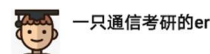


# 半导体物理考研真题 PDF



PDF 哈尔滨工业大学806 2022年真题+答案

PDF 西安电子科技大学801 2021年真题+答案

需要报班、择校、答疑、求职就业问题可加我私人微信，也有个交流群，可以加一下



## 冲刺课程

火热招生中.....

### 课程介绍

- 1、资料内容**  
冲刺课不提供讲义, 附送院校适配的 4 套冲刺试卷(11 月中旬统一发货)。
- 2、课程时长**  
冲刺课以科目为单位, 单科时长约 10-20 课时。
- 3、课程内容**  
冲刺课分为课本重点串讲、重点题精讲和真题预测课:  
(1) **课本重点串讲**: 归纳总结历年考点, 梳理完善知识体系。  
(2) **重点题精讲**: 集中精讲经典题型, 查漏补缺补齐短板。  
(3) **真题预测课**: 把握分析命题方向, 科学预测热门考点, 增长考场临变经验, 迅速提升应试能力。
- 4、答疑及其他服务**  
报班即享答疑群答疑, 当天问题当天解决。  
各学科配备班主任, 提供复习规划和学习督导、每日一题、择校评估服务;  
还赠送重点院校划重点视频, 非重点院校的教务老师一对一复习指导。
- 5、直播答疑服务**  
直播课: 伴随进度动态调整, 直播授课直奔要害, 第一时间解决学生疑难问题, 加强教学中的互动反馈。  
答疑群内定期组织直播答疑服务, 报班即可按照答疑群通知时间参与直播答疑并开通直播答疑视频观看权限。
- 6、收费及定价**  
原价: 499 起  
不同科目及院校定价不同, 具体可联系下方微信咨询。
- 7、优惠说明**  
买过公共课程或者资料班的同学凭借淘宝订单截图**优惠 100 元**。  
之前非水木观畴教育学员的同学, 可以无分组转发朋友圈或 QQ 空间集赞 10 个即可优惠 100 元(不设置分组可见, 30 分钟以上)、不与其他优惠叠加。

### 重要说明(必看)

- 》》 冲刺卷不单卖, 只和冲刺课配套出售。
- 》》 冲刺卷 11 月中旬统一发货, 冲刺课程 11 月初开始授课, 上课时间另行通知, 答疑服务报班之后立即提供。
- 》》 **全程班的同学本身课程中包含冲刺课部分, 无需重复购买。**

- 本文档适合大家把本校真题做完后用来查漏补缺使用, 也当作模拟啦, 有答案, 有解析, 有视频讲解, 相当 nice~
- 当然也适合 24 考研刚开始准备考研的同学拿来了解信号考什么使用~
- Ps: 另外我们这边也有针对冲刺的课程, 里面包含 4 套模拟卷, 全程的答疑服务, 20 小时的冲刺课程, 另外我们前面还有一些专题直播, 也都附赠一起了, 还有就是重点院校的划重点视频赠送, 非重点院校的教务老师一对一复习指导, 还有班主任监督, 每日一题。这个冲刺班用于查漏补缺都还是挺不错的, 如有需要的话可以联系我, 具体的介绍可以参考上图

## 哈尔滨工业大学 2022 年硕士研究生入学考试试题

(考生注意: 全部答案必须写在答题纸上否则后果自负!)

考试科目代码: 806

考试科目: 半导体物理

注: ①所有答案必须写在答题纸或答题卡上, 写在本试题纸或草稿纸上均无效;

②本试题纸须随答题纸一起装入试题袋中交回!

### 一、名词解释 (30 分)

#### 1、能带

#### 2、迁移率

#### 3、非简并半导体

#### 4、半导体功函数

5、间接复合

6、P 型阻挡层

7、本征激发

8、非平衡载流子

9、表面态

## 10、光电导

二、以非简并  $n$  型半导体为例，试说明费米能级标志电子填充能级水平。(15 分)  
画图并解释说明  $n$  型半导体电子浓度随温度变化曲线。(15 分)

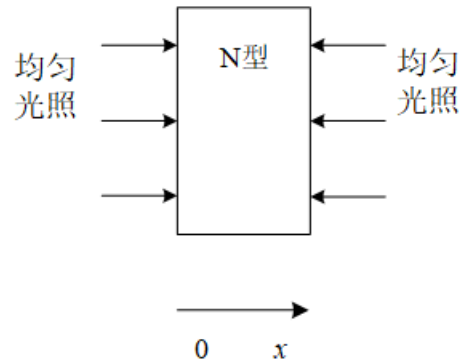
三、写出满足理想 MIS 结构的 3 个条件，画图说明  $p$  型硅衬底形成理想 MIS 可能测得的  $C$ - $V$  特性曲线 (20 分)，解释绝缘层中的正电荷和功函数如何影响平带电压 (10 分)。

四、画出  $pn$  结正向偏压和反向偏压能带图 (15 分)。载流子分布和电流密度分布图 (15 分)。

五、理想条件下，一块面积很大的半导体薄片，厚度为  $w$ ，以稳定光源均匀照射两面，设光只在表面层内产生电子空穴对，在小注入条件下， $\Delta P(0) = P_1$ ， $\Delta P(W) = P_2$ 。

问：

- (1) 稳态时片内非平衡载流子分布（扩散长度  $L_p$ ）（15 分）
- (2)  $w$  远大于  $L_p$ ，非平衡载流子浓度在样品中是如何分布的，并画出  $\Delta p(x)$ （15 分）



## 哈尔滨工业大学 2022 年硕士研究生入学考试试题答案

### 一、【水木路研解析】

1.【答案】能带：晶体中，电子的能量是不连续的，在某些能量区间能级分布是准连续的，在某些区间没有能级分布。这些区间在能级图中表现为带状，称之为能带。

【水木路研解析】能带论是半导体物理的理论基础，能带论在两个重要近似单电子近似和绝热近似的基础上，给出晶体的势场分布，进而给出电子的薛定谔方程。通过该方程和周期性边界条件最终给出 E-k 关系，从而系统地建立起该理论。

2.【答案】迁移率：单位电场强度下，载流子的漂移速率。反映载流子在电场作用下运动难易程度的物理量。

【水木路研解析】半导体载流子迁移率计算公式： $\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \frac{v_d}{E}$ ，其大小与能带中载流子的有效质量成反比，与载流子连续两次散射间的平均自由时间成正比。

3.【答案】掺入相对少量的施主（受主）杂质，使施主（受主）能级分立，无相互作用，并且服从玻尔兹曼分布，不满足泡利不相容原理，费米能级位于禁带内，且  $E - E_F \ll k_0T$ ，这类半导体称为非简并半导体。

【水木路研解析】非简并半导体：没有发生载流子简并化的半导体，称为非简并半导体。所谓简并化就是对于 n 型半导体，掺杂浓度很高， $E_F$  接近或者进入导带，导带电子数目已经很多无法满足  $f(E) \ll 1$  条件，这时不能应用玻尔兹曼函数，必须用费米分布函数，当杂质浓度超过一定数量后，载流子开始简并化，这种半导体叫简并半导体。

4.【答案】半导体功函数：功函数是指真空电子能级  $E_0$  与半导体的费米能级  $E_F$  之差

【水木路研解析】影响功函数的因素是掺杂浓度，温度和半导体的电子亲和势。

5.【答案】间接复合：电子和空穴通过禁带的能级（复合中心）进行复合，其中复合中心来源于半导体中的杂质和缺陷。

【水木路研解析】关于载流子复合需要掌握直接复合，间接复合，表面复合，俄歇复合。与俄歇复合相关的还有俄歇过程。

6.【答案】p 型阻挡层：当金属与 p 型半导体接触，若  $W_m < W_s$ ，能带向下弯曲。这里空穴浓度比体内小，形成反阻挡层。

【水木路研解析】当金属与 n 型半导体接触时，若  $W_m > W_s$ ，形成阻挡层。当金属与 n 型半导体接触，若  $W_m < W_s$ ，形成反阻挡层。金属与 P 型半导体接触，若  $W_m > W_s$ ，形成 P 型反阻挡层。金属与 P 型半导体接触，若  $W_m < W_s$ ，能带向下弯曲，形成 P 型阻挡层。

7.【答案】本征激发：电子从价带激发到导带，价带中产生空穴，电子和空穴成对产生。

【水木路研解析】本征激发所产生的电子—空穴对会随着温度的上升而增大。

8.【答案】非平衡载流子：如果对半导体施加外界作用，破坏了热平衡条件，那么处于非平衡状态的半导体，其载流子比平衡状态多出来的那一部分载流子称之为非平衡载流子

【水木路研解析】非平衡载流子就是处于非平衡状态的半导体，其载流子比平衡状态多出来的那一部分载流子称之为非平衡载流子，其产生原因是半导体的热平衡被破坏。

9.【答案】表面态：当一块半导体突然被中止时，表面理想的周期性晶格发生中断，从而导致禁带中出现电子态（能级），该电子态称为表面态。

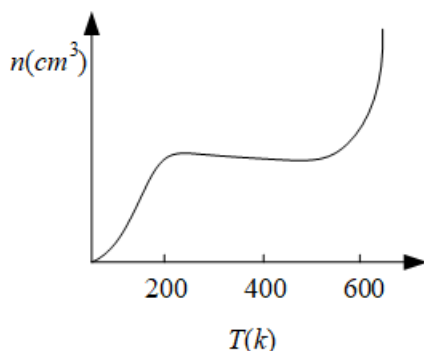
【水木路研解析】若能级被电子占据时呈电中性，释放电子后呈正电性，称为施主表面态。若能带空着时为电中性，而接受电子后带负电，称为受主表面态。

10.【答案】光电导：由光照引起的半导体电导率增加的现象。

【水木路研解析】光电导效应的增强通常用增益因子  $G$  来表示。 $G = \frac{\tau_n \mu_n V}{l^2}$  其中  $\tau_n$  为载流子寿命， $\mu_n$  为载流子迁移率， $V$  为半导体两端电压， $l$  为半导体长度。

## 二、【水木路研解析】

对于非简并 n 型半导体而言，掺杂浓度越高，常温下就有越多的施主杂质电离，提供越多电子到导带上，因此导带中被电子填充的能级随着掺杂浓度的增加而增加，而反应到费米能级上就是随着掺杂浓度的上升，费米能级原来越靠近导带底。



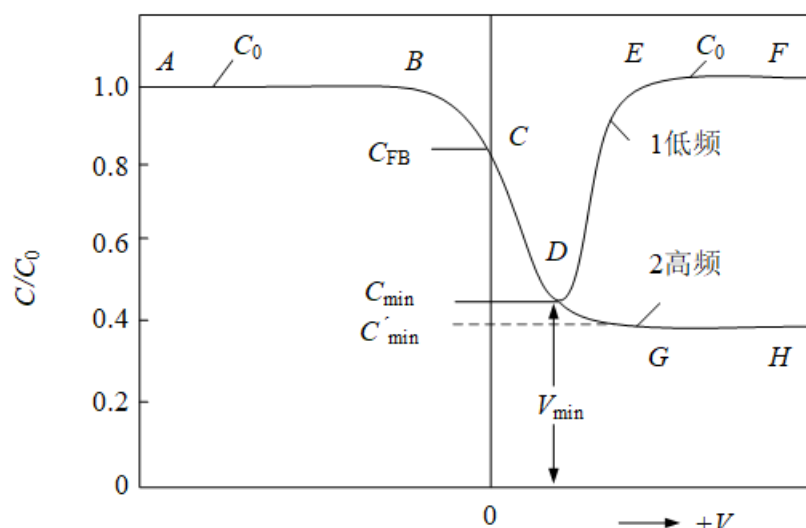
当温度较低时，本征激发几乎可以忽略不计，半导体中的载流子主要由杂质电离提供，而杂质电离随着温度的升高而增强，因此载流子浓度上升；当温度上升到一定程度后，半导体中的杂质完全电离，但此时本征激发所产生的载流子浓度依旧不多，此时半导体的载流子浓度几乎不随温度而变化；温度进一步升高，半导体中本征激发开始起主要作用，此时半导体中的载流子浓度随着温度的升高而升高。

## 三、【水木路研解析】

理想 MIS

(1) 金属与半导体间功函数差为零；在绝缘层内没有任何电荷且绝缘层完全不导电；绝缘体与半导体界面处不存在任何界面态。

(2) C—V 曲线：



(3) MIS 结构中，绝缘层中带有正电荷。对于 p 型硅衬底来说，设绝缘层中有一薄层电荷，其单位面积上的电量为  $Q$ ，离金属表面的距离为  $x$ 。在无外加电压时，这薄层电荷将分别在金属表面和半导体表面层中感应出相反符号的电荷。由于这些电荷的存在，在半导体空间电荷层内将有电场产生，能带发生弯曲。这就是说，虽然未加外电压，但由于绝缘层内电荷的作用，也可使半导体表面层离开平带状态。为了恢复平带状态，同前一样，必须在金属板上加一定的偏压。当 MIS 结构的绝缘层中存在电荷时，可引起其 C-V 曲线沿电压轴平移  $V_{FB}$ 。

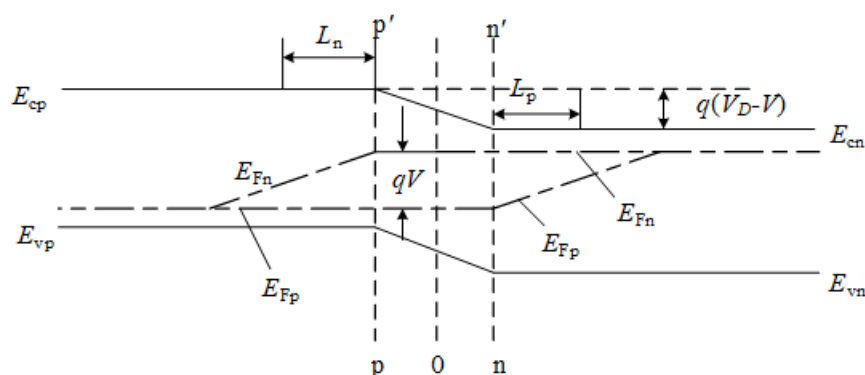
功函数差的影响：

由于金属和半导体功函数的不同，虽然外加偏压为零，但半导体表面层并不处于平带状态。为了恢复平带状态，必须在金属铝与半导体硅间加一定的负电压，抵消由于两者功函数不同引起的电场和能带弯曲。这个为了恢复平带状态所需加的电压叫做平带电压，以  $V_{FB}$  表示之。

#### 四、【水木路研解析】

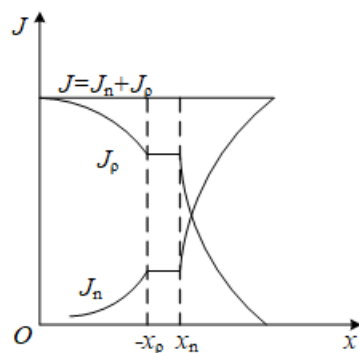
正偏：

能带图

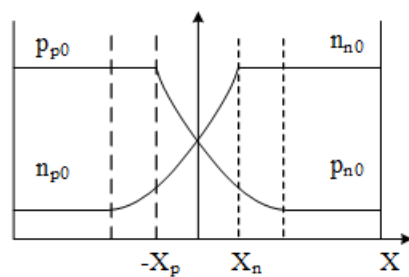


电流分布

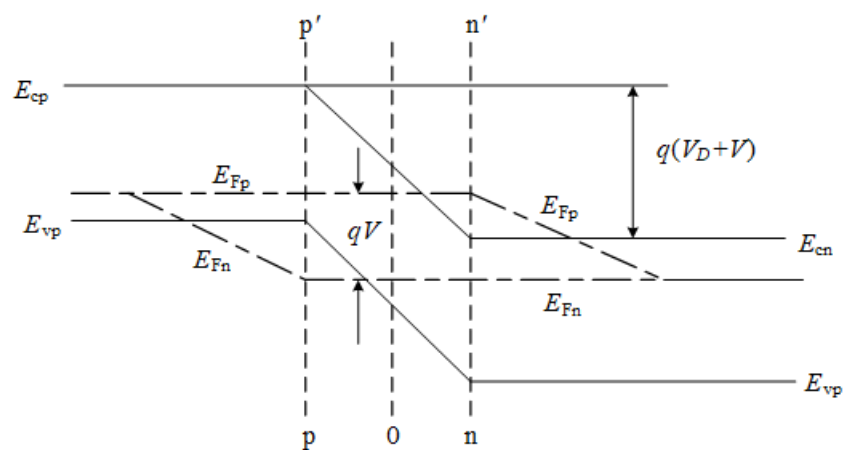




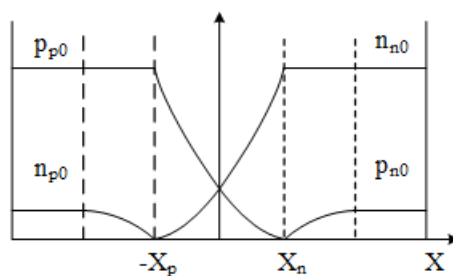
载流子分布



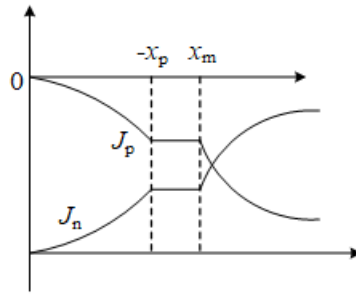
反偏:



载流子分布



电流分布:



$$J = J_n + J_p \text{ 小电流}$$

### 五、【水木路研解析】

(1) 非平衡载流子分布，由于没有外加电场，因此只取决于扩散过程，达到稳态分布后与时间无关。

(2)  $D \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} = \frac{\Delta p(x)}{\tau}$ ，其解为： $\Delta p(x) = A \exp(-\frac{x}{L}) + B \exp(\frac{x}{L})$ ， $L = \sqrt{D \tau}$ ，是扩散长度。

根据边界条件， $\Delta p(0) = P1$ ， $\Delta p(w) = P2$ ，代入上面的方程，得出 A 和 B 的值，再将 A 和 B 值代入上式得出稳态载流子分布：

$$\Delta p(x) = [P1 \times \text{sh}(\frac{(w-x)}{L}) + P2 \times \text{sh}(\frac{(w-x)}{L})] / \text{sh}(\frac{w}{L})$$

该方程定量反映了非平衡载流子的分布仅与空间位置有关（达到稳态时）。这是最一般的情况，

$w \gg L$  时，在  $x=0$  的一端， $\Delta p(x) \approx P1 \times \text{sh}(\frac{(w-x)}{L}) / \text{sh}(\frac{w}{L}) \approx P1 \times \exp(-\frac{x}{L})$ ；

同理得出在  $x=w$  的一端， $\Delta p(x) \approx P2 \times \exp(\frac{-(w-x)}{L})$ 。这种情况说明在厚度比较大时即远大于载流子扩散长度  $L$  时，两端的分布都是指数衰减形式，体内分布极少。

## 西安电子科技大学 2021 年硕士研究生招生考试试题

(考生注意:全部答案必须写在答题纸上否则后果自负!)

考试科目代码: 801

考试科目: 半导体物理

注: ①所有答案必须写在答题纸或答题卡上, 写在本试题纸或草稿纸上均无效;

②本试题纸须随答题纸一起装入试题袋中交回!

### 一、填空题 (35 分, 每空 1 分)

1、半导体电子 E-k 关系中, 若令  $E = \text{常数}$ , 则得到 k 空间 (1), 若电子的  $m_n^*$  各向异性则具有 (2), 如半导体 (3), 若电子的  $m_n^*$  各向同性则具有 (4), 如半导体 (5)。

2、原胞只反映 (6) 而不反映 (7), 晶体是由晶胞 (8) 得到的, 由单电子近似晶体势场是以 (9) 为周期的 (10) 势场。金刚石结构晶胞包含 (11) 个原子, 原子密度是 (12)。III-V 族化合物半导体是 (13) 结构, 其族 III 和 V 族原子的密度是 (14), 均为 (15)。

3、一维自由电子的 E-k 关系为 (16), 电子平均速度  $v =$  (17)。晶格常数为 a 的一维晶体, 电子有效质量定义为  $(m_n^*)^{-1} =$  (18), 电子所受外力 f 与加速度 a 的关系为 (19), 电子的平均速度  $v =$  (20), v 的符号既与 (21) 有关也与 (22) 有关, 其简约布里渊区 k 的范围为 (23), 电子在外力 f 作用下其  $dk/dt =$  (24)。

4、回旋共振实验中样品置于均匀恒定的磁场中, 半导体内部电子做 (25) 运动, 其轨迹为 (26), 电子回旋频率  $\omega_c = qB/m_n^*$ , 当  $m_n^*$  各向异性时,  $(m_n^*)^{-1} =$  (27)。

5、Au 在 n 型 Si 中引入距导带底  $E_C$  为 (28) eV 的 (29) 能级, 在 p 型 Si 中引入距价带顶  $E_V$  为 (30) eV 的 (31) 能级, 因这两个能级都在 (32) 附近, 所以它们都是 (33)。

6、强电离区 n 型半导体其多子浓度随温度变化是 (34), 少子浓度随温度变化是 (35)。

### 二、单项选择题 (20 分, 每题 2 分)

1、关于电子的有效质量  $m_n^*$ , 下面的正确说法是:

- A、有效质量  $m_n^*$  可正可负;
- B、引入  $m_n^*$  以后, 半导体中电子的惯性质量就不再是  $9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$ ;
- C、电子的有效质量  $m_n^*$  涵盖了晶体内部大量电子的相互作用;
- D、电子的有效质量  $m_n^*$  是通过对高纯样品的电子回旋共振实验得到的;
- E、以上均不对。

2、关于空穴, 下面的正确说法是:

- A、因为空穴的有效质量不止一种, 所以空穴的有效质量  $m_p^*$  可正可负;
- B、因为导带不会被电子全部填满, 所以导带也存在大量的空穴;
- C、能带图中空穴的能量向上是增大的;
- D、因为空穴的有效质量不止一种, 所以空穴具有旋转椭球等能面;

E、以上均不对。

3、升高温度使 n 型半导体从低温弱电离区逐步进入高温本征激发区，下面的正确说法是：

- A、导带电子浓度不断增多，直至杂质全部电离使导带电子浓度恒定；
- B、费米能级一直下降直至趋近  $E_i$ ；
- C、导带电子以由杂质电离为主要来源逐渐过渡到以本征激发为主要来源；
- D、费米能级先下降后上升直至进入导带；
- E、费米能级先上升后下降直至进入价带。

4、对于三种常用的半导体材料 Si、Ge 和 GaAs， $T=300K$  时下面的正确说法是：

- A、Si 导带底电子具有旋转椭球等能面，电子迁移率比 Ge 大但小于 GaAs；
- B、Ge 导带底电子具有旋转椭球等能面，电子迁移率比 GaAs 小但大于 Si；
- C、GaAs 导带底电子具有旋转椭球等能面，另外在  $\langle 111 \rangle$  方向上还有一能量次极小值；
- D、GaAs 的导带底电子具有球形等能面，因为禁带宽度比 Ge 和 Si 大所以  $m_n^*$  很小；
- E、Si、Ge 和 GaAs 因为导带结构各不相同，所以制备的器件的工作温度区间也不相同。

5、在一块非均匀掺杂的 n 型半导体中，其非平衡少子的连续性方程是：

- A.  $\partial p(x, t)/\partial t = D_p \partial^2 p(x, t)/\partial x^2 - \mu_p(|E| \partial p(x, t)/\partial x + p(x, t) \partial |E|/\partial x) + g_p - \Delta p(x, t)/\tau_p$
- B.  $\partial p(x, t)/\partial t = D_p \partial^2 p(x, t)/\partial x^2 - \mu_p(|E| \partial p(x, t)/\partial x + p(x, t) \partial |E|/\partial x) + g_p - p(x, t)/\tau_p$
- C.  $\partial n(x, t)/\partial t = D_n \partial^2 n(x, t)/\partial x^2 - \mu_n(\frac{|E| \partial n(x, t)}{\partial x} + n(x, t) \partial |E|/\partial x) + g_n - n(x, t)/\tau_n$
- D.  $\partial n(x, t)/\partial t = D_n \partial^2 n(x, t)/\partial x^2 - \mu_n(|E| \partial n(x, t)/\partial x + n(x, t) \partial |E|/\partial x) + g_n - \Delta n(x, t)/\tau_n$
- E.  $\partial \Delta p(x, t)/\partial t = D_p \partial^2 \Delta p(x, t)/\partial x^2 - \mu_p(|E| \partial \Delta p(x, t)/\partial x + \Delta p(x, t) \partial |E|/\partial x) + g_p - \Delta p(x, t)/\tau_p$

6、关于晶格振动中的声学波振动和光学波振动，下面的正确说法是：

- A、光学波振动因为振动频率高，所以对元素半导体的散射作用可以忽略；
- B、声学波振动因为振动频率低，所以对化合物半导体的散射作用可以忽略；
- C、声学波振动只有纵波而光学波振动只有横波；
- D、声学波振动只有横波而光学波振动只有纵波；
- E、声学波振动和光学波振动其相邻原子的振动相位是不同的。

7、常用半导体材料 Si、Ge、GaAs、InSb，室温下电子迁移率  $\mu_n$  由大到小的正确排序是：

- A.Si, Ge, GaAs, InSb
- B.Ge, Si, GaAs, InSb

C.Si, Ge, InSb, GaAs

D.GaAs, InSb, Ge, Si

E.InSb, GaAs, Ge, Si

8、有关非平衡少数载流子的寿命 $\tau$ ，以下说法正确的是：

- A、在外部激励去除后，非平衡少数全部复合所经历的时间称为非平衡少数寿命；
- B、非平衡少子的寿命 $\tau$ 与散射几率 $P$ 成反比；
- C、 $\tau$ 值越大的半导体，其非平衡少数复合率越高；
- D、在寿命时间 $\tau$ 处，非平衡少数浓度为原值的 $1/e$ ；
- E、非平衡少数寿命 $\tau$ 与复合率无关。

9、非均匀掺杂一维半导体，同时存在外场 $E$ 和非平衡载流子浓度梯度，则总电流密度为：

- A.  $J = J_n + J_p = q\mu_n \left( n|E| + \frac{k_0T}{q} \frac{dn}{dx} \right) + q\mu_p \left( p|E| - \frac{k_0T}{q} \frac{dp}{dx} \right)$
- B.  $J = J_n + J_p = q\mu_n \left( n|E| + \frac{k_0T}{q} \frac{dp}{dx} \right)$
- C.  $J = J_n + J_p = q\mu_p \left( p|E| - \frac{k_0T}{q} \frac{dn}{dx} \right)$
- D.  $J = J_n + J_p = q\mu_n \left( n|E| - \frac{k_0T}{q} \frac{dn}{dx} \right) + q\mu_p \left( p|E| + \frac{k_0T}{q} \frac{dp}{dx} \right)$
- E.  $J = J_n + J_p = q\mu_n \left( n|E| + \frac{k_0T}{q} \frac{d\Delta n}{dx} \right) + q\mu_p \left( p|E| - \frac{k_0T}{q} \frac{d\Delta p}{dx} \right)$

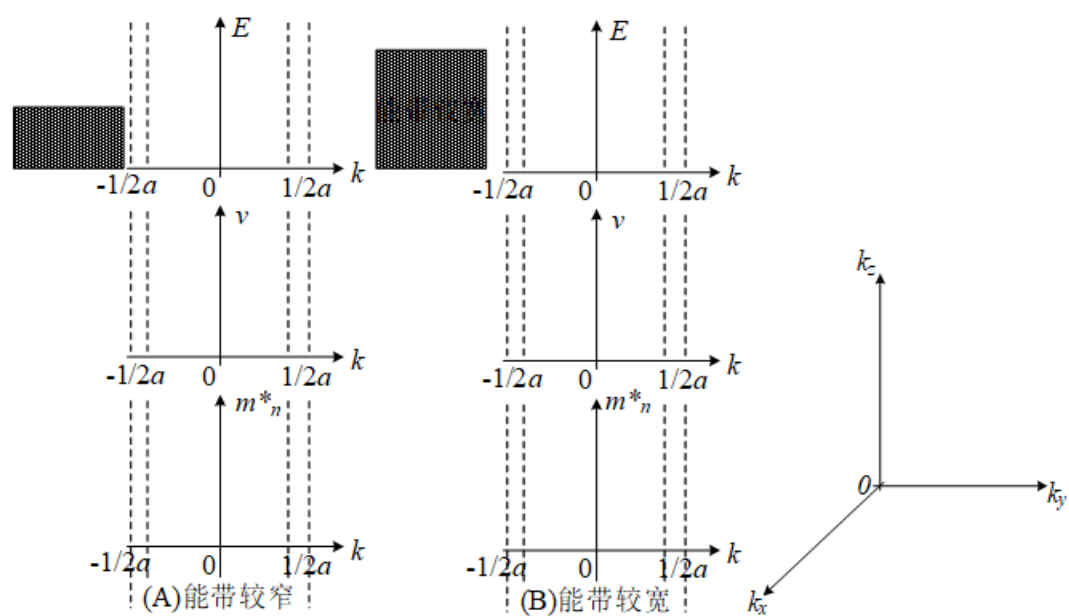
10、用 $h\nu \geq E_g$ 的强光注入产生非平衡载流子，以下说法正确的是：

- A、光照所产生的非平衡多子和非平衡少数浓度不等；
- B、小注入时，非平衡多子和非平衡少数浓度不等，但都远小于平衡态下的多子浓度；
- C、小注入时，非平衡少数浓度远小于非平衡多子的浓度；
- D、小注入时，非平衡少数浓度远小于热平衡态下的少数浓度；
- E、由光照所产生的非平衡多子浓度和非平衡少数浓度相等。

三、简述、证明或简单推导（35 分，每小题 5 分）

1、在左下图中分别画出电子处于（A）能带较窄时和（B）能带较宽时的 $E \sim k$ 、 $v \sim k$ 和 $m_n^* \sim k$ 关系曲线，说明哪种是价电子的情形。

2、三维立方晶体的边长为 $L_x$ 、 $L_y$ 和 $L_z$ ，写出其波矢 $k_x$ 、 $k_y$ 和 $k_z$ 的取值方法，并在右下图中画出 $k$ 空间 $k$ 取值示意图，说明 $k$ 取值的特点。



3、说明为什么空穴的有效质量 $m_p^* = -m_n^*$ ，其中 $m_n^*$ 是价带顶附近电子的有效质量。

4、对掺有单一施主的 n 型半导体，写出电中性条件；如果施主全部离化后继续不断升高样品温度，推导此时的电子浓度计算公式和以 $E_i$ 为参考的 Fermi 能级位置表达式。

5、什么是状态密度？写出导带电子状态密度表达式。证明简并 n 型半导体导带电子浓度 $n_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_C F_{1/2}(\xi)$ ，其中 $\xi = -\frac{E_C - E_F}{k_B T}$ 。

6、证明 Si 的电导有效质量为 $1/m_c = (1/m_l + 2/m_t)/3$ 。

7、什么是扩散流密度？扩散流密度的单位是什么？一维均匀掺杂 n 型半导体中如果存在非平衡空穴的扩散，扩散流密度  $S_p = ?$  一般情况下  $S_p$  是否常数？有无例外？为什么？

#### 四、计算题（60 分，每题 15 分）

1、（15 分）通常以杂质电离 90% 作为强电离的标准，计算室温下 Si 中掺砷（As）强电离时的掺杂浓度上限，指出强电离掺杂浓度上限与哪些因素有关。

2、（15 分）若以  $E_c - E_F = 0.5k_0T$  作为 n 型半导体的简并化条件，求施主杂质锑（Sb）掺入 Si 中时，在室温下发生简并化的掺杂浓度是多少？

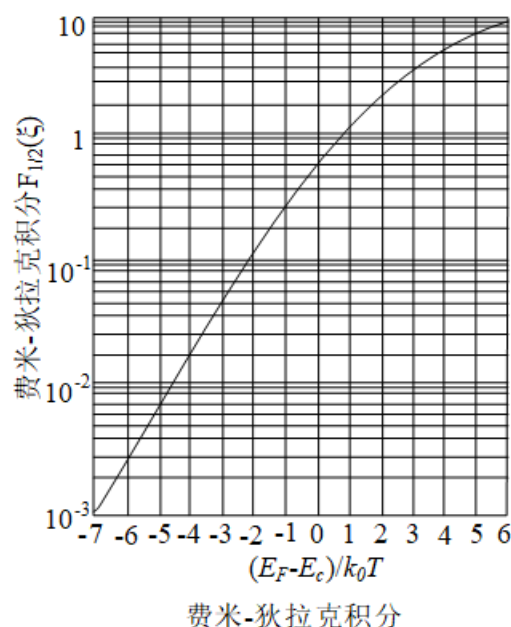
3、（15 分）如果分别以杂质 90% 电离和本征激发比杂质全部电离低 2 个数量级作为强电离区的温度下限和上限标准，试计算 Si 中掺入浓度为  $N_D = 5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的磷（P）的 n 型半导体的强电离区温度范围。Si 的  $E_g = 1.12 \text{eV}$  并假定不随温度变化。



4、(15 分) ①在 n 型样品平面形表面的极薄区域内稳定地注入浓度为  $(\Delta p)_0$  的非平衡空穴，空穴寿命是  $\tau_p$ ，写出稳态下非平衡空穴所满足的方程；若样品足够厚，列出边界条件，求出  $\Delta p(x)$  和扩散流密度。②其它条件同①，若样品厚度为  $w$  且在  $x=w$  处将非平衡空穴全部抽取，写出稳态下非平衡空穴所满足的方程并列出边界条件（不需求解），指出满足双极型晶体管基区宽度的条件和对应的扩散流密度。③如果在  $t=0$  时刻用  $h\nu \geq E_g$  的强光照射 n 型样品使其内部均匀地产生寿命为  $\tau_p$  的非平衡空穴，产生率是  $g_p$ ，写出非平衡空穴所满足的方程并求解  $\Delta p(t)$ ，求稳定后非平衡空穴的浓度  $\Delta p$ 。

附录：本试卷可能需要用到的图和数据：

300K 下			Si 中施主杂质电离能 $\Delta E_D$		
$k_0T$ $= 0.026\text{eV}$	Si		As	Sb	P
	$N_c$ $= 2.8$ $\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$	$N_v$ $= 1.1$ $\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$	0.049eV	0.039eV	0.044eV



## 西安电子科技大学 2021 年硕士研究生招生考试试题答案

## 一、填空题

1. 【水木路研解析】(1)【答案】E 等能面

【解析】E 为常数，得到的等能面是球形等能面。

(2)【答案】非球形等能面 (3)【答案】Si

【解析】有效质量各向异性的半导体等能面有多种形式，但不是球形。硅的导带极小值处等能面是旋转椭球形。

(4)【答案】球形等能面 (5)【答案】InSb

【解析】有效质量各向同性的半导体等能面是球形。锑化铟的导带极小值处等能面是球形的。

2. 【水木路研解析】(6)【答案】周期性 (7)【答案】对称性 (8)【答案】重复排列

【解析】原胞是晶格的最小周期单元，它只反映晶格的周期性不反映各种对称性。一个原胞平均只包含一个格点。

晶胞是晶体结构的基本单位，它充分反映了整个晶体的结构特点，即反映了各种对称性。即整块晶体是由许多这样的基本单位周期性重复排列而成的。

(9)【答案】晶格常数 (10)【答案】周期性

【解析】单电子近似认为，晶体中的某一个电子是在周期性排列且固定不动的原子核势场，以及其他大量电子的平均势场中运动，这个势场也是周期性变化的，而且它的周期与晶格周期相同。

(11)【答案】8

(12)【答案】 $8/a^3$ 【解析】金刚石原胞包含 8 个原子，原子密度  $= \frac{8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} + 4}{a^3} = \frac{8}{a^3}$ 。

(13)【答案】闪锌矿结构

【解析】由化学元素周期表中的 III 族元素铝、镓、铟和 V 族元素磷、砷、锑合成的 III-V 族化合物，都是半导体材料，它们绝大多数具有闪锌矿型结构，与金刚石型结构类似，所不同的是前者由两类不同的原子组成。

(14)【答案】相同的 (15)【答案】 $4/a^3$ 【解析】III-V 族化合物构成的闪锌矿结构其中原子比为 1:1，闪锌矿的原子密度也是  $8/a^3$ ，所以每种原子的密度均为  $4/a^3$ 。3. 【水木路研解析】(16)【答案】 $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0}$  (17)【答案】 $v = \frac{\hbar k}{m_0} \left( v = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} \right)$ (18)【答案】 $\frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2}$  (19)【答案】 $f = m_n^* a$  (20)【答案】 $v = \frac{\hbar k}{m_n^*}$ 

【解析】自由电子用的是惯性质量，晶体中电子用的有效质量，其他的公式在形式上保持一致。

(21)【答案】外力 f (22)【答案】有效质量  $m_n^*$ 

【解析】速度的符号既与外力的方向有关，又与有效质量的正负有关。

(23)【答案】 $-\frac{\pi}{a} < k < \frac{\pi}{a}$ 【解析】因为晶体内的能量状态是周期性的，所以只需要考虑  $-\frac{\pi}{a} < k < \frac{\pi}{a}$  这一区域就够了，这就是第一布里渊区，也称这一区域为简约的布里渊区。

(24)【答案】 $\frac{f}{\hbar}$

【解析】 $dE = \frac{f}{\hbar} \frac{dE}{dk} dt$ ,  $f = \hbar \frac{dk}{dt}$ , 推出  $\frac{dk}{dt} = \frac{f}{\hbar}$

4. 【水木璐研解析】(25)【答案】变加速（沿着磁场方向匀速运动，以及沿着磁场垂直方向做圆周运动）(26)【答案】螺旋线

【解析】电子沿着磁场方向做匀速运动，在垂直于磁场的平面内做匀速圆周运动，运动轨迹是一螺旋线。

(27)【答案】 $\frac{1}{m_n^*} = \sqrt{\frac{m_x^* \alpha^2 + m_y^* \beta^2 + m_z^* \gamma^2}{m_x^* m_y^* m_z^*}}$

【解析】当有效质量各向异性时，为了保持公式形式的一致性，将计入 s，用  $\frac{1}{m_n^*} =$

$\sqrt{\frac{m_x^* \alpha^2 + m_y^* \beta^2 + m_z^* \gamma^2}{m_x^* m_y^* m_z^*}}$  来代替原本的有效质量即可。。

5. 【水木璐研解析】(28)【答案】0.54 (29)【答案】受主能级

(30)【答案】0.35 (31)【答案】施主能级

【解析】在本征硅中掺入金，会产生两个施主能级和一个受主能级。在 n 型硅中，金主要表现为受主，会引入一个距离导带底 0.54eV 的受主能级；p 型硅中金主要表现为施主，会引入一个距离导带底 0.35eV 的施主能级。

(32)【答案】禁带中线 (33)【答案】深能级

【解析】距离禁带中线比较近的深能级是有效的复合中心。

6. 【水木璐研解析】(34)【答案】不随温度变化 (35)【答案】随温度升高而增大

【解析】强电离区的多子由全部电离的杂质提供，所以升高温度多子浓度不会变化；少子浓度主要是由本征载流子提供，升高温度时本征载流子浓度增大所以少子浓度增大。

## 二、选择题

1 【水木璐研解析】【答案】A

【解析】电子有效质量在导带底附近为正值，在价带顶附近为负值，这是因为  $m_n^*$  概括了半导体内部势场的作用。A 对 CE 错；有效质量的引入不改变半导体原来的性质，例如：惯性质量的大小不会变，B 错。电子的有效质量是通过载流子的回旋共振实验得到的，为了能观测出明显的共振吸收峰，一般要求样品纯度较高，D 错。

2. 【水木璐研解析】【答案】E

【解析】空穴有效质量的正负与空穴有几种有效质量无关，A 错；引入空穴的概念后，就可以把价带中大量电子对电流的贡献用少量的空穴表达出来。所以说导带也有大量空穴是错的，导带基本为空，B 错；能带图中空穴能量向下是增大，C 错；是否具有旋转椭球面的等能面与空穴的有效质量是否是各向异性有关，而与空穴有效质量的种类无关，D 错。

3. 【水木璐研解析】【答案】C

【解析】升高温度，本征激发逐渐增强，本征载流子浓度逐渐增大，到高温本征激发区时，载流子浓度不再以电离杂质浓度为主，而是以本征载流子浓度为主，且随着温度的升高，载流子浓度还在增大，故 A 错 C 对；在从低温弱电离区到高温本征激发区的过程，费米能级的位置是先升高再下降，直到接近禁带中线，存在极大值，BDE 错；

4. 【水木璐研解析】【答案】B

【解析】300K 下，硅的电子迁移率为最小是  $1450\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，锗是  $3800\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ ，砷化镓是  $8000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，A 错 B 对；砷化镓的导带极小值位于布里渊区的中心，其等能面是球形等能面，C 错；有效质量的大小与禁带宽度大小没有因果关系，D 错；器件工作温度的高低与禁带宽度、掺杂浓度等有关，导带的结构不是决定器件工作温度的因素，E 错。

5. 【水木璐研解析】【答案】A

【解析】n 型半导体的少子为空穴，CD 错；一般来说空穴不仅是位置的函数，也是时间的函数。这时半导体中同时存在扩散电流和漂移电流。小注入条件下，单位时间单位体积中复合消失的空穴数是  $\frac{\Delta p}{\tau}$ ，B 错；则单位体积内空穴随时间的变化率为： $\frac{\partial p}{\partial t}$ ，E 错。

6. 【水木璐研解析】【答案】E

【解析】声学波与光学波在一定条件下的散射都不可以忽略，AB 错；声学波和光学波都包括两横一纵三支格波，C、D 错；声学波振动中原胞中两个原子沿同一方向振动，代表原胞质心的振动。光学波的原胞中两个原子沿相反的方向振动，代表原胞质心不动，E 对。

7. 【水木璐研解析】【答案】E

【解析】300K 下，硅的电子迁移率是  $1450\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，锗是  $3800\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，砷化镓是  $8000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，铋化铟电子迁移率  $80000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

8. 【水木璐研解析】【答案】D

【解析】非平衡少子寿命是指非平衡载流子浓度衰减到原值  $1/e$  所经历的时间，A 错 D 对； $\tau = \frac{1}{P}$ ，是指平均自由时间（载流子在连续两次散射之间的加速运动的时间的平均值）在数值上等于散射概率的倒数，B 错； $\tau$  越小，复合率越大，C、E 错；

9. 【水木璐研解析】【答案】A

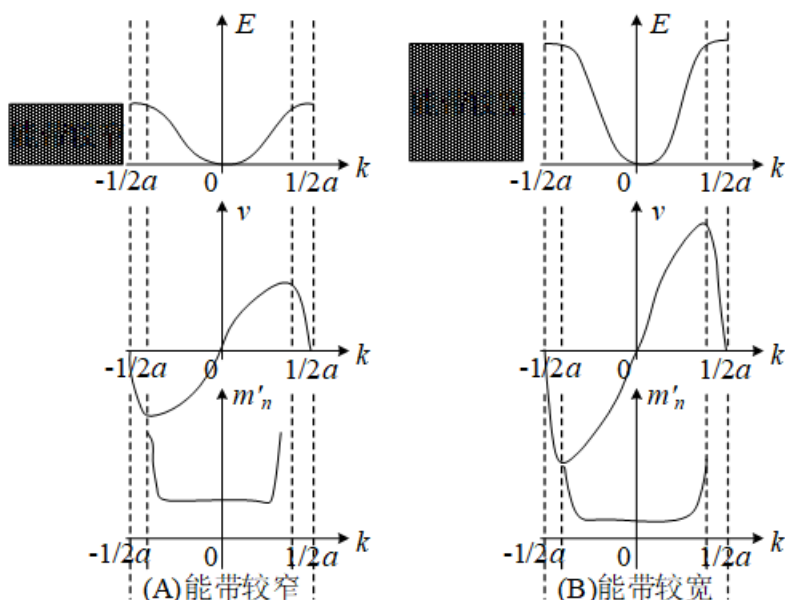
【解析】电流包括电子电流和空穴电流两部分，B、C 错；半导体内部非平衡载流子浓度分布不均匀，同时又有外加电场与非平衡载流子的浓度梯度，于是扩散电流与漂移电流均存在，此时扩散电流由总浓度梯度  $dn/dx$ 、 $dp/dx$  定，E 错；又  $J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{d\Delta n}{dx}$  可知 A 对。

10. 【水木璐研解析】【答案】E

【解析】光照产生的非平衡载流子  $\Delta n = \Delta p \ll n_i$ ，A、B、C、D 错 E 对。

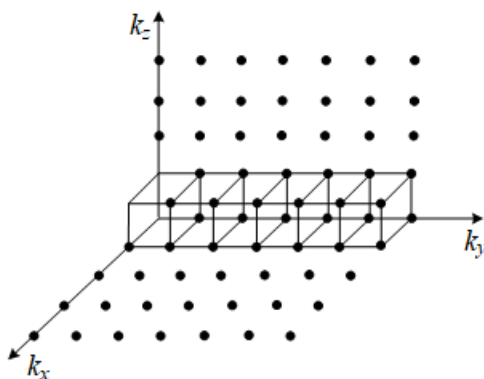
三、简答题

1. 【水木璐研解析】由于外层电子能级分裂的厉害，能带很宽，所以 A 为价电子情况



$$\begin{aligned}
 2. \quad k_x &= \frac{2\pi n_x}{L_x} & n_x &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\
 k_y &= \frac{2\pi n_y}{L_y} & n_y &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\
 k_z &= \frac{2\pi n_z}{L_z} & n_z &= 0, \pm 1, \pm 2, \dots
 \end{aligned}$$

其中  $n_x, n_y, n_z$  为整数;  $L_x, L_y, L_z$  为线度;  $L_x L_y L_z = V$ , 为晶体体积  $k$  的取值特点: 只能由整数组  $(n_x, n_y, n_z)$  决定, 对应不同波矢  $k$ , 代表着电子不同的允许能量状态。



3. 【水木路研解析】方法一: 当价带  $k$  状态空出时, 价带电子的总电流如同一个带正电的粒子以  $k$  状态电子速度  $v(k)$  运动所产生的电流, 因此把价带的空状态看成是带正电的粒子, 称为空穴。外电场下, 所有电子的  $k$  状态都以  $\frac{dk}{dt} = \frac{-qE}{\hbar}$  变化, 所以电子运动时, 空穴也以同样的速率运动, 且空穴的  $k$  状态变化规律与电子相同, 加速度相同。

又  $f = m_n^* a$ , 所以价带顶部附近电子的加速度为:

$$a = \frac{f}{m_n^*} = \frac{-qE}{m_n^*}$$

又因为空穴带正电, 在电场中受力应该是  $+qE$ , 所以价带顶空穴的加速度为

$$a = \frac{f}{m_p^*} = \frac{qE}{m_p^*}$$

所以  $m_p^* = -m_n^*$ 。

方法二：画示意图，用  $\frac{1}{m_n^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2}$ ，说明一下电子和空穴的能带结构相同，所以式子二阶导相等，即二者大小相等，但又因为空穴与电子电荷量大小相等，符号相反，所以  $m_p^* = -m_n^*$ 。

4. 【水木璐研解析】  $p_0 + n_D^+ = n_0$

$$n_0 = N_D + p_0 \quad n_i^2 = n_0 p_0 \text{ 所以 } n_0 = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$\text{又因为 } n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_0 T}\right)$$

$$\text{所以 } E_F = k_0 T \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) + E_i$$

5. 【水木璐研解析】能带中，能量  $E \sim E + dE$  中无限小的能量间隔内的量子态数。

$$g(E) = \frac{V(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} (E - E_c)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{简并半导体的电子浓度 } n_0 = \frac{(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} \int_{E_c}^{\infty} \frac{(E - E_c)^{\frac{1}{2}}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_0 T}\right)} dE = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_c}^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}}}{1 + e^{x - \xi}} dx, \text{ 令 } \xi =$$

$$-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}, \int_{E_c}^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}}}{1 + e^{x - \xi}} dx = F_{\frac{1}{2}}(\xi) = F_{\frac{1}{2}}\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right)$$

$$\text{得到 } n_0 = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}(\xi)$$

6. 【水木璐研解析】电导有效质量的推导

$$[\text{电导有效质量推导}] \frac{1}{m_c} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{m_c} + \frac{2}{m_t} \right)$$

(1) Si: Si 的导带极值在  $\langle 100 \rangle$  方向，共 6 个，若总电子浓度为  $n$ ，则每个能谷中电子浓度  $\frac{n}{6}$

若电场方向沿  $[100]$ ，则在  $[100]$  放学电子迁移率为  $u_1 = \frac{q\tau}{m_i}$ ，

$$u_2 = u_3 = \frac{q\tau}{m_t}$$

因此总电流密度

$$\begin{aligned} J &= nqu_n E = \frac{n}{6} \times 2 \times (qu_1 E_x + qu_2 E_x + qu_3 E_x) \\ &= \frac{nq}{3} \left( \frac{q\tau}{m_i} + \frac{2q\tau}{m_t} \right) E_x = nq \frac{q\tau}{m_c} E_x \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{1}{m_c} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{m_i} + \frac{2}{m_t} \right)$$

(2) Ge:

Ge 的导电极值在  $\langle 111 \rangle$  方向，共 8 个，

又  $\because$  在各方向只占半个椭球

因此若电子浓度为  $n$ ，则在每个能谷中电子浓度为  $\frac{n}{4}$

假设电场沿  $[001]$ ，沿  $z$  方向电流密度  $J_z = J_L \cos \alpha + J_t \sin \alpha$

$$J_L = nquE_c, J_t = nquE_t, E_c = E_z \cos \alpha, E_t = E_z \sin \alpha$$

又∵对称性∴在4个能谷中电流密度相同

$$qu_c E_z \cos^2 \alpha + nqu_t E_z \sin^2 \alpha$$

$$\text{又} \because \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}, \sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, u_c = \frac{q\tau}{m_c}, u_t = \frac{q\tau}{m_t}$$

$$\begin{aligned} \therefore J_z &= nq \cdot \frac{q\tau}{3m_c} E_z + nq \cdot \frac{2q\tau}{3m_t} E_z \\ &= nq \cdot \frac{q\tau}{3} \left( \frac{1}{m_c} + \frac{2}{m_t} \right) \cdot E_z = nq \cdot \frac{q\tau}{m_c} E_z \end{aligned}$$

$$\therefore m_c = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{m_c} + \frac{2}{m_t} \right)$$

7. 【水木璐研解析】扩散流密度：单位时间内通过单位面积的粒子数，单位为  $s^{-1}cm^{-2}$

$S_p = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$  一般情况下不是常数，有例外，当光照均匀半导体，且光在表面薄层被吸收样品厚度  $W \ll L_p$ ，此时，扩散流密度为常数。

四、大题

1. 【水木璐研解析】方法： $D_- = \left( \frac{2N_D}{N_C} \right) \exp\left(\frac{E_C - E_D}{k_0T}\right)$   
 $N_D = 2.13 \times 10^{17} cm^{-3}$

方法二： $n_0 = \frac{N_D}{1 + \frac{2n_0}{N_C} \exp\left(\frac{E_C - E_D}{k_0T}\right)}$   
 $N_D = 2.63 \times 10^{17} cm^{-3}$

掺杂浓度上限与其半导体材料和掺杂杂质的种类，温度等因素有关。

2. 【水木璐研解析】 $N_D = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} \left[ 1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_0T}\right) \exp\left(\frac{E_C - E_D}{k_0T}\right) \right] F_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_F - E_C}{k_0T}\right)$   
 $N_D = 1.02 \times 10^{20} cm^{-3}$

3. 【水木璐研解析】 $D_- = \left( \frac{2N_D}{N_C} \right) \exp\left(\frac{E_C - E_D}{k_0T}\right)$

解得： $T = 80K$

$$n_i^2 = N_D N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{k_0T}\right)$$

解得： $T = 506K$

4. 【水木璐研解析】①  $D_p \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} = \frac{\Delta p(x)}{\tau p}$

样品足够厚，边界条件：

$$\begin{cases} \Delta p(x)|_{x=0} = (\Delta p)_0 \\ \Delta p(x)|_{x \rightarrow \infty} = 0 \end{cases}$$

解得： $\Delta p(x) = (\Delta p)_0 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$

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

②  $\begin{cases} \Delta p(x)|_{x=0} = (\Delta p)_0 \\ \Delta p(x)|_{x=W} = 0 \end{cases}$

满足双极型晶体管基区宽度条件：远小于扩散长度即  $W \ll L_p$

$$\therefore S_p = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} = (\Delta p)_0 \frac{D_p}{W}$$

$$\textcircled{3} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau} + g_p$$

$$\text{解得: } \Delta p(t) = g_p \tau \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

$$\text{平衡时, } \Delta p(t) = g_p \tau$$