

电子科技大学 2019-2020 学年第 2 学期期末考试 A 卷

考试科目: 半导体物理 A 考试形式: 闭卷 考试日期: 2020 年 月 日

本试卷由 五 部分构成, 共 8 页。考试时长: 120 分钟

成绩构成比例: 平时成绩 35 %, 期末成绩 65 %

| 题号 | 一 | 二 | 三 | 四 | 五 | 合计 |
|----|---|---|---|---|---|----|
| 得分 | | | | | | |

| 得分 |
|----|
| |

一、填空题 (每空 1 分, 共 30 分)

1. 硅的晶格结构是 (), 能带结构是 ()

A. 金刚石型 B. 闪锌矿型

C. 间接禁带型 D. 直接禁带型

答案: A C

2. 能带中电子有效质量 m_n^* 定义为 (), 与内层电子相比, 外层电子有效质量 ()。

A. $m_n^* = \hbar k / m_n$ B. $m_n^* = \hbar^2 / (d^2 E / dk^2)$ C. $1 / m_n^* = \hbar^2 / (d^2 E / dk^2)$

D. 更大 E. 更小

答案: B E

3. 本征半导体是指 () 的半导体。

A. 不含杂质与缺陷 B. 电子浓度与空穴浓度相等

C. 电阻率最高 D. 电子密度与本征载流子密度相等

答案: A

4. 费米能级 E_F 在能带中的位置取决于 () 和 ()。对于掺 Ga 的 Ge, 它靠近 ()

A. 杂质类型 B. E_v C. E_c D. 掺杂浓度 E. E_g

答案: A D B

5. 在相同温度下, 禁带宽度越宽的半导体, 本征载流子浓度 (); 对同一半导体, 温度越高, 本征载流子浓度 ()。

A. 越多 B. 越少 C. 不变

答案: B A

6. 在半导体材料中，浅能级杂质的作用是（ ），深能级杂质的作用是（ ）。

- A. 改变材料的电阻率； B. 改变材料的本征费米能级；
C. 改变材料的载流子寿命； D. 改变电子的有效质量

答案：A C

7. 当温度从室温增加到 125°C 时，中等掺杂的 N 型 Si 半导体电子迁移率会（ ），电阻率会（ ）。

- A. 下降 B. 上升 C. 不变

答案：A B

8. 简并半导体一般是（ ）掺杂半导体，这时（ ）对载流子的散射更加显著。

- A. 轻 B. 重 C. 电离杂质 D. 中性杂质

答案：B C

9. 通常把主要依靠价带空穴导电的半导体称为（ ）型半导体。同等掺杂浓度的 n 型半导体的电导率一般（ ）p 型半导体。

- A. n B. p C. 大于 D. 小于

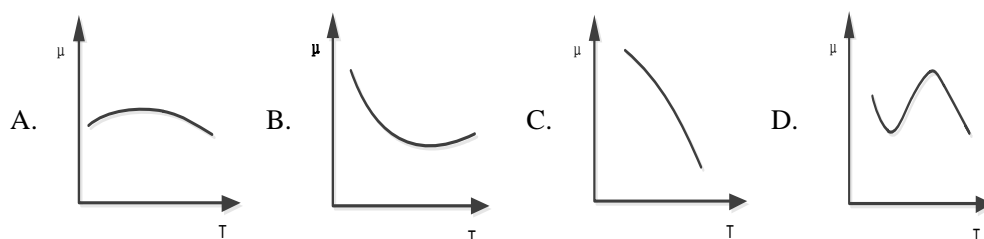
答案：B C

10. 对于仅掺杂磷的几种中等掺杂浓度的 n 型硅样品，在室温下，掺杂浓度越低，则其迁移率（ ），电导率（ ）。

- A. 越低 B. 不变 C. 越高 D. 无法判断

答案：C A

11. 掺杂浓度 10^{19} cm^{-3} 的半导体载流子迁移率随温度的变化规律为（ ），掺杂浓度为 10^{13} cm^{-3} 时对数坐标下载流子迁移率随温度的变化规律为（ ）



答案：A C

12. 直接复合情况下，小注入时 p 型半导体的非平衡载流子的寿命与（ ）；间接复合，小注入下，强 n 型半导体的少数寿命与（ ）。

- A. Δn 成正比 B. p_0 成正比 C. p_0 成反比 D. n_0 成反比 E. n_0 成正比
F. 复合中心浓度成正比 G. 复合中心浓度成反比

答案: C G

13. 有效复合中心的能级靠近 (), 有效陷阱能级靠近 ()

- A. 禁带中部 B. 导带 C. 价带 D. 费米能级

答案: A D

14. 真空能级 E_0 和半导体的 E_F 之差定义为 (), 它与半导体的掺杂浓度 ()

- A. 电子亲和势 B. 功函数 C. 有关 D. 无关

答案: B C

15. 在 MIS 结构制造过程中, 栅氧化层通常携带 () 电荷, 这使得 P 型半导体构成的 MIS 结构的阈值电压绝对值变 ()。

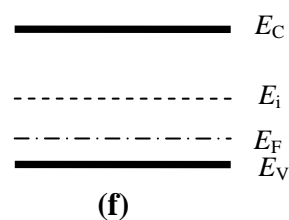
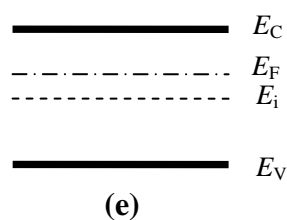
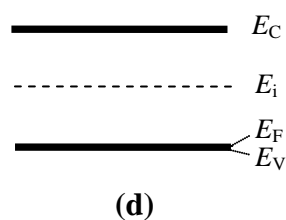
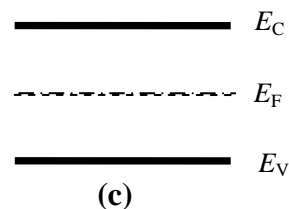
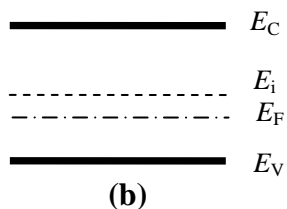
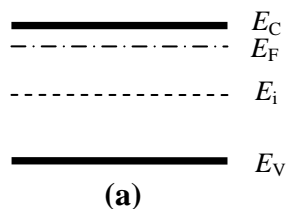
- A. 正 B. 负 C. 大 D. 小

答案: A D

得分

二、简答题 (共 12 分)

16. (6 分) 根据下列室温条件下能带图写出其半导体类型, 掺杂程度, 并判断其是否发生简并。



答: (每个 1 分)

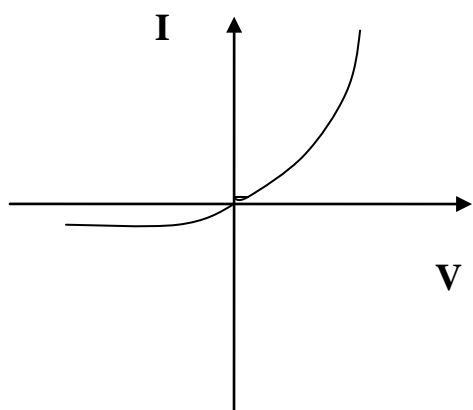
(a) n 型, 高掺杂, 否 (b) p 型, 低掺杂, 否 (c) 本征型 (或高度补偿型), 否

(d) p 型, 高掺杂, 是 (e) n 型, 低掺杂, 否 (f) p 型, 高掺杂, 否

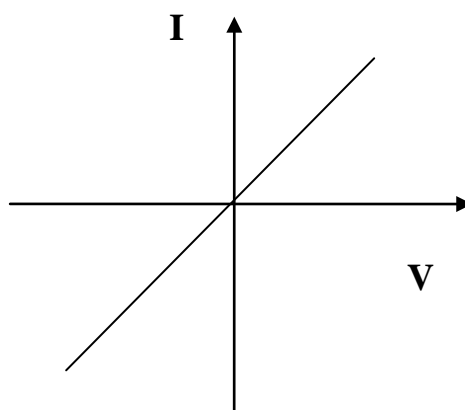
17. (6 分) 解释什么是 Schottky 接触和欧姆接触, 并画出它们相应的 I-V 曲线。

答: 金属与中、低掺杂的半导体材料接触, 在半导体表面形成多子的势垒即阻挡层, 其厚度并随加在金属上的电压改变而变化, 这样的金属和半导体的接触称为 Schottky 接触。(2 分)

金属和中、低掺杂的半导体材料接触, 在半导体表面形成多子的势阱即反阻挡层, 或金属和重掺杂的半导体接触, 半导体表面形成极薄的多子势垒, 载流子可以隧穿过该势阱, 形成隧穿电流, 其电流—电压特性满足欧姆定律。(2 分)



Schottky 势垒接触的 I-V 特性
(1 分)



欧姆接触的 I-V 特性
(1 分)

| |
|-----|
| 得 分 |
| |

三、证明题 (共 8 分)

18. (8 分) 证明小注入条件的非平衡的 P 型半导体, 可满足

$E_{Fn} - E_F \gg E_F - E_{Fp}$, 其中 E_F 为平衡费米能级, E_{Fn} 和 E_{Fp} 分别为空穴、电子准费米能级。

证明:

非平衡半导体中电子和空穴浓度为:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_F}{k_0 T}\right) \quad 3 \text{ 分}$$

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

小注入: $\Delta p \ll p_0$, $p = p_0 + \Delta n \approx p_0$

$\Delta n \gg n_0$, $n = n_0 + \Delta n \gg n_0$ 3 分

$$\exp\left(\frac{E_{Fn} - E_F}{k_0 T}\right) \gg \exp\left(\frac{E_F - E_{Fp}}{k_0 T}\right)$$

所以: $E_{Fn} - E_F \gg E_F - E_{Fp}$ 2 分

| |
|-----|
| 得 分 |
| |

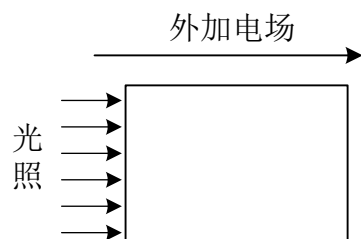
四、计算题（共 24 分）

19. （12 分）将一束功率 $P = 10 \text{ mW}$ 的入射单色光，光子的能量为 $h\nu = 2 \text{ eV}$ ，将其照射在本征型 GaAs 样品上，假设有 80% 的光子在样品表面被吸收，以产生电子空穴对。

（1）求出过剩载流子的表面产生率？（已知： $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ）（3 分）

（2）如果少子寿命 τ 为 $1 \mu\text{s}$ ，稳态条件下表面过剩电子与空穴各为多少？在光入射方向上增加 10^3 V/cm 的均匀电场，并假定表面处电子浓度梯度为 $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-4}$ ，求半导体表面处电子电流的大小（已知 GaAs 电子迁移率为 $8000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ， $kT/q = 0.026 \text{ V}$ ， $n_i = 2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ）（6 分）

（3）去除外加电场后，设在 $t = t_0$ 时突然关闭光照，经过时间 2τ 后半导体表面还剩下的电子与空穴各为多少？（3 分）



解：（1） $G = \frac{P \times 80\%}{h\nu} = \frac{10 \text{ mW} \times 80\%}{2 \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} = 2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} / \text{s}$

（2 分）

（1 分）

（1 分）

（2） $\Delta n_0 = \Delta p_0 = G\tau = 2.5 \times 10^{16} \times 10^{-6} = 2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

（1 分）

（1 分）

$$J = q\mu_n \left(nE + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) \Big|_{x=0} = q\mu_n \left(n_0 E + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right)$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} < C > \times 8000 < \text{cm}^2 / \text{Vs} > (2.5 \times 10^{10} < \text{cm}^{-3} > \times 10^3 < \text{V} / \text{cm} > + 0.026 < \text{V} > \times 8 \times 10^{12} < \text{cm}^{-4} >)$$

$$= 0.032 \text{ A} / \text{cm}^2$$

（带公式 3 分，计算结果 1 分）

（3）

$$\Delta n(t) = \Delta p(t) = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{2\tau}{\tau}\right) = 2.5 \times 10^{10} \times \exp(-2) = 3.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \quad (2 \text{ 分})$$

20. (12分)假设一块N型Si与金属肖特基势垒接触,室温条件下测得反向饱和电流 $I_0 = 10^{-12} \text{ A}$ 。

(1) 若以正向电流 10^{-3} A 为器件导通条件,求正向导通电压值(4分)

(2) 如果不加电压时半导体表面势为 0.6 V ,耗尽区宽度为 $0.5 \mu\text{m}$,计算加 5 V 反向电压时的耗尽区宽度(4分)

(3) 画出该肖特基势垒接触在零偏、正偏和反偏时的能带图(4分)

解:

$$(1) \quad I_F = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{k_0T}\right) - 1 \right] \approx I_0 \exp\left(\frac{qV_F}{k_0T}\right)$$

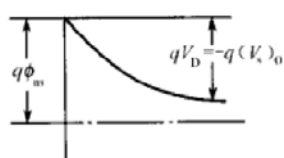
$$V_F = \frac{k_0T}{q} \ln \frac{I_F}{I_0} = 0.54 \text{ V}$$

(3分) (1分)

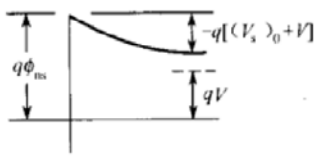
$$(2) \quad \frac{x_d}{x_{d0}} = \sqrt{\frac{V + V_s}{V_s}} \Rightarrow x_d = 0.5 \times \sqrt{\frac{5.6}{0.6}} = 1.53 \mu\text{m}$$

(3分) (1分)

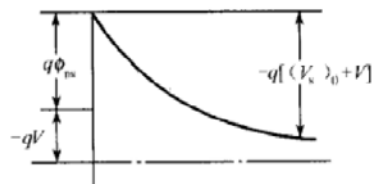
(3) 全对得4分,有一处错误扣1分。



(a) $V=0$



(b) $V>0$



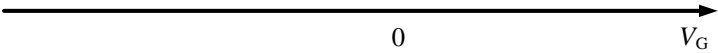
(c) $V<0$

| |
|----|
| 得分 |
| |

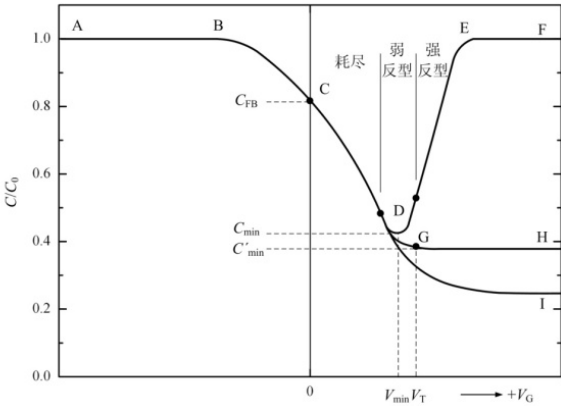
五、综合题（共 26 分）

21.（20 分）对于 MIS 结构，假设介质层电场和厚度分别为 E_1 和 t_1 。

（1）作图题：假设由 N 型半导体形成理想 MIS 结构，其栅压从负到正变化，试在下图中标出多子积累、平带、耗尽、弱反型和强反型状态对应的栅电压范围。

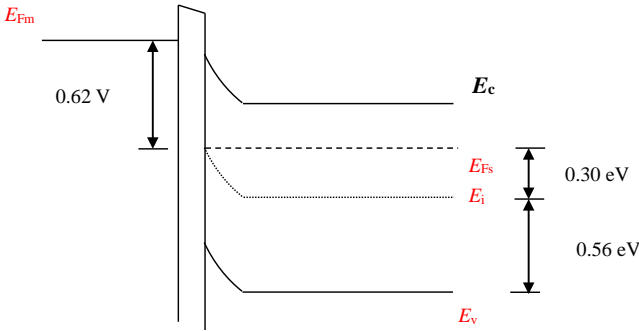


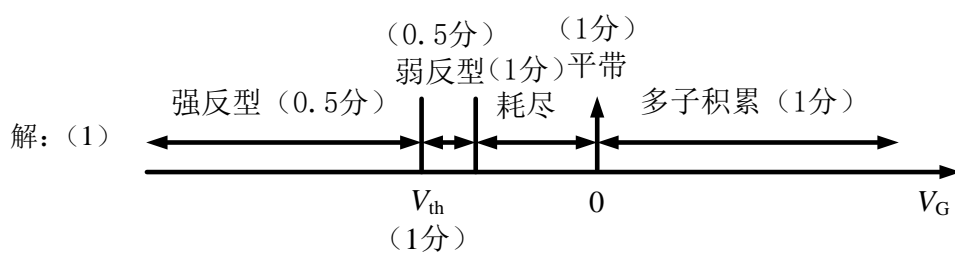
（2）给出与下图中 C 点和 E 点对应的理想 MIS 的对应栅电压表达式。



（3）请说明归一化平带电容与那些因素有关，若提高掺杂浓度而保持其他参数不变，平带点如何变化？

（4）在绝缘层为理想绝缘层的情况下，如果要使得下图 MIS 的平带电压 $V_{FB}=0$ ，试计算应该选择什么样功函数的金属作栅电极？（ $\chi(\text{Si})=4.05\text{ eV}$ ）。





(1分)

(2) C 点: $V_G = 0$ (2分)

E 点: 达到强反型以后, 多余栅压增加到栅氧化层

$$V_G = E_t t_l + \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

(1分) (2分)

(3) 由 $\frac{C_{FB}}{C_0} = \frac{1}{1 + C_0/C_{FBS}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{r0}}{d_0} \left(\frac{k_0 T \epsilon_0}{q^2 \epsilon_{rs} N_A}\right)^{1/2}}$ 可知, 平带电容与衬底掺杂浓度、绝缘层厚度

和介质层介电系数与半导体层介电系数以及温度有关。(公式可以不给出, 任意写出两个得 2 分)

可知, 归一化平带电容与衬底掺杂浓度 N_A 和绝缘层厚度 d_0 有关。若其他参数不变, N_A 越大, C_{FB}/C_0 也越大。(3分)

(4) 由 $V_{FB} = \frac{W_s - W_m}{q} = 0$

即栅电极金属应该满足

$$W_m = W_s = \chi + \frac{E_g}{2} - (E_i - E_F) = 4.05 + \frac{1.12}{2} - 0.3 = 4.31 \text{ eV}$$

(1分)

(3分)

(1分)

22. （6 分）已知硅和碳化硅的重要物理参数如下表所示。

| | 禁带宽度 (eV) | 饱和漂移速度 (10 ⁷ cm/s) | 少数载流子寿命 (μs) | 临界击穿电场 (MV/cm) | 热导率 (W/cm·K) |
|-----|--------------|----------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Si | 1.12 | 1 | ≈130 | 0.3 | 1.7 |
| SiC | 3.26 | 2 | < 1 | 3 | 4.9 |

结合《半导体物理 A》课程相关知识，试比较并解释 4H-碳化硅材料与硅材料在制作电子器件的潜在优势。

答题提示（任意答对三项且言之成理给 6 分）：

| 物理参数 | 潜在优势 |
|---------|---|
| 禁带宽度 | 禁带宽度越大，相同温度下本征载流子浓度越低，则本征温度越高，更有利于制作高温器件。SiC 的禁带宽度对应的能量为紫外光，可用于制作紫外探测器的材料。此外，宽禁带半导体制成的可制作具有抗辐照更好的器件，适用于航空航天领域所需的器件。 |
| 饱和速度 | SiC 中的饱和漂移速度是 Si 中的两倍，因此具有更快的漂移速度，有利于制作高频/高速器件。 |
| 少数载流子寿命 | SiC 少数载流子寿命短，因此在制作双极型器件的时候可具有更快的开关速度与恢复时间。 |
| 临界击穿电场 | SiC 是 Si 的 10 倍，因此在高耐压器件方面有更好的应用。比如制作大功率电力电子器件。 |
| 热导率 | SiC 具有更大的热导率，因此其散热更好，有利于制作高温器件。 |