \frac{D_n}{L_n} \Delta n(x_p) \\ j_p = e \frac{D_p}{L_p} \Delta p(x_n) \end{cases}$$

由于外加电压作用： $E_{Fn} - E_{Fp} = eV$ ，势垒高度由 eV_D 下降 $3eV$ ，变为 $e(V_D - V)$

由 $j = n\mu_n \frac{dE_F}{dx}$ 知， E_F 主要降落在载流子浓度最低的地方。

准费米能级主要是在势垒区以外降落，因而在 n 型区和空间电荷区范围内， E_{Fn} 是平直的，即 x_p 处电子和 n 区处于准平衡。

Q 势垒高度降低了 eV

$\therefore x_p$ 处电子浓度由平衡时 n_p^0 增加为： $n(x_p) = n_p^0 e^{\frac{eV}{KT}}$ ，同理： $p(x_n) = p_n^0 e^{\frac{eV}{KT}}$

$\therefore \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$; $\Delta p(x_n) = p_n^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$

$\therefore j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$; $j_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} p_n^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$

②尖峰处 $n \rightarrow p$ 发射电流： $j_{n \rightarrow p} = eV_n n_n^0 \exp\left[-\frac{e(V_{Dn} - V_n)}{KT}\right]$

$e(V_{Dn} - V_n)$: 偏压下尖峰电流

Q 界面处费米能级降低了 ΔE_F

$$\therefore j_{p \rightarrow n} \text{比} j_{n \rightarrow p} \text{降低了 } e^{-\frac{\Delta E_F}{KT}}; j_{p \rightarrow n} = eV_r n_n^0 \exp\left[-\frac{e(V_{Dn} - V_n)}{KT}\right] e^{-\frac{\Delta E_F}{KT}}$$

$$\therefore \text{通过尖峰的净热发射电流 } j_l = A(e^{\frac{eV_n}{KT}} - e^{-\frac{\Delta E_F - eV_n}{KT}})$$

$$\text{其中 } A = eV_r n_n^0 e^{-\frac{eV_{Dn}}{KT}} = eV_r n_{sp}^0 \quad (n_{sp}^0 \text{ 为尖峰处平衡电子浓度})$$

$$\begin{aligned} \text{由界面向 } p \text{ 区内部扩散电流: } j_D &= eV_D n_p^0 (e^{\frac{eV - \Delta E_F}{KT}} - 1) \\ &= eV_D n_n^0 e^{-\frac{eV_D - \Delta E_C}{KT}} (e^{\frac{eV - \Delta E_F}{KT}} - 1) \\ &= B(e^{\frac{eV - \Delta E_F}{KT}} - 1) \end{aligned}$$

$$\text{其中 } V_D = \frac{D_n}{L_n} \text{ (扩散速度)}, B = eV_D n_n^0 e^{-\frac{eV_D - E_C}{KT}} = eV_D n_p^0$$

j_l 和 j_D 都受 ΔE_F 调节, 由 j_l 式求解 ΔE_F 代入 j_D 式

由电流连续: $j_l = j_D = j_n$ 得

$$j_n = \frac{B}{1 + \frac{B e^{\frac{eV}{KT}}}{A e^{\frac{eV_n}{KT}}}} (e^{\frac{eV}{KT}} - 1) = \frac{B}{1 + \frac{B}{A} e^{\frac{eV_D}{KT}}} (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$\text{若 } A \gg B e^{\frac{eV_D}{KT}}, j_n = B(e^{\frac{eV}{KT}} - 1) = \frac{eD_n}{L_n} n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1) \quad (p \text{ 区导带底高于尖峰扩散})$$

$$\text{若 } A = B e^{\frac{eV_p}{KT}}, j_n = A(e^{\frac{eV_n}{KT}} - e^{-\frac{eV_p}{KT}}) = eV_r n_n^0 e^{-\frac{eV_{Dn}}{KT}} (e^{\frac{eV_n}{KT}} - e^{-\frac{eV_p}{KT}}) \quad (\text{尖峰高 } KT \ln \frac{V_r}{V_t}, \text{ 发射})$$

考虑扩散为主情形 ($A \gg B e^{\frac{eV_p}{KT}}$)

$$\text{空穴注入电流 } j_p = \frac{eD_p}{L_p} p_p^0 e^{-\frac{eV_p + \Delta E_v}{KT}} (e^{\frac{eV}{KT}} - 1), \text{ 若 } \begin{cases} n_p^0 = N_D e^{-\frac{eV_D - \Delta E_C}{KT}} \\ p_p^0 = N_A \end{cases}$$

$$\therefore \frac{j_n}{j} = \frac{j_n}{j_n + j_p} = \frac{1}{1 + \frac{N_A D_p L_n}{N_D D_n L_p} e^{-\frac{\Delta E_g}{KT}}} \quad \text{其中 } \Delta E_g = E_{gn} - E_{gp} = \Delta E_C + \Delta E_v$$

1996 年

一、非均匀半导体中，有扩散流： $j = n\mu_n \frac{dE_c}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx}$ ①

$$n(x) = N_c e^{-\frac{E_c(x) - E_F(x)}{KT}}$$

$\therefore \frac{dn(x)}{dx} = -\frac{n(x)}{KT} \frac{d(E_c - E_F)}{dx}$ 代入①中，有

$$j = n\mu_n \frac{dE_c}{dx} - \frac{eD_n n}{KT} \left[\frac{d(E_c - E_F)}{dx} \right] \xrightarrow{\text{非简并 } D_n = \frac{KT}{e} \mu_n} n\mu_n \frac{dE_c}{dx} - \frac{en}{KT} \frac{KT}{e} \mu_n \frac{d(E_c - E_F)}{dx}$$

$$= n\mu_n \frac{dE_F}{dx}$$

二、① $E - E_c = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ ，令 $\epsilon = E - E_c$

$$\therefore k = \left(\frac{2m\epsilon}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$N(\epsilon) = \frac{2}{(2\pi)^3} \cdot \frac{4}{3} \pi k^3 = \frac{8\pi}{3h^3} \cdot (2m\epsilon)^{\frac{3}{2}}$$

$$\therefore g(\epsilon) = 4\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \epsilon^{\frac{1}{2}}$$

② 令 $\xi_n = E_F - E_c, \epsilon = E - E_c$

$$\therefore f(\epsilon) = \frac{1}{1 + e^{\frac{\epsilon - \xi_n}{KT}}}$$

$$\therefore n = \int_{\text{导带}} g(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon = \int_0^{+\infty} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \epsilon^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + e^{\frac{\epsilon - \xi_n}{KT}}} d\epsilon$$

$$\xrightarrow[\text{近似波尔兹曼}]{E_F \text{ 位于 } E_c \text{ 以下若干倍}} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{+\infty} e^{\frac{\xi_n}{KT}} \cdot e^{-\frac{\epsilon}{KT}} \epsilon^{\frac{1}{2}} d\epsilon$$

$$\xrightarrow{\text{令 } \xi = \frac{\epsilon}{KT}} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{\xi_n}{KT}} \cdot e^{-\xi} (KT)^{\frac{1}{2}} d\xi$$

$$= 4\pi \frac{(2m_n KT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{\xi_n}{KT}} \int_0^{+\infty} e^{-\xi} \xi^{\frac{1}{2}} d\xi = 2 \frac{(2\pi m_n KT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{E_c - E_F}{KT}} = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{KT}}$$

$$\text{其中 } N_c = 2 \frac{(2\pi m_n K T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \text{ (有效导带密度)}$$

三、pn 结加反向电压时，反向偏压在势垒区产生的电场与内建电场方向一致，势垒区电场增强，势垒区也变宽（ $V_D + V_R$ ）。势垒区电场增强破坏了载流子的扩散运动和漂移运动之间的平衡，增强了漂移运动，使漂移流大于扩散流。当少数载流子被电场驱走后，内部少子补充，形成反向偏压下的电子扩散流和空穴扩散流。因为少子浓度很低，而扩散长度基本不变，所以反向偏压时少子的浓度梯度也小；当反向电压很大时，边界的少子可以为零。这时少子的梯度不再随电压变化，因此扩散流也不随电压变化。所以反向偏压下，pn 结电流较小且趋于不变。

正向偏压下：

$$\begin{cases} j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) \\ j_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x_n) \end{cases}$$

$$\text{其中 } \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1); \Delta p(x_n) = p_n^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$Q \quad j(x) = j_n(x) + j_p(x) \text{ 且 } j_n(x_n) = j_p(x_p)$$

$$\therefore j = j_n(x_p) + j_p(x_n) = e \left(\frac{D_n n_p^0}{L_n} + \frac{D_p p_n^0}{L_p} \right) (e^{\frac{eV}{KT}} - 1) = j_0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$\text{其中 } j_0 = e \left(\frac{D_n n_p^0}{L_n} + \frac{D_p p_n^0}{L_p} \right)$$

$$\text{反向电压下：} V < 0, \text{ 当 } e|V| \gg KT \text{ 时， } e^{\frac{eV}{KT}} \rightarrow 0$$

$$\therefore j = -j_0 \quad \text{称 } -j_0 \text{ 为反向饱和电流}$$

四、①金属半导体功函数差对 MOS 结构平带电压影响：

$$\text{金属和半导体间补偿两者功函数之差的接触电势差 } V_m - V_s = \frac{w_s - w_m}{e}$$

$$\therefore V_{FB} = +V_{ms} = \frac{w_m - w_s}{e}$$

②氧化层中电荷对 MOS 结构平带电压的影响：

$$E_i + \frac{Q_f}{\epsilon_i \epsilon_0} = 0 \Rightarrow E_i = -\frac{Q_f}{\epsilon_i \epsilon_0}$$

$$\therefore V_{FB} = -\frac{Q_f}{\epsilon_i \epsilon_0} d_i = -\frac{Q_f}{C_i}$$

从密度 $\rho(x)$ 分布在氧化层中的电荷, $Q_{ox}' = \int_0^{d_i} \rho(x) \frac{x}{d_i} dx$

$$\therefore V_{FB} = -\frac{1}{C_i} \int_0^{d_i} \rho(x) \frac{x}{d_i} dx$$

③功函数差及氧化层电荷均存在时:

$$V_{FB} = V_{ms} - \frac{Q_i}{C_i} - \frac{Q_{ox}'}{C_i}$$

五(参照 1998 年, 六)

六、1、 $Q N_D < N_{Au} \therefore$ 知 E_F 在 E_A 和 E_D 之间

$Q N_D = \frac{1}{2} N_{Au} \therefore$ 知 Au 有一半被补偿了 (右图) $\therefore E_F$ 位于 E_A 附近

2、Au: $2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$

Au⁻: $2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$

$$3、\begin{cases} n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} = (1.5 \times 10^{10}) \times e^{\frac{0.03}{0.026}} = 4.76 \times 10^{10} / \text{cm}^3 \\ p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} = (1.5 \times 10^{10}) \times e^{-\frac{0.03}{0.026}} = 0.47 \times 10^{10} / \text{cm}^3 \end{cases}$$

1997 年

一、①平带电压: (P364)

MIS 结构中, 半导体表面与内部能带平直, 没有弯曲 (即平带时), MIS 结构的电容即为平带电容

$$C_{sFB} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{L_D} (L_D \text{ 为德拜屏蔽长度, } L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s kT}{e^2 p_0}})$$

对于 p 型半导体: $p(x) = p_0 e^{-\frac{eV(x)}{kT}}$

在 $\frac{eV(x)}{kT} = 1$ 的小信号条件下: $p - p_0 = p_0 (e^{-\frac{eV(x)}{kT}} - 1) \approx -\frac{ep_0 V(x)}{kT}$

$$\frac{d^2 x}{dx^2} = -\frac{e(p - p_0)}{\epsilon_s \epsilon_0} = \frac{e^2 p_0 V(x)}{\epsilon_s \epsilon_0 kT} \quad (x \rightarrow \infty, V \rightarrow 0; x = 0, V = V_s)$$

$$\therefore V = V_s e^{-\frac{x}{L_D}} \quad (L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{e^2 p_0}})$$

电荷分布 $\rho(x) = e(p - p_0) = -\frac{e^2 p_0}{kT} V_s e^{-\frac{x}{L_D}}$ (同样小信号条件下)

$$\therefore \text{平带时半导体电容 } C_{\text{SFB}} = -\frac{dQ}{dV_s} = \int_0^\infty \frac{d\rho}{dV_s} dx = -\frac{e^2 p_0}{KT} \int_0^\infty e^{-\frac{x}{L_D}} dx = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{L_D}$$

$$\text{平带时 MIS 结构电容 } C_{FB} = \frac{1}{\frac{d_i}{\epsilon_0 \epsilon_i} + \frac{L_D}{\epsilon_s \epsilon_0}} = \frac{C_i}{1 + \frac{\epsilon_i L_D}{\epsilon_s d_i}}$$

②等电子陷阱 (P93)

在晶体中掺入与主晶格原子价电子数相等的杂质, 若该杂质起收容电子的作用, 则为等电子陷阱。

③准平衡和准费米能级

非平衡半导体中, 电子与空穴没有统一的费米能级, 但是电子、空穴有各自的费米能级, 这种状态称为准平衡, 电子、空穴的费米能级称为准费米能级。

$$\text{二、① } N_D = 5 \times 10^{14} / \text{cm}^3 < N_A = 1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$$

电子完全填充受主能级, 而受主能级只是部分填满。

$$1 - f_A = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_A} e^{\frac{E_F - E_A}{KT}}} = \frac{1}{2} \quad (p = N_A - N_D = 0.5 \times 10^{15} / \text{cm}^3)$$

Q 认为 $g_A = 1 \therefore E_F \approx E_A$, 费米能级在 E_A 处, 即导带下 0.65eV

$$\text{②Q GaAs 的 } \epsilon_g = 1.42 \text{eV}$$

$\therefore E_F > E_i$ 即为 n 型。

$$\text{③ } \delta = ne\mu_n + pe\mu_p \approx ne\mu_n = 0.5 \times 10^{15} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 8800 =$$

$$\rho = \frac{1}{\delta} =$$

$$\text{④ } p = N_A - N_D = 0.2 \times 10^{15} / \text{cm}^3 \text{ (Cr 相当于施主能级)}$$

$$\therefore f_A = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_A - E_F}{KT}}} = \frac{1}{5} \quad \text{和上面的 } \frac{1}{2} \text{ 比较知 } E_F \downarrow$$

p (即相当于 n) 的数目 \downarrow

$\therefore \delta \downarrow; \rho \uparrow$

$$\text{三、过剩载流子一维扩散分布, 连续性方程: } \frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\nabla J - \frac{\Delta p(x)}{\tau_p}$$

$$J = -D_p \frac{dp(x)}{dx} \quad p(x) = p_0 + \Delta p(x)$$

$$Q \frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\nabla J - \frac{\Delta p(x)}{\tau_p} = 0$$

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

$$\therefore \Delta p(x) = C_1 e^{\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x}{L_p}}, L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$Q \ x \rightarrow 0 \text{ 时, } \Delta p(x) \rightarrow (\Delta p)_0; x \rightarrow \infty \text{ 时, } \Delta p(x) \rightarrow 0$$

$$\therefore C_1 = 0, C_2 = (\Delta p)_0$$

$$\therefore \Delta p(x) = (\Delta p)_0 e^{-\frac{x}{L_p}}$$

$$\text{扩散流 } J_p = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} = \frac{D_p}{L_p} \Delta p(x)$$

$(\Delta p)_0$ 为光照表面层中空穴改变量, L_p 为扩散长度 (也是非平衡少子扩散平均长度),

D_p 为空穴扩散系数, $\frac{D_p}{L_p}$ 具有速度的量纲, 为扩散速度。

$$\left. \begin{array}{l} \text{四、俘获电子: } C_n = r_n n (N_t - n_t) \\ \text{激发电子: } E_n = S_n n_t \\ \text{俘获空穴: } C_p = r_p p n_t \\ \text{激发空穴: } E_p = S_p (N_t - n_t) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} n_t = \frac{N_t}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{KT}}} \\ N_t - n_t = \frac{N_t}{1 + e^{-\frac{E_t - E_F}{KT}}} \end{array}$$

$$\text{热平衡下: } C_n = E_n, C_p = E_p$$

$$\text{可得: } S_n = n_1 r_n, n_1 = N_c e^{-\frac{E_c - E_t}{KT}}$$

$$S_p = p_1 r_p, p_1 = N_v e^{-\frac{E_t - E_v}{KT}}$$

$$\text{稳态下 } R = C_n - E_n = C_p - E_p$$

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

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

$$\text{讨论: } \begin{cases} n_1 = N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i - E_c}{KT}} \\ p_1 = N_v e^{-\frac{E_v - E_i}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i - E_v}{KT}} \end{cases}$$

代入

$$R = \frac{N_i r_n r_p}{r_n(n + n_1) + r_p(p + p_1)} (np - n_i^2). \text{其中 } \tau_p = \frac{1}{N_i r_p} (n\text{型}), \tau_n = \frac{1}{N_i r_n} (p\text{型})$$

$$\therefore R = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_i e^{\frac{E_i - E_c}{KT}}) + \tau_n(p + n_i e^{\frac{E_i - E_v}{KT}})}$$

$$\text{假设 } r_p = r_n = r, \therefore \tau_p = \tau_n = \frac{1}{N_i r}$$

$$\therefore R = \frac{N_i r (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh\left(\frac{E_i - E_i}{KT}\right)}, \text{当 } E_c \approx E_i \text{ 时, } R \rightarrow +\infty$$

\therefore 位于禁带中央附近的深能级是最有效的复合中心。

$$\text{五、p区压降: } V_p = \frac{e N_A x_p^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_p}$$

$$\text{N区压降: } V_n = \frac{e N_D x_n^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_n}$$

$$\therefore V_D - V = V_p + V_n = \frac{e N_A x_p^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_p} + \frac{e N_D x_n^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_n}$$

$$\text{Q } N_D x_n = N_A x_p \therefore \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$$\therefore \frac{x_n}{x_n + x_p} = \frac{N_A}{N_A + N_D}; \frac{x_p}{x_n + x_p} = \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

$$\text{令 } x_n + x_p = d, \therefore x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} d, x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} d$$

$$\begin{aligned}\therefore (V_D - V) &= \frac{eN_A N_D^2 d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_p (N_A + N_D)^2} + \frac{eN_D N_A^2 d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_n (N_A + N_D)^2} = \frac{eN_A N_D (N_D \varepsilon_n + N_A \varepsilon_p) d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_n \varepsilon_p (N_A + N_D)^2} \\ &= \frac{eN^* d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_n}, \text{其中 } N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}, \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_p (N_A + N_D)}{N_D \varepsilon_n + N_A \varepsilon_p} \\ \therefore d &= \left[\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon^* (V_D - V)}{eN^*} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_p} = \frac{x_p}{\varepsilon_0 \varepsilon_n} + \frac{x_p}{\varepsilon_0 \varepsilon_p} = \frac{N_A d}{\varepsilon_0 \varepsilon_n (N_A + N_D)} + \frac{N_D d}{\varepsilon_0 \varepsilon_p (N_A + N_D)} \\ &= \frac{(N_A \varepsilon_p + N_D \varepsilon_n) d}{\varepsilon_0 \varepsilon_n \varepsilon_p (N_A + N_D)} = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon^*} \\ \therefore C &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon^*}{d} = \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon^* e N^*}{2(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}} [PF/cm^2]\end{aligned}$$

1998 年

一、①准平衡（参照 1997 年）

②带间俄歇复合：载流子从高能级向低能级跃迁，发生电子-空穴复合时，把多余的能量传给另一个载流子，使这个载流子被激发到能量更高的能级上去，当它重新跃迁回低能级时，多余的能量常以声子形式放出，这种复合称为俄歇复合。

③扩散电容：和少子扩散区过剩载流子存储相联系的电容称为扩散电容。这种电荷存储在正向偏压下比较明显。

④深耗尽（参照 1999 年）

⑤调制掺杂异质结构：用同一种材料，通过不同类型的掺杂来调制其能带结构形成量子阱。

二、①p 的浓度为 $2.5 \times 10^{14} / cm^3$ 时，其电子完全用来填充 Fe 的第一重受主能级，由于 p

的浓度小于 Fe 的浓度。第一重受主能级只是部分被填充，费米能级位于 E_{A1} 附近，

由于在室温下，发生强电离，空穴浓度 $p = 5 \times 10^{14} - 2.5 \times 10^{14} = 2.5 \times 10^{14} / cm^3$

$$f_A(E_{A1}) = \frac{1}{2} = \frac{1}{1 + e^{\frac{-E_{A1} + E_F}{kT}}}, E_{A1} \approx E_F$$

$$\delta = \mu_n en + \mu_p ep \approx \mu_p ep = 2.5 \times 10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1900$$

② $N_D = 7.5 \times 10^{14} / cm^3$ 时， $N_A < N_D < 2N_A$ ，则 E_{A1} 全部填满， E_{A2} 填充一半，故 E_F

在 E_{A2} 附近，Ge 表现为 n 型，相当于 E_{A2} 为施主能级，即有 N_A 个施主，有 $2(N_A - N_D)$ 个被补偿。

考 虑 到 300k 时 , Ge 全 部 电 离 , 则 :

$$f_A(E_{A2}) = \frac{1}{2} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_{A2} - E_F}{KT}}} \therefore E_F = E_{A2} + KT \ln 2 = E_c - 0.252$$

$$\delta = \mu_n n e = 2.5 \times 10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3900$$

三、霍尔效应在半导体中的主要作用：(2003)

①判断半导体的导电类型

②利用霍尔系数测定半导体中载流子浓度, $n = \frac{r_H}{|R|e}$

③利用霍尔效应测量载流子浓度随温度的变化关系,可确定杂质的电离能(低温下测量)

④霍尔系数和电导率的测量可确定载流子的迁移率, $\mu_H = |R_H \delta|$

四、小信号下, 势垒边界有少子的积累 $\begin{cases} n(x_p) = n_p^0 e^{\frac{eV}{KT}} \\ p(x_n) = p_n^0 e^{\frac{eV}{KT}} \end{cases}$

$$\therefore \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1), \Delta p(x_n) = p_n^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$\begin{cases} j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) = e \frac{L_n}{\tau_p} \Delta n(x_p) \\ j_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x_n) = e \frac{L_p}{\tau_p} \Delta p(x_n) \end{cases}$$

$$Q \quad j_n(x_n) = j_p(x_p)$$

$$\therefore j = j_n(x_p) + j_p(x_n) = e \left(\frac{D_n n_p^0}{L_n} + \frac{D_p p_n^0}{L_p} \right) (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

反向电压时, V为负值, 该电流公式仍适用, $j < 0$, 电流方向反向, 此时, 在空间

电荷区边界造成的是少子欠缺, 少子电流实际是扩散区的产生电流。

五、在升温条件下 ($150^\circ C - 200^\circ C$) 对 MIS 结构施加负偏压, 可把 SiO_2 中的可动钠离子

趋至金属和 SiO_2 界面 (温度处理或 BT 处理), 这时可动电荷对平带电压无贡献:

$$V_{FB1} = V_{ms} - \frac{Q_f}{C_i}$$

若升温加正偏压, 则可将可动钠离子驱动至 $SiO_2 - Si$ 界面。此时平带电压 V_{FB} 为:

$$V_{FB2} = V_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} - \frac{Q_{ox}}{C_i}, \text{其中 } Q_{ox} \text{ 为 Si-SiO}_2 \text{ 界面 Na 离子电荷密度}$$

V_{FB1} 、 V_{FB2} 可由两次温度偏压处理后分别测量得到的 C-V 特性来确定, 测量通常在高频下

$$\therefore Q_{ox} = C_i(V_{FB1} - V_{FB2}) = C_i \Delta V_{FB1} \quad (C_i \text{ 为单位面积 SiO}_2 \text{ 层电容})$$

$$\therefore \text{单位面积钠离子数为 } N_{Na} = \frac{Q_{ox}}{e}$$

- 七、沿等能面椭球旋转对称轴 $m_l > m_t$
- Si 的导带极小值在 k 空间 $\langle 100 \rangle$ 方向, 能谷中心与 Γ 点 ($k=0$) 的距离是与 x 点 ($\langle 100 \rangle$ 方向布里渊区) 距离的 $\frac{5}{6}$, 共有 6 个等价能谷, 形状为旋转椭球。
 - Ge 导带极小值在 $\langle 111 \rangle$ 方向边界 L 点, 在简约布里渊区有 4 个等价谷, 其等能面为托球形。
 - Si、Ge 的价带结构: 由四个带组成, 在价带顶附近有三个带, 两个最高的在 $k=0$ 处简并为扭曲球面。
 - Si、Ge 导带底和价带顶不在 k 空间相同点 (间接禁带半导体)
 - GaAs
 - 导带、价带极值都位于 $k=0$ 处, 导带区有 $\langle 100 \rangle$ 极值和 $\langle 111 \rangle$ 极值
 - 等能面为球面
 - 价带也有一个重空穴带, 一个轻空穴带 ($k=0$ 点) 和自旋耦合分裂的第三个能带。
 - GaAs
 - 导带、价带极值都位于 $k=0$ 处, 导带区有 $\langle 100 \rangle$ 极值和 $\langle 111 \rangle$ 极值。
 - 等能面为球面
 - 价带也有一个重空穴带, 一个轻空穴带 ($k=0$ 点) 和自旋耦合分裂的第三能带。

GaAs 和 Si 的物理性质差异及应用中优缺点:

- ① GaAs: 直接禁带半导体 \rightarrow 光学光电子器件
- ② Si: 间接禁带半导体 \rightarrow 复合几率小 (τ 值大), 用于电子器件、双极器件。
- ② GaAs 有电子迁移率, 约为 Si 的 6 倍, 可用于制作高频、高速分立器件集成电路。
- ③ GaAs 有大的 ϵ_g , 因此本征载流子激发温度高, 适用于高温环境。
- ④ GaAs 少子寿命短 (ϵ_g 值大), 抗辐射能力强。
- ⑤ GaAs 衬底电阻率高, 几近绝缘, 可作高频器件绝缘介质, 高速 IC 隔离介质。
- ⑥ 硅单晶工艺成熟, 成本比 GaAs 低, 而且 GaAs 工艺复杂。
- ⑦ 器件工艺上 GaAs 难于做 MIS 结构, 给工艺带来困难, 远不如硅平面工艺。

1999 年

- 一、①态密度有效质量: 导带具有 S 个能谷, 并具有旋转椭球等能面, m_l 和 m_t 分别为纵向和横向有效质量。则相应的态密度可表示为:

$$g(E) = 4\pi S \frac{(8m_l m_t^2)^{\frac{1}{3}}}{h^3} E^{\frac{1}{2}} = 4\pi \frac{(2m_d)^{\frac{3}{2}}}{h^3} E^{\frac{1}{2}}, \quad m_d = (S^2 m_t^2 m_l)^{\frac{1}{3}}, \quad m_d \text{ 称为状态密度有效质量。}$$

②隧道二极管：江崎首先用隧道效应正确的解释了以前常被人们观察到的反常伏安特性，这种伏安特性与正常 pn 结特性相比，在正向低偏压区出现了显著的反常电流：在小偏压下，电流一开始随正偏压增加，达到一个峰值，继而下降。这里出现了负微分电导区（ $dI/dV < 0$ ）。但在更高的电压下，逐渐与正常 pn 结趋于一致。具有上述特性的二极管称为隧道二极管（或江崎二极管），负阻区可用来进行微波放大或微波振荡。

③深耗尽：如果偏压的变化十分迅速，以致在覆盖整个偏压的时间内，在耗尽层中产生的电子空穴对远小于形成强反型层所需要的电荷量。那么即使偏压的范围远超过 V_T ，也不能形成强反型层，这种情况下半导体中的屏蔽电荷只能是耗尽层电荷，耗尽层的宽度将不再被限制在 dM ，它将随偏压增加。与此相应， V_s 可以超过 2 倍的 V_F ，这种情况称为深耗尽。

二、1、 Au^- , Au^+ , Au

2、

3、 E_F 位于 E_A 附近，因为这时 E_A 能级被电子填充一半，所以必定位于 E_A 附近，也就是位于禁带上半部，因此此时导电类型为 n 型。

此时相当于 Au 在 n 型 Si 中， $N_{Au} > N_D$ ，全部施主电子转移到 Au 的受主能级上，

从而 E_F 被钳制在受主附近，表现为 n 型。

4、① E_F 在 E_c 、 E_A^{Au} 之间：掺 n 型施主杂质，其量多于 Au 的数量（ $N_D > N_{Au}$ ）。

② E_F 在 E_A^{Au} 、 E_D^{Au} 之间： $\begin{cases} \text{掺入少量 n 型施主杂质，其量小于 Au 的数量。} \\ \text{掺入少量 p 型受主杂质，其量小于 Au 数量。（两者均可）} \end{cases}$

③ E_F 在 E_D^{Au} 、 E_v 之间，掺入大量 p 型受主杂质，其量大于 Au 的数量。

三、非均匀半导体中，考虑扩散，电流可一般表示为： $j = n\mu_n \frac{dE_c}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx}$ ①

载流子浓度 n 随 $(E_c - E_F)$ 变化： $n(x) = N_c e^{\frac{E_c(x) - E_F(x)}{KT}}$

∴ 载流子浓度梯度为： $\frac{dn(x)}{dx} = N_c e^{\frac{E_c(x) - E_F(x)}{KT}} \left[-\frac{1}{KT} \frac{d(E_c(x) - E_F(x))}{dx} \right]$

$$= \frac{n(x)}{KT} \left[-\frac{d(E_c(x) - E_F(x))}{dx} \right] \quad ②$$

将②代入①中，并考虑到非简并下爱因斯坦关系： $D = \frac{KT}{e} \mu_n$

$$\begin{aligned} \therefore j &= n(x) \mu_n \frac{dE_c}{dx} + e \cdot \frac{KT}{e} \mu_n \cdot \frac{n(x)}{KT} \left[-\frac{d(E_c(x) - E_F(x))}{dx} \right] \\ &= n(x) \mu_n \frac{dE_{FE}}{dx} \end{aligned}$$

四、1、在 $\Delta n \neq \Delta p$ 的一般情况下，多子寿命和少子不相等 ($Q \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$)

2、①直接辐射复合

复合速率： $R = rnp$

产生速率： $G = G_0 = R_0 = rn_0 p_0 = rn_i^2$

\therefore 电子空穴对净复合速率： $R - G_0 = r(np - n_i^2)$

②直接俄歇复合

复合速率： $R_e = C_n n^2 p, R_n = C_p np^2$

产生速率： $G_e = ng_n, G_n = pg_p$

平衡时： $R_{e0} = G_{e0} \Rightarrow C_n n_0^2 p_0 = n_0 g_n \Rightarrow g_n = C_n n_i^2$

$R_{n0} = G_{n0} \Rightarrow C_p n_0 p_0^2 = p_0 g_p \Rightarrow g_p = C_p n_i^2$

\therefore 复合速率： $(R_e - G_e) + (R_n - G_n)$

$$= (C_n n^2 p - n C_n n_i^2) + (C_p np^2 - p C_p n_i^2)$$

$$= np(C_n n + C_p p) - n_i^2(C_n n + C_p p) = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2)$$

③间接复合：

电子激发： $C_n = r_n n(N_t - n_t)$ 空穴激发： $C_p = r_p p n_t$

电子俘获： $E_n = S_n n_t$ 空穴俘获： $E_p = S_p (N_t - n_t)$

热平衡时： $C_n = E_n, C_p = E_p$

$$\text{将 } n_t^0 = \frac{N_t}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{KT}}}, N_t - n_t^0 = \frac{N_t}{1 + e^{\frac{E_t - E_F}{KT}}} \text{ 代入 } r_n n(N_t - n_t) = S_n n_t^0$$

$$\text{得 } S_n = r_n N_t e^{\frac{E_c - E_t}{KT}} = r_n n_1, n_1 = N_t e^{\frac{E_c - E_t}{KT}}$$

$$\text{同理 } S_p = r_p N_v e^{\frac{E_t - E_v}{kT}} = r_p p_1, p_1 = N_v e^{\frac{E_t - E_v}{kT}}$$

$$\text{稳态时: } C_n - E_n = C_p - E_p = R$$

$$\text{即 } r_n n(N_t - n_t) - r_n n_1 n_t = r_p p n_t - r_p p_1 (N_t - n_t)$$

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

$$\therefore R = C_n - E_n = \frac{N_t r_n r_p}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} (np - n_1 p_1) \quad \text{Q } n_1 p_1 = N_c N_v e^{\frac{E_c - E_v}{kT}} = n_i^2$$

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

综上三点可以看出, R 均可写成 $R = \text{reff} (np - n_i^2)$ 形式, 其中 reff 对应不同情况下系数。

$$R = \text{reff} (np - n_i^2) = \text{reff} [n_0 \Delta p + p_0 \Delta n + \Delta n \Delta p]$$

$$\text{又 Q } n \approx p \text{ 即 } n_0 + \Delta n \approx p_0 + \Delta p \therefore n_0 \Delta p \approx p_0 \Delta n$$

$$\therefore R \approx \text{reff} n_0 \Delta p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

$$\therefore R \text{ 只与过剩少子有关, } \tau = \tau_p = \frac{1}{\text{reff} n_0}$$

$$3、\text{少子变化速率方程: } \frac{d\Delta p}{dt} = G - \frac{\Delta p}{\tau_p} - r_p N_t \Delta p + r_p p_1 \Delta p_t$$

$$\text{陷阱上空穴变化速率: } \frac{d\Delta p_t}{dt} = r_p N_t \Delta p - r_p p_1 \Delta p_t$$

$$\text{稳态下: } \frac{d\Delta p}{dt} = \frac{d\Delta p_t}{dt} = 0 \therefore \Delta p_t = \frac{N_t}{p_1} \Delta p, \text{ 且 } \Delta p = \tau_p G.$$

因此, 过剩少子的浓度并不直接受陷阱存在的影响。

$$\text{多子浓度 } \Delta n = \Delta p + \Delta p_t = (1 + \frac{N_t}{p_1}) \Delta p.$$

$$\therefore \text{稳态下, 在 } p_1 \text{ 很小, } \frac{N_t}{p_1} \gg 1 \text{ 的条件下, 由于大量空穴被陷阱俘获, 过剩多子浓度可}$$

比无陷阱时高出许多倍。

$$\begin{aligned}\text{附加光电导可表示为: } \Delta\delta &= e\Delta p \left[\mu_p + \mu_n \left(1 + \frac{N_t}{p_1}\right) \right] \\ &= e\tau_p G \left[\mu_p + \mu_n \left(1 + \frac{N_t}{p_1}\right) \right]\end{aligned}$$

因此, 在 $\frac{N_t}{p_1} \gg 1$ 条件下, 电导增量比无陷阱时的 $e\tau_p G(\tau_p + \tau_n)$ 大得多, 因此陷阱的

存在可以显著增加光电导的灵敏度。

五、1、空间电荷区边界 x_p 和 x_n 处少子扩散电流 $j_n(x_p), j_p(x_n)$.

$$\begin{cases} j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) = \frac{eL_n}{\tau_n} \Delta n(x_p) \\ j_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x_n) = \frac{eL_p}{\tau_p} \Delta p(x_n) \end{cases}$$

通过 pn 结总电流: $j = j_p(x) + j_n(x)$ 。且略去空间电荷区复合。

$$\therefore j = j_p(x_n) + j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) + \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x_n) \quad (1)$$

x_p 处电子浓度由平衡时的 n_p^0 增加为: $n(x_p) = n_p^0 e^{\frac{eV}{kT}}$

对空穴: $p(x_n) = p_n^0 e^{\frac{eV}{kT}}$

$$\therefore \text{过剩载流子: } \begin{cases} \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \\ \Delta p(x_n) = p_n^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \end{cases} \quad \text{代入①中, 有}$$

$$j = \left(\frac{eD_n}{L_n} n_p^0 + \frac{eD_p}{L_p} p_n^0 \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) = e \left(\frac{D_p p_n^0}{L_p} + \frac{D_n n_p^0}{L_n} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$\because L_p^2 = D_p \tau_p, L_n^2 = D_n \tau_n \therefore j = e \left(\frac{L_p p_n^0}{\tau_p} + \frac{L_n n_p^0}{\tau_n} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$\because n_i^2 = n_p^0 p_n^0 = n_n^0 p_p^0 \therefore j = e \left(\frac{L_p}{\tau_p n_n^0} + \frac{L_n}{\tau_n p_p^0} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) n_i^2$$

2、正向偏压下, 势垒降低。

扩散电流超过漂移电流, 形成正电流。

由上式知, $V > 0$, 则 $e^{\frac{eV}{kT}} - 1 > 0, j > 0$, 为复合电流

$V < 0, j < 0$, 电流反向, 电子、空穴由空间电荷区流向 n 区和 p 区, 为产生电流。

3、 $|eV| \gg kT$ 条件下, $j_x - j_0$, 即 j_0 为反向饱和电流。

$$j_0 = e \left(\frac{D_p}{\tau_p n_n^0} + \frac{D_n}{\tau_n p_p^0} \right) n_i^2$$

$$= e \left(\frac{D_p}{\tau_p n_n^0} + \frac{D_n}{\tau_n p_p^0} \right) (N_c N_v) e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$$\therefore E_g \uparrow \rightarrow j_0 \downarrow$$

但反向电流对温度十分敏感, E_g 越大, 允许工作 T 越高。

$$\therefore E_g \uparrow \rightarrow \text{工作温度 } T \uparrow$$

六、1、强反型 (半导体表面)

$$2、\text{阈值电压 } V_T = -\frac{Q_{BM}}{C_i} + 2V_F$$

$$\text{令 } V_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s e N_A}{C_i^2} \therefore V_T = \sqrt{\frac{4\epsilon_0 \epsilon_s e N_A V_F}{C_i^2}} + 2V_F = 2 \left[(V_0 V_F)^{\frac{1}{2}} + V_F \right]$$

3、P375

$$4、V_{FB} = V_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} - \frac{Q_{ox}'}{C_i} = V_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} - \frac{\int_0^{di} \rho(x) x dx}{di C_i}$$

Q_f : 绝缘层在半导体一侧表面固定电荷。

$$Q_{ox}' = \int_0^{di} \rho(x) \frac{x}{di} dx$$

$$Q_n = -C_i (V_G - V_T)$$

高于阈值的那部分由反型层载流子贡献, p 型半导体的反型层载流子为电子。

$$5、\text{单位面积电荷量: } Q_n = -C_i (V_G - V_T)$$

2000 年

- 一、1. 直接禁带半导体: 导带底和价带顶位于 K 空间相同的点, 常用于制作光学电子器件。
间接禁带半导体: 导带底和价带顶不在 K 空间相同的点。复合几率小, 常用于制作电子器件。双极器件。
2. 准费米能级: 在非平衡状态下, 由于导带中的电子和价带中的空穴按能量在各自的能带处平衡分布, 而导带和价带之间总体上又是非平衡的。因此, 不能用统一的费米能

级来描写导带中电子和价带中空穴按能量的分布问题，因而引入准费米能级概念，用 E_{Fn}, E_{Fp} 分别描述导带中电子和价带中空穴。

$$\begin{cases} n = N_c e^{-\frac{E_c - E_{Fn}}{KT}} = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_i}{KT}} \\ p = N_v e^{-\frac{E_{Fp} - E_v}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{KT}} \end{cases}$$

$np = n_i^2 e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{KT}}$ ，可见，准费米能级分裂的程度，显示出与平衡态偏离程度。

3. 平带电容（参照 1997）
4. 带间俄歇复合（参照 1998）
5. 动量弛豫时间：与载流子具有沿某一方向的初始动量相比，散射使它们失去原有动量的现象称作动量弛豫，相邻两次散射的平均时间称为动量弛豫时间。
6. 平带电容： V_0 平带附近，实际电容小于 C_i 。表明积累层中电荷变化也有一定厚度，

存在与 C_i 串联 C_{SFB} 对总平带电容 C_{FB} ： $\frac{1}{C_{FB}} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_{SFB}}$

$$p = p_0 e^{\frac{eV}{KT}}, p - p_0 = -\frac{ep_0 V}{KT}$$

$$\therefore p(x) = e(p - p_0)$$

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s} = \frac{e^2 p_0}{\epsilon_0 \epsilon_s KT} V(x) \quad V = V_s e^{-\frac{x}{L_D}}, L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s KT}{e^2 p_0}}$$

$$x \rightarrow \infty, V = 0$$

$$x \rightarrow 0, V = V_s$$

$$\therefore \rho(x) = -\frac{e^2 p_0}{KT} V_s e^{-\frac{x}{L_D}}, C = -\frac{dQ_s}{dV_s} = \int_0^\infty \frac{d\rho}{dV_s} dx = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{L_D}$$

$$\therefore C_{FB} = \frac{1}{\frac{di}{\epsilon \epsilon_i} + \frac{L_D}{\epsilon \epsilon_s}} \quad \text{意义是确定非平衡条件下的平带电压。}$$

$$\text{二、 } E = E_c = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \Rightarrow k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

$$N(E) = \frac{2}{(2\pi)^3} \frac{4}{3} \pi k^3 = \frac{8}{3} \pi \frac{(2mE)^{\frac{3}{2}}}{h^3}$$

$$\therefore g(E) = 4\pi \frac{(2m)^{\frac{3}{2}}}{h^3} E^{\frac{1}{2}} (\text{各向同性})$$

三、平衡下非简并半导体有: $n(x) = n(0)e^{\frac{eV(x)}{KT}}$ (非简并条件下).

$$\therefore J_n = -D_n \frac{dn}{dx} = -\frac{eD_n}{KT} n(0)e^{\frac{eV(x)}{KT}} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{eD_n}{KT} n(x)E. (E = -\frac{dV(x)}{dx})$$

Q 扩散电流与漂移电流为 0.

$$\therefore D_n = \frac{KT}{e} \mu_n$$

四、 E_i 位于禁带下部为例: 强 n: $\tau = \frac{1}{N_t r_p}$

$$\text{强 p: } \tau = \frac{1}{N_t r_n}$$

$$\text{弱 n: } \tau = \frac{1}{N_t r_n} \cdot \frac{p_1}{n_0}$$

$$\text{弱 p: } \tau = \frac{1}{N_t r_n} \cdot \frac{p_1}{p_0}$$

在高阻区 p_1 最大, $\frac{r_p p_1}{r_n n_0}$ 和 $\frac{p_1}{p_0}$ 两个因子远大于 1. 正是由于和大的 p_1 相对应的高的再激

率阻碍了复合过程, 降低了复合速率。

∴ 有效的复合中心主要是比费米能级离带边更远的深能级杂质, 因为浅能级杂质因其高的再激发几率而使复合几率大为降低。但在很低温度下当浅能级比 E_F 离带边更远时, 它也可以作为复合中心作用。

五、①正向偏压下:

$$\begin{cases} j_p(x_n) = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x_n) = \frac{eL_p}{\tau_p} \Delta p(x_n) \\ j_n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) = \frac{eL_n}{\tau_n} \Delta n(x_p) \end{cases}$$

$$Q \ n(x_p) = n_p^0 e^{\frac{eV}{KT}}, p(x_n) = p_n^0 e^{\frac{eV}{KT}}$$

$$\therefore \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1), \Delta p(x_n) = p_n^0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$\text{通过 pn 结总电流: } j = j_p(x) + j_n(x) = e \left(\frac{D_p p_n^0}{L_p} + \frac{D_n n_p^0}{L_n} \right) (e^{\frac{eV}{KT}} - 1) = j_0 (e^{\frac{eV}{KT}} - 1)$$

$$\text{其中 } j_0 = e \left(\frac{D_p p_n^0}{L_p} + \frac{D_n n_p^0}{L_n} \right) = e \left(\frac{p_n^0 L_p}{\tau_p} + \frac{n_p^0 L_n}{\tau_n} \right) = e \left(\frac{L_p}{\tau_p n_n^0} + \frac{L_n}{\tau_n p_p^0} \right) n_i^2$$

对于由不同材料构成的 pn 结，即使掺杂情况完全相同， L_p 、 L_n 、 τ_p 、 τ_n 也相近，但

由于禁带宽度 E_g 的差别 j_0 可以有很大不同。

$$Q \quad p_n^0 = n_i^2 / n_n^0, n_p^0 = n_i^2 / p_p^0, \text{ 即 } \propto (e^{-\frac{E_g}{kT}})$$

$$\therefore E_g \uparrow, \text{ 则 } j_0 \downarrow$$

②反向偏压：

少数扩散区的载流子分布不随偏压发生显著变化，反向电流大小稳定在 j_0 值上。

反向电流对温度十分敏感， j_0 通过 p_n^0 、 n_p^0 正比于 $(e^{-\frac{E_g}{kT}})$ ，给 pn 结温度限制， E_g 越大，允许工作温度越高。

$$2、\text{根据平带电容来确定平带电压：根据 } C_i \text{ 和 } N_A \text{ 的测量值，由 } C_{FB} = \frac{C_i}{1 + \frac{\epsilon_i L_D}{\epsilon_s d_i}} \text{ 计算出 } C_{FB}，$$

以 C_{FB} 为高作水平线，它与 C-V 曲线的交点对应的电压就是平带电压。

3、（参照 1998 年——五）

2001 年

一、1. 金刚石结构：金刚石结构是一种由相同原子构成的复式晶格，它是由两个面心立方晶格沿立方对称晶胞的体对角线错开 $\frac{1}{4}$ 长度套构而成的，在这种晶格中，处在不同面心立方晶格中的不等价原子虽然环境不完全相同，但有一共同特点：任一原子都有四个最近邻原子，它们总是处在一个正四面体的顶点上。金刚石结构具有立方对称性。

2. 过剩载流子的扩散长度和扩散速度：考虑少了空穴的一维稳定扩散 $p = p_0 + \Delta p$

$$\therefore J_p = -D_p \frac{dp}{dx} = -D_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

$$\text{积累速率 } A = -\nabla \cdot J_p = D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}$$

$$\text{复合速率 } R = p \Delta p = \frac{\Delta p}{\tau}$$

$$\text{稳定条件下 } A=R, \text{ 即 } D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau} \Rightarrow \Delta p(x) = C_1 e^{\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x}{L_p}}, \text{ 其中 } L_p = \sqrt{D_p \tau}$$

当 $x \rightarrow \infty$ 时, $\Delta p(x) \rightarrow 0$

$$\therefore C_1 = 0, \therefore \Delta p(x) = (\Delta p)_0 e^{-\frac{x}{L_p}}$$

$\therefore L_p$ 代表过剩载流子空穴深入样品的平均距离, 称为扩散长度。

$$Q J_p = -D_p \frac{d\Delta p}{dx} = \frac{D_p}{L_p} \Delta p$$

$\therefore \frac{D_p}{L_p}$ 具有速度的量纲。称为扩散速度。

3. 陷阱效应: 陷阱效应是在有非平衡载流子的情况下发生的一种效应。能级中的电子通过载流子的俘获和产生过程与载流子之间保持平衡。当半导体处于非平衡态, 出现非平衡载流子时, 平衡遭到破坏必然引起杂质能级上电子数目的改变。如果电子增加, 说明能级具有收容部分非平衡电子的作用; 若电子减少, 可看做能级有收容空穴的作用, 杂质能级的这种积累非平衡载流子的作用称为陷阱作用, 有显著陷阱效应的能级称为陷阱, 相应的杂质和缺陷称为陷阱中心。

4. 肖特基势垒: 金属和掺杂浓度不高的半导体形成的接触具有整流特性, 这种特性和半导体表面形成的势垒有关, 而这种势垒叫做肖特基势垒。

5. MOS 结构中的界面态: 表面与空气接触, 会形成一薄的氧化层, 同时还吸附一些杂质原子和离子, 氧化层可使内部表面悬挂键饱和一部分, 使表面态密度相对清洁表面来看较低, 这种态出现在氧化层和半导体的界面, 称为界面。

二、①低温下, 杂质弱电离, 费米能级位于杂质能级和导带之间, 电中性条件有:

$$n = p + N_D - n_D = \frac{N_D}{1 + g_D e^{\frac{E_F - E_D}{KT}}} = \frac{N_D}{g_D} e^{-\frac{E_F - E_D}{KT}}$$

$$\Rightarrow E_F = \frac{E_c + E_D}{2} + \frac{KT}{2} \ln \frac{N_D}{g_D N_c}$$

$$\therefore n = \left(\frac{N_c N_D}{g_D} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_c - E_D}{2KT}}$$

显然, n 以对数坐标表示, 所以 $\ln n$ 随 T 增加线性增加, 斜率 $-\frac{E_g}{2KT}$

②随着温度升高, E_F 开始下降, 当 E_F 低于 E_D 时, 杂质完全电离, 此时还未到达本征

激发温度, 电中性条件: $n = N_D$

这时对应于图中水平一段, 此时电子数达到饱和, 称为饱和。

③温度继续升高一定值后, 本征激发逐渐占据主导地位, 此时 $n = n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2KT}}$,

显然, n 以对数坐标表示, $\ln n$ 随 T 增加迅速增加, 斜率 $-\frac{E_g}{2}$

$$\text{三、} \quad \rho = \begin{cases} eN_D (n\text{型区}) \\ -eN_A (p\text{型区}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon} (-x_n < x < 0) \\ \frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon} (0 < x < x_p) \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{dE}{dx} = \frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon} (-x_n < x < 0) \\ \frac{dE}{dx} = -\frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon} (0 < x < x_p) \end{cases}$$

$$\Rightarrow E(x) - E(-x_n) = \frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon} (x + x_n)$$

$$\text{Q } E(-x_n) = 0 \therefore E(x) = \frac{eN_D x_n}{\epsilon_0 \epsilon} \left(1 + \frac{x}{x_n}\right) = E_M \left(1 + \frac{x}{x_n}\right) (-x_n < x < 0)$$

$$\Rightarrow E(x) - E(0) = -\frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon} x$$

$$\text{Q } E(0) = E_M = \frac{eN_D x_n}{\epsilon_0 \epsilon} \therefore E(x) = \frac{eN_D x_n}{\epsilon_0 \epsilon} - \frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon} x$$

$$\text{Q } E(x_p) = 0 \therefore \text{有 } eN_D x_n = eN_A x_p \therefore E_M = \frac{eN_D x_n}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{eN_A x_p}{\epsilon_0 \epsilon}$$

$$\therefore E(x) = \frac{eN_A x_p}{\epsilon_0 \epsilon} - \frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon} x = E_M \left(1 - \frac{x}{x_p}\right) (0 < x < x_p)$$

$$\text{整理有 } E(x) = \begin{cases} E_M \left(1 + \frac{x}{x_n}\right) (-x_n < x < 0) \\ E_M \left(1 - \frac{x}{x_p}\right) (0 < x < x_p) \end{cases}$$

$$\text{再积分: } V(x) - V(-x_n) = -\frac{E_M}{2x_n} (x + x_n)^2 (-x_n < x < 0) (V(-x_n) = 0)$$

$$V(x) - V(0) = -E_M \left(x - \frac{x^2}{2x_p}\right) \Rightarrow V(x) = V(0) - E_M \left(x - \frac{x^2}{2x_p}\right)$$

$$= -\frac{E_M(x_n + x_p)}{2} + \frac{E_M}{2x_p}(x - x_p)^2$$

$$\therefore V_D - V = |V(x_p) - V(-x_n)| = \frac{E_M}{2}(x_p + x_n)$$

$$Q \text{ 知 } eN_D x_n = eN_A x_p \therefore \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} \therefore \frac{x_n}{x_n + x_p} = \frac{N_A}{N_A + N_D}, \frac{x_p}{x_n + x_p} = \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

令空间电荷区厚度 $d = x_n + x_p$

$$\therefore x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} d; x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} d$$

令 $eN_D x_n = eN_A x_p = eN^* d$, 其中 $N^* = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$ 为约化浓度。

$$\therefore V_D - V = \frac{E_M}{2}(x_n + x_p) = \frac{eN_D x_n}{2\varepsilon_0 \varepsilon} d = \frac{eN^*}{2\varepsilon_0 \varepsilon} d^2$$

$$\Rightarrow d = \left[\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon (V_D - V)}{eN^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = -eN_A x_p = -eN^* d = -\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon eN^* (V_D - V)}$$

$$C(V) = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon eN^*}{2(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{也可用 } C(V) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d} \text{ 求电容})$$

四、①玻尔兹曼积分微分方程: $\frac{\partial f(r, k, t)}{\partial t} = -V \cdot \nabla_r f(r, k, t) - \frac{dk}{dt} \nabla_k f(r, k, t)$

$$+ \frac{V}{(2\pi)^3} \int w(k', k) [1 - f(k)] f(k') dk' - \frac{V}{(2\pi)^3} \int w(k, k') [1 - f(k')] f(k)$$

实空间均匀半导体有 $\nabla_r f(r, k, t) = 0$

在弛豫时间近似下, 有 $\frac{\partial f(r, k, t)}{\partial t} = -\frac{dk}{dt} \nabla_k f(r, k, t) - \frac{f - f_0}{\tau} = 0$

$$\Rightarrow \frac{dk}{dt} \nabla_k f(r, k, t) = -\frac{f - f_0}{\tau}, \text{代入 } \frac{dk}{dt} = \frac{F}{\hbar} = -\frac{eE}{\hbar}$$

$$\Rightarrow \frac{eE}{\hbar} \nabla_k (f_0 + \phi) = \frac{\phi}{\tau} \Rightarrow \phi(k) = \frac{\tau eE}{\hbar} \nabla_k (f_0 + \phi)$$

在 $\phi = f_0$ 条件下, $\phi(k) = \frac{\tau eE}{\hbar} \nabla_k f_0$

$$\textcircled{2} J = - \int \frac{2}{(2\pi)^3} f(k) d^3k \cdot eV$$

$$= - \frac{2e}{(2\pi)^3} \int V \phi(k, x) d^3k = - \frac{2e}{(2\pi)^3} \int V \frac{e\tau E}{h} \nabla_k f_0 d^3k = - \frac{2e^2\tau E}{(2\pi)^3 h} \int V \cdot \nabla \frac{\partial f}{\partial t} \cdot E d^3k$$

电流密度可用张量形式表示成 $j_i = \sum_j \delta_{ij} E_j$

$$\therefore \delta_{ij} = - \frac{2}{(2\pi)^3} \int e^2 \tau V_i V_j \frac{\partial f_0}{\partial t} d^3k$$

当 $i \neq j$ 时, 由于被积分数 V_i 、 V_j 的奇函数, $\therefore \delta_{ij} = 0$

对于球形等能面: $\delta = \delta_{xx} = \delta_{yy} = \delta_{zz}$

$$\therefore \delta = \frac{1}{3} (\delta_{xx} + \delta_{yy} + \delta_{zz}) = \frac{1}{3} \cdot \frac{-2}{(2\pi)^3} \int e^2 \tau V^2 \frac{\partial f_0}{\partial t} d^3k$$

$$\text{由于 } n = \frac{2}{(2\pi)^3} \int f_0 d^3k \therefore \delta = \frac{ne^2(-\frac{2}{3}) \int m^* \tau \frac{V^2}{2} \frac{\partial f}{\partial t} d^3k}{m^* \int f_0 d^3k}$$

$$Q < \tau > = \frac{-\frac{2}{3} \int \tau V^2 \epsilon^{\frac{3}{2}} \frac{\partial f}{\partial t} d\epsilon}{\int f_0 \epsilon^{\frac{1}{2}} d\epsilon}$$

$$\therefore \delta = \frac{ne^2}{m} < \tau >$$

2002 年

- 1、有效复合中心、深能级杂质
- 2、空间电荷区所产生复合电流
- 3、 SiO_2 中可移动 Na^+ 测量, 实验方法
- 4、类氢模型

2003 年

一、1. 金刚石结构的密排面:<111>面两层排布相同原子层以确定的顺序轮流按三种不同方式堆积

2. 霍尔效应: 若沿 X 方向通以电流密度 j_x , 沿垂直于电流的方向 Z 方向施加磁场 B_z ,

那么在垂直于电流和磁场的 Y 方向上将出现横向电场的效应。

在半导体中的应用: ①判别载流子类型 $R>0$, p 型

$R<0$, n 型

②确定载流子浓度

③由 n 的温度关系: $n = \left(\frac{N_D N_c}{g_D} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}}$ 确定杂质电离能

④由 R 和 δ , 得载流子迁移率。 $|R\delta| = r_H \mu = \mu_H$

⑤霍尔器件

3. 复合中心: 能够有效的起复合作用的杂质或缺陷。

$$\text{二、} 1. n_i = n = p \Rightarrow N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}} = N_v e^{-\frac{E_i - E_v}{kT}}$$

$$\Rightarrow \ln \frac{N_c}{N_v} = \frac{-2E_i + E_c + E_v}{kT} \Rightarrow E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

$$= \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$

$$\begin{aligned} n_i &= N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}} = N_c e^{-\frac{E_c}{kT}} e^{\frac{E_c + E_v}{2kT}} \cdot \left(\frac{N_v}{N_c} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_c - E_v}{2kT}} = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (E_g = E_c - E_v) \end{aligned}$$

$$2. n = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} = N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}} e^{-\frac{E_i - E_f}{kT}} = n_i e^{-\frac{E_i - E_f}{kT}}$$

$$p = N_v e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}} = N_v e^{-\frac{E_f - E_i}{kT}} e^{-\frac{E_i - E_v}{kT}} = n_i e^{-\frac{E_f - E_i}{kT}}$$

三、1. $j_{\perp F} = n\mu \frac{d(E_F)_N}{dx} \rightarrow$ 费米能级在空间电荷区不变, 原因: ①与 p 区相比电子浓度大

②空间电荷区很厚

$$2. n(x_p) = n_p^0 e^{\frac{eV}{kT}}$$

$$\therefore \Delta n(x_p) = n_p^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$j_n = \frac{eD_n}{L_n} \Delta n(x_p) = \frac{eD_n}{L_n} n_p^0 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) = \frac{eD_n}{L_n p_p^0} n_i^2 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) = \frac{eD_n}{L_n N_A} n_i^2 (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

3. $N_D \gg N_A$ 时, $j \approx j_n N_D$ 变化, j_n 不变; $N_A \uparrow$, $j_n \downarrow$

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}} \therefore E_g \uparrow, j_n \downarrow$$

四、1.空穴积累（正电荷）；空穴耗尽（负电荷）；空穴耗尽或电子反型（负电荷）

2. III_A ：低频强反型，反型层积累的电子的产生和复合跟得上低频信号的变化，主要靠该电子屏蔽外电场作用

III_B ：高频强反型，反型层中电子的产生与复合跟不上高频信号的变化，亦即反型层中电子数量不随高频信号变化，屏蔽外场主要靠耗尽层空间电荷。

$$V_s = 2V_F, C_m = \frac{1}{\frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_{DM}}} = \left[\frac{di}{\epsilon_i \epsilon_0} + \frac{d_M}{\epsilon_s \epsilon_0} \right]^{-1} \text{ (非平衡)}$$

III_C ：深耗尽，偏压变化十分迅速，反型层来不及建立，屏蔽外电场靠耗尽层空间电荷，

耗尽层宽度不再限制在 d_M ，将随偏压增加而增加， V_s 可以超过 $2V_F$ （非平衡）

$$3. \frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_D} \quad \text{其中 } C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{di}, C_D = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_s e N_A}{2V_F} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_i^2} (1 + 2 \frac{C_i}{C_D} + \frac{C_i^2}{C_D^2}) \quad \text{知 } V_i = \frac{Q_i di}{\epsilon_0 \epsilon_i}, V_s = \frac{e N_A d^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \text{ 且 } V_0 = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_A}{C_i^2}$$

$$\therefore \frac{C_i}{C_D} = \frac{V_i}{V_0}, \frac{C_i^2}{C_D^2} = \frac{2V_s}{V_0}$$

$$\therefore C = C_i / (1 + 2 \frac{V_i}{V_0} + \frac{2V_s}{V_0})^{\frac{1}{2}} \quad QV = V_i + V_s \therefore C = C_i / (1 + \frac{2V}{V_0})^{\frac{1}{2}}$$

五、1.

2.以扩散电流为主（低尖峰）

$$\left\{ \begin{array}{l} j_n = e \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2 N}{N_A} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \\ j_p = e \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2 w}{N_D} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \end{array} \right. \Rightarrow \frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n}{D_p} \frac{L_p}{L_n} \frac{N_D}{N_A} e^{\frac{\epsilon_{gw} - \epsilon_{gN}}{kT}}$$

$$\therefore \epsilon_{gw} - \epsilon_{gN} = kT \text{ 时, } \frac{j_n}{j_p} \text{ 较大 (即使 } N_A > N_D \text{)}$$

3. 宽带一层足够薄，以达到完全耗尽。

ΔE_g 较大，使电子从宽带一侧发射到窄带侧调制掺杂。

2006 年

一、1. 载流子的有效质量：由于半导体中载流子既受外场作用，又受到半导体周期性势场作用，有效质量既概括了半导体内部周期性势场作用，使外场力和载流子加速直接联系起来。在直接由实验测得有效质量后，可以很方便解决载流子的运动规律

2. 热载流子效应：在强电场作用下，迁移率 μ 与场强 E 有关，随着电场强度的增加，漂移速度的增长速度开始减慢，最后达到饱和漂移速率。

弱场下载流子对声子的吸收和发射恰好达到平衡，载流子系统与声子系统处于热平衡。然而在强电场下，载流子从电场中获得的能量，无法很快以声学声子的形式释放给晶格使其平均能量高出晶格系统的能量，即载流子的有效质量 T_e 比晶格温度 T 高，称强场下 $T_e > T$ 的载流子为热载流子。

3. 隧道(齐纳)击穿：在强电场作用下，由隧道效应，使大量电子从价带穿过禁带进入导带所引起的一种击穿现象。

4. 半导体的掺杂补偿效应：在半导体中同时含施主杂质和受主杂质时，设施主杂质浓度 (N_D) 大于受主杂质浓度 (N_A)。在低温下，施主上的电子将首先填充受主能级，这种情况称为半导体的掺杂补偿效应，补偿的结果在较高温度下施主最多只能向导带提供 ($N_D - N_A$) 个电子。

5. 非平衡载流子(过剩载流子)的寿命：非平衡载流子产生后，通过半导体的内部作用复合而消失，每个非平衡载流子从产生到复合的生存时间有长有短，所有非平衡载流子平均生存时间，叫寿命 (τ)。

二、1. Si 为金刚石结构，金刚石结构是一种由相同原子构成的复式晶格，它是由两个面心立方晶格沿立方对称晶胞的体对角线错开 $\frac{1}{4}$ 长度套构而成。在这种晶格中，处在不同面心立方晶格中的不等价原子虽然环境不完全相同，但有一个共同特点：任一原子都有四个最近邻原子，它们总是处在一个正四面体的顶点上，近邻原子连线在 $\langle 111 \rangle$ 方向。正四面体侧面 $\{111\}$ 面， $\{1\bar{1}1\}$ 面是双层密排面，金刚石双层密排面 ABCABC..... 排列，金刚石结构具有立方对称性。

Si 是典型的共价晶体，其四面体结构正是共价键的饱和性和方向性决定的。

每个 Si 原子的平均价电子数是 4，正是这四个价电子形成的四个共价键决定了 Si 的四面体结构。在 Si 的四面体结构共价晶体中，共价键并不是以孤立原子的电子波函数为基础形成的。最外面的价电子壳层有 1 个 S 轨道和 3 个 P 轨道，处于 P 态中的电子形成的共价键应相互垂直，但实际形成的四个共价键之间有相同的夹角： $109^\circ 28'$ 。

$$\Psi_1 = \frac{1}{2}(\Psi_s + \Psi_{px} + \Psi_{py} + \Psi_{pz})$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{2}(\Psi_S + \Psi_{PX} - \Psi_{PY} - \Psi_{PZ})$$

$$\Psi_3 = \frac{1}{2}(\Psi_S - \Psi_{PX} + \Psi_{PY} - \Psi_{PZ})$$

$$\Psi_4 = \frac{1}{2}(\Psi_S - \Psi_{PX} - \Psi_{PY} + \Psi_{PZ})$$

即发生了轨道杂化

以上述 SP^3 杂化轨道为基础形成共价键，系统能量最低，可以证明，在 SP^3 杂化轨道中，价电子云集中于四面体四个顶角方向上，所以 Si 具有四面体结构。

2. 电子迁移率 $\mu_n = \frac{|V_d|}{E}$ ，指在单位电场作用下，电子的漂移速度，也可以说迁移率是反映物体中载流子在电场作用下做定向运动难易程度的物理量。

$$\text{知 } \mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n^*}, \mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p^*}; \text{ 且 } \frac{1}{\tau} = P = P_I + P_{II} + P_{III} + \dots$$

原子性晶体中，起主要作用的是电离杂质散射和品格散射（主要指长纵声学波的散射）。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_L} \quad I: \text{电离杂质散射。} \quad L: \text{声学波散射}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_L} \quad (\text{强简并下运用})$$

在低温下，提高温度使 μ 增大，此时以电离能杂质散射为主。

在较高温度下（包括室温），此时以声学波散射为主，降低温度使 μ 增大。

相同温度下，掺杂浓度越低， μ 越大。

$$Q\tau = \frac{8\pi^2 \epsilon^2 \epsilon_0^2 m^2 V^3}{N_I e^{\Delta} Z^4} \cdot \frac{1}{\ln(1 + \frac{4\pi \epsilon^2 \epsilon_0^2 m^2 V^4}{N_I e^{\Delta} Z^2})} \quad (\text{电离杂质散射})$$

$$\text{近似认为 } \tau \propto \frac{1}{N_I} \therefore \mu \propto \frac{1}{N_I}$$

3. $\begin{cases} \text{直接复合: 电子直接跃迁到价带的某一空状态, 又称为带带复合。} \\ \text{间接复合: 电子在跃迁到价带某一空状态前还要经历某一(或某些)中间状态。} \end{cases}$

$$\text{直接复合: } R = r(np - n_i^2)$$

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

$$\text{小注入下 } (\Delta n, \Delta p = (n_0 + p_0)), \tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)}, \text{ 即在温度和掺杂一定时, 少子寿}$$

寿命只与多子浓度和复合几率 r 成反比，与注入条件无关， $\therefore \delta \uparrow, \tau \uparrow$ 。

大注入下 ($\Delta n, \Delta p \gg (n_0 + p_0)$), $\tau = \frac{1}{r\Delta p}$ ，说明少子寿命决定于非平衡载流子浓度，所以在复合过程中，少子寿命不是常数。

直接复合在直接禁带半导体或窄禁带半导体中易发生。

带间俄歇复合主要发生在大注入或高掺杂或窄禁带半导体及高温情况下。

$$\text{间接复合: } R = \frac{N_i r_n r_p}{(n + n_1) r_n + r_p (p + p_1)} (np - n_i^2)$$

$$\text{小注入下: } \tau_n = \frac{1}{r_n N_i} (\text{强P}), \quad \tau_p = \frac{1}{r_p N_i} (\text{强N})。$$

$$\text{大注入下: } \tau = \tau_n + \tau_p$$

间接复合在间接禁带半导体中易发生。

三、① $\rho = e(N_D - N_A) = -eax$.

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon} \quad \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon} \Rightarrow E(x) - E(-x_n) = \int_{-x_n}^x \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon} dx = -\frac{ea}{2\epsilon_0 \epsilon} (x^2 - x_n^2)$$

$$Q \quad E(-x_n) = 0$$

$$\therefore E(x) = -\frac{ea}{2\epsilon_0 \epsilon} x^2 + \frac{ea}{2\epsilon_0 \epsilon} x_n^2 \quad (-x_n < x < x_p)$$

$$\int_{-x_n}^x dV = \int_{-x_n}^x -E(x) dx = \int_{-x_n}^x \left(\frac{eax^2}{2\epsilon_0 \epsilon} - \frac{eax_n^2}{2\epsilon_0 \epsilon} \right) dx$$

$$\therefore V(x) - V(-x_n) = \frac{eax^3}{6\epsilon_0 \epsilon} + \frac{eax_n^3}{6\epsilon_0 \epsilon} - \frac{eax_n^2 x}{2\epsilon_0 \epsilon} + \frac{eax_n^2}{2\epsilon_0 \epsilon} = \frac{ea}{\epsilon_0 \epsilon} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x_n^2 x}{2} + \frac{2x_n^3}{3} \right)$$

$$Q \quad V(0) = 0 \therefore -V(-x_n) = \frac{2eax_n^2}{3\epsilon_0 \epsilon}$$

$$\therefore V(x) = \frac{eax^3}{6\epsilon_0 \epsilon} - \frac{eax_n^2 x}{2\epsilon_0 \epsilon} \quad (-x_n < x < x_p)$$

四、① 设 $\phi_M < \phi_S$ $\therefore eV_{ms} = \phi_S - \phi_M \Rightarrow V_{ms} = \frac{\phi_S - \phi_M}{e}$

$$Q \quad C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{di} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{t_{ox}}$$

$$\therefore \text{平带电压 } V_{FB} = -V_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} = \frac{\phi_M - \phi_s}{e} - \frac{Q_f}{\epsilon_0 \epsilon_i} t_{ox}$$

$$\textcircled{2} V_{FB}' = \frac{\phi_M - \phi_s}{e} - \frac{Q_f}{\epsilon_0 \epsilon_i} \frac{t_{ox}}{2} > V_{FB}, \text{即平带电压变大。}$$

③

五、①

$$\textcircled{2} \text{知 pn 结中 } d = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_i (V_D - V)}{eN^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \text{平衡时: } w_1 = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s V_D}{eN_d} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{正向偏压 } V \text{ 时: } w_2 = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (V_D - V)}{eN_d} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\textcircled{3} Q = -eN_d w_2 = -[2\epsilon_0 \epsilon_s eN_d (V_D - V)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore C = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_s eN_d}{2(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D - V)}{\epsilon_0 \epsilon_s eN_d}$$

