

高等学校微电子类  
“十三五”规划教材

# 半导体物理与器件 考研辅导

主编 张静



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校微电子类“十三五”规划教材

# 半导体物理与器件 考研辅导

主编 张 静

西安电子科技大学出版社

## 内容简介

本书是微电子专业课程“半导体物理学”和“电子器件”的习题集和考研真题题集，配合的教材分别是刘恩科编著的《半导体物理学（第七版）》和姜岩峰主编的《电子器件》。

本书分两大部分，共 14 章，内容包括半导体中的电子状态，半导体中杂质和缺陷能级，半导体中载流子的统计分布，半导体的导电性，非平衡载流子，PN 结，金属和半导体的接触，半导体表面与 MIS 结构，半导体异质结构，半导体的光、电、热、磁效应，PN 结二极管，双极型晶体管，结型场效应晶体管，MOS 型场效应晶体管等。书中练习题形式多样，内容涵盖了所有考研大纲要求的知识点。本书内容丰富、翔实，是课堂教学及考研常备手册之一。

本书可作为高等院校微电子、电子、通信、自动化等相关专业的考研辅导书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

半导体物理与器件考研辅导/张静主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2018. 11  
ISBN 978-7-5606-5128-6

I. ① 半… II. ① 张… III. ① 半导体物理—研究生—入学考试—自学参考资料  
② 半导体器件—研究生—入学考试—自学参考资料 IV. ① O47 ② TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 249807 号

策划编辑 刘小莉

责任编辑 杨 璠 高雯婧

出版发行 西安电子科技大学出版社 (西安市太白南路 2 号)

电 话 (029) 88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11.75

字 数 277 千字

印 数 1~1000 册

定 价 26.00 元

ISBN 978-7-5606-5128-6/O

**XDUP 5430001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

# 前 言

本书是基于微电子学专业基础类课程的辅助资料，重点针对考研课程而设计，并在教学改革的基础上，根据高等院校微电子专业学生的培养目标要求编写而成的。本书可作为电气、电子、通信、材料、机械等专业的考研辅导书，也可作为电子技术工程人员的参考书。

编者在多年的教学中发现，学生在学习“半导体物理”类基础学科中存在比较大的困难——理论理解不透彻，对于微观世界缺乏想象力，学起来感觉枯燥无味，无从下手。教师在课堂教学中也存在很多的困难。在这种背景下编者决定编写本书，通过课堂教学中的知识点，特别是难以理解的概念，让学生带着问题去“做”，在“做”的同时思考问题，掌握知识。

需要说明的是，本书第一部分与刘恩科编著的《半导体物理学（第7版）》一书相配合，根据大部分高校的考研大纲进行设计，重点涵盖了“半导体物理学”的考研真题，分章整理，并附上了部分答案。本书的第二部分配合姜岩峰主编的《电子器件》一书。每章后面都配有考研真题。

本书由张静主编。在出版过程中得到了许多老师及同学的帮助和支持，在此表示由衷的感谢。

限于编者水平，书中难免有不妥之处，恳请读者批评、指正。

编者

2018年9月

# 目 录

## 第一部分 半导体物理学

绪论 .....	2
第 1 章 半导体中的电子状态 .....	4
1.1 主要知识 .....	4
1.2 典型例题 .....	7
1.3 练习题 .....	9
【考研真题】 .....	12
第 2 章 半导体中杂质和缺陷能级 .....	17
2.1 主要知识 .....	17
2.2 典型例题 .....	19
2.3 练习题 .....	19
【考研真题】 .....	23
第 3 章 半导体中载流子的统计分布 .....	26
3.1 主要知识 .....	26
3.2 典型例题 .....	29
3.3 练习题 .....	31
【考研真题】 .....	35
第 4 章 半导体的导电性 .....	41
4.1 主要知识 .....	41
4.2 典型例题 .....	43
4.3 练习题 .....	44
【考研真题】 .....	48
第 5 章 非平衡载流子 .....	60
5.1 主要知识 .....	60
5.2 典型例题 .....	62
5.3 练习题 .....	63
【考研真题】 .....	68
第 6 章 PN 结 .....	78
6.1 主要知识 .....	78
6.2 典型例题 .....	79
6.3 练习题 .....	79

【考研真题】 .....	82
第 7 章 金属和半导体的接触 .....	95
7.1 主要知识 .....	95
7.2 典型例题 .....	97
7.3 练习题 .....	98
【考研真题】 .....	102
第 8 章 半导体表面与 MIS 结构 .....	106
8.1 主要知识 .....	106
8.2 典型例题 .....	107
8.3 练习题 .....	109
【考研真题】 .....	113
第 9 章 半导体异质结构 .....	121
9.1 主要知识 .....	121
【考研真题】 .....	121
第 10 章 半导体的光、电、热、磁效应 .....	123
10.1 主要知识 .....	123
10.2 练习题 .....	124

## 第二部分 电子器件

第 11 章 PN 结二极管 .....	126
11.1 主要知识 .....	126
11.2 典型例题 .....	129
11.3 练习题 .....	130
【考研真题】 .....	138
第 12 章 双极型晶体管 (BJT) .....	146
12.1 主要知识 .....	146
12.2 典型例题 .....	150
12.3 练习题 .....	151
【考研真题】 .....	159
第 13 章 结型场效应晶体管 (JFET) .....	162
13.1 主要知识 .....	162
13.2 典型例题 .....	163
13.3 练习题 .....	164
第 14 章 MOS 型场效应晶体管 (MOSFET) .....	168
14.1 主要知识 .....	168
14.2 典型例题 .....	171
14.3 练习题 .....	172
【考研真题】 .....	181

# 第一部分

## 半导体物理学

# 绪 论

## (一) 主要知识

(1) 半导体：室温下电阻率介于  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  和  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  之间，电子激发能隙大约为  $0 \sim 3 \text{ eV}$  的物质称为半导体。半导体的导电性介于金属和绝缘体之间。按导电性(电阻)固体材料可分成：超导体、导体、半导体、绝缘体。

(2) 半导体具有以下重要特性：

- ① 导电性处于金属和绝缘体之间；
- ② 电阻率与温度的关系很大，而且电阻率一般具有负温度系数；
- ③ 电阻率与掺杂情况(杂质种类和浓度)有很大关系；
- ④ 存在两种(电子、空穴)载流子；
- ⑤ 存在比金属要高的温差电动势率和 Hall 系数；
- ⑥ 具有较高的光电导等光敏性；
- ⑦ 半导体与金属接触，或者半导体 PN 结，具有非线性电流-电压关系，并且具有整流特性；
- ⑧ 具有明显的表面电场效应。

(3) 元素半导体：Si 和 Ge 为四族元素半导体，由 4 个最近邻的原子构成共价键，其晶体结构主要是金刚石结构。

Si(硅)：当前 80% 以上的半导体器件和集成电路以硅作为原材料，原因如下：

- ① 硅的丰裕度高，硅的主要来源是石英砂(氧化硅或二氧化硅)和其他硅酸盐。
- ② 更高的熔化温度( $1420^\circ\text{C}$ )允许更宽的工艺容限。
- ③ 氧化硅可自然生成。

硅的工作温度通常是  $130 \sim 150^\circ\text{C}$ ，一些领域需要更高的工作温度(一般为  $500 \sim 1000^\circ\text{C}$ )时，可选用 C、GaN、SiC 等材料。

Ge(锗)：1948 年锗晶体管的诞生引起了电子工业的革命，打破了电子管一统天下的局面。

## (二) 练习题

- (1) 半导体定义为电阻率处于 \_\_\_\_\_  $\sim$  \_\_\_\_\_  $\Omega \cdot \text{cm}$  范围内的材料。
- (2) 半导体按材料可分为：\_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_ 两种。
- (3) 半导体的基本电学特性：
  - ① 导电性处于 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_ 之间。



② 电阻率与温度的关系很大，而且电阻率一般随温度的升高而\_\_\_\_\_。

③ 半导体中掺入杂质后，电阻率将大大\_\_\_\_\_，而且半导体掺入杂质后，在一定温度范围内可呈现出与金属类似的正的电阻温度系数。

④ 存在两种(正、负电荷)载流子：\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。

(4) 对半导体的基本要求：因为半导体的性质与杂质和缺陷有很大的关系，所以要求制造器件的原始半导体材料必须非常\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。

# 第 1 章 半导体中的电子状态

## 1.1 主要知识

### 1. 金刚石结构和共价键

由同种晶体组成的元素半导体,如 Si、Ge 半导体,其原子组合成晶体靠的是共价键结合,即其原子间无负电性差,它们通过共用一对自旋相反而配对的价电子结合在一起。Si 和 Ge 具有金刚石结构。

### 2. 闪锌矿结构和化学键

III-V 族和 II-VI 族半导体材料都具有闪锌矿(立方 ZnS)结构。

化学键:共价键+离子键。

### 3. 纤锌矿结构

ZnS、ZnSe、CdS、CdSe 等都可具有闪锌矿和纤锌矿两种结构(对于电负性相差较大的两种元素,将倾向于构成纤锌矿结构)。

特点:类似闪锌矿结构(原子四面体排列),但具有六方对称性(密排面沿着 $\langle 001 \rangle$ 方向按 ABAB...堆积)。

### 4. Bloch 波函数

Bloch 定理:

$$\psi_k(x) = u_k(x) \exp(i2\pi kx) \quad (\text{调幅平面波})$$

其中, $k$  为波矢, $u_k(x)$  是一个与晶格同周期的周期性函数,即

$$u_k(x) = u_k(x + na)$$

其中, $n$  是整数, $a$  为晶格常数。

用波矢  $k$  来描述晶体电子公有化运动的状态,即  $|k| = 2\pi/\lambda$ 。

### 5. 电子能带

可以推理出:晶体电子不同  $k$  状态的能量  $E(k)$  为能带状态。

具体的  $E(k)-k$  关系需采用近似方法求解单电子薛定谔方程来得到;不同晶体的能带结构可用不同  $E(k)-k$  关系图来表示。

### 6. 金刚石的电子能量与原子间距的关系

图 1.1 为金刚石结构电子能量与原子间距的关系,由该图可以说明很多问题,例如:

- ①  $E_g$  随着温度的升高而变窄:温度升高使原子间距增大,则  $E_g$  变窄。
- ② 光吸收的本征吸收限随着温度的降低而往短波长方向移动,这是  $E_g$  变宽的缘故。

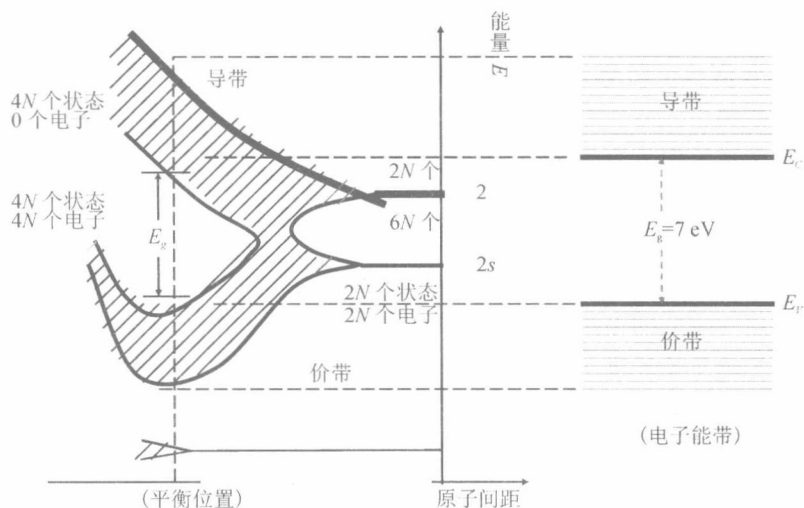


图 1.1 金刚石结构电子能量与原子间距的关系图

### 7. $E_g$ 与温度的经验关系

一般  $E_g$  随着温度的升高而变窄(由于热膨胀和电子-声子相互作用):

$$dE_g/dT = -\alpha \times 10^{-4} \text{ eV/K}$$

其中,  $\alpha=2.3(\text{Si}), 3.7(\text{Ge}), 5.0(\text{GaAs})$ 。

对 Si:

$$E_g(T) = 1.17 - 4.73 \times 10^{-4} T^2 / (636 + T)$$

对 Ge:

$$E_g(T) = 0.74 - 4.77 \times 10^{-4} T^2 / (235 + T)$$

对 GaAs:

$$E_g(T) = 1.52 - 5.41 \times 10^{-4} T^2 / (204 + T)$$

但是也有例外,  $E_g$  随着温度的升高而变宽( $\alpha$  为负值):

$$\text{HgTe}(\alpha = -5.6), \text{PbTe}(\alpha = -4)$$

### 8. 布里渊区

自由电子的  $E(k)-k$  关系是抛物线关系, 而晶体电子的  $E(k)-k$  关系是一系列周期性函数, 在  $k=n/a$  时出现能量不连续, 从而形成许多容许带和禁带; 容许带出现在第一、第二、第三、...、布里渊区中, 禁带出现在布里渊区边界上。

由于周期性, 即  $E(k)=E(k+n/a)$ , 则  $k$  和  $k+n/a$  表示相同的状态。因此, 可以只取第一布里渊区中的  $k$  值来描述电子的所有能量状态, 而将其他区域移动  $n/a$  合并到第一布里渊区; 在考虑能带结构时, 只需要讨论第一布里渊区就够了。这时第一布里渊区中的  $E(k)$  是  $k$  的多值函数, 这种第一布里渊区常称为简约布里渊区, 该区域内的波矢称为简约波矢。

### 9. 能带极值附近的 $E(k)-k$ 关系和载流子的有效质量

有效质量的数值可由回旋共振实验来确定,其特点如下:

(1) 取决于材料。

(2) 只在能带极值附近有意义。

(3) 可正可负。

(4) 大小与能带宽窄有关:内层能带窄,  $d^2E/dk^2$  小,有效质量大;外层能带宽,  $d^2E/dk^2$  大,有效质量小。因而,外层电子在外力作用下可以获得较大的加速度。

(5) 对于带顶和带底的电子,有效质量恒定。

### 10. 晶体电子的平均速度 $v$

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \frac{\hbar k}{m_n^*}, v_{\text{三维}} = \frac{1}{\hbar} \nabla_k E(k), a = \frac{f}{m_n^*}, m_n^* = \frac{\hbar^2}{(d^2E/dk^2)}$$

$$m_{xx}^* = \frac{\hbar^2}{(\partial^2 E/\partial k_x^2)}, m_{yy}^* = \frac{\hbar^2}{(\partial^2 E/\partial k_y^2)}, m_{zz}^* = \frac{\hbar^2}{(\partial^2 E/\partial k_z^2)}$$

### 11. 晶体电子的加速度 $a$

在外电场  $E$  的作用下,电子受到力  $f = -q|E|$ ,使得在  $dt$  时间内产生位移  $ds$ ,则外力  $f$  对电子所作的功即等于电子能量的变化:  $dE = f ds = f v dt = (f/\hbar)(dE/dk)dt$ ,而  $dE = (dE/dk)dk$ ,所以  $f = \hbar(dk/dt)$ 。

这就是说,在外力  $f$  作用下,电子的状态  $k$  不断变化,其变化率正比于  $f$ 。

### 12. 电子的有效质量 $m_n^*$ 与能带宽度有关

由于  $m_n^*$  概括了晶体内部势场的作用,可正可负;同时它也反映了在外力作用下惯性的大小。能带极值附近电子的  $m_n^*$  大小与能带本身的宽度有关:能带越窄,  $dE^2/dk^2$  就越小,则  $m_n^*$  越大。因此,对于内层电子的能带,宽度较窄,  $m_n^*$  大;对于外层电子的能带,宽度较宽,  $m_n^*$  小,从而在外力作用下可以获得较高的加速度。

### 13. 空穴

当满带顶附近有空状态  $k$  时,整个能带中的电流以及电流在外电磁场作用下的变化,与一个带正电荷  $q$ ,具有正有效质量  $|m^*|$  和速度  $v(k)$  的粒子的情况一样。

将价带电子的导电作用等效为带正电荷的准粒子的导电作用。这种假想的粒子称为空穴。

### 14. Si 和 Ge 的实际能带结构

(1) 导带底附近的等能面方程(取导带底中心为能量零点时):

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{2} \left\{ \frac{k_1^2 + k_2^2}{m_t} + \frac{k_3^2}{m_l} \right\}$$

横向有效质量  $m_t = m_x^* = m_y^*$ ,纵向有效质量  $m_l = m_z^*$ 。

(2) 价带顶在  $k=0$  处,有  $2+1$  个能带结构:

① 4 度简并态:

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{2m_0} \{ Ak^2 \pm [B^2 k^4 + C^2 (k_x^2 k_y^2 + k_y^2 k_z^2 + k_z^2 k_x^2)]^{1/2} \}$$

② 2 度简并态:

$$E(k) = -\Delta - \left(\frac{\hbar^2}{2m_0}\right)Ak^2$$

(3) 有效质量的数值:

对 Si:

$$m_l = 0.97m_0, m_t = 0.19m_0$$

$$m_{pl} = 0.16m_0, m_{ph} = 0.53m_0, m_{p3} = 0.245m_0, \Delta \approx 0.04 \text{ eV}$$

对 Ge:

$$m_l = 0.12m_0, m_t = 0.0819m_0$$

$$m_{pl} = 0.044m_0, m_{ph} = 0.36m_0, m_{p3} = 0.077m_0, \Delta \approx 0.29 \text{ eV}$$

对 GaAs:

$$m_n = 0.067m_0; m_{pl} = 0.082m_0, m_{ph} = 0.45m_0$$

### 15. GaAs 的能带结构

(1) 导带: 导带底(主能谷)在  $k=0$ , 等能面是球面,  $m_n^* = 0.067m_0$ ; 在导带底以上还有 2 个导带极小值(L 点和 X 点), L 点(称为次能谷)比导带底约高 0.29 eV, X 点比导带底约高 0.46 eV, L 点和 X 点电子的有效质量分别为  $0.55m_0$  和  $0.85m_0$ 。

(2) 价带: 价带顶稍微偏离  $k=0$ ; 轻空穴的有效质量为  $0.082m_0$ , 重空穴的有效质量为  $0.45m_0$ ;  $\Delta=0.34 \text{ eV}$ 。

(3) 禁带宽度: 室温下  $E_g = 1.42 \text{ eV}$ , 温度关系为

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T_2}{T + \beta}$$

其中,  $E_g(0) = 1.59 \text{ eV}$ ;  $\alpha = 5.405 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ;  $\beta = 204 \text{ K}$ 。

## 1.2 典型例题

**例 1.1** 证明: 对于能带中的电子  $e'f$ ,  $k$  状态和  $-k$  状态的电子速度大小相等、方向相反, 即:  $v(k) = -v(-k)$ 。解释为什么无外场时, 晶体总电流等于零。

**解**  $k$  状态电子的速度为

$$v(k) = \frac{1}{\hbar} \left[ \frac{\partial E(k)}{\partial k_x} \mathbf{i} + \frac{\partial E(k)}{\partial k_y} \mathbf{j} + \frac{\partial E(k)}{\partial k_z} \mathbf{k} \right] \quad (1-1)$$

同理,  $-k$  状态电子的速度为

$$v(-k) = \frac{1}{\hbar} \left[ \frac{\partial E(-k)}{\partial k_x} \mathbf{i} + \frac{\partial E(-k)}{\partial k_y} \mathbf{j} + \frac{\partial E(-k)}{\partial k_z} \mathbf{k} \right] \quad (1-2)$$

从一维情况容易看出:

$$\frac{\partial E(-k)}{\partial k_x} = -\frac{\partial E(k)}{\partial k_x} \quad (1-3)$$

同理有

$$\frac{\partial E(-k)}{\partial k_y} = -\frac{\partial E(k)}{\partial k_y} \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial E(-k)}{\partial k_x} = -\frac{\partial E(k)}{\partial k_x} \quad (1-5)$$

将式(1-3)、式(1-4)、式(1-5)代入式(1-2)后得

$$v(-k) = -\frac{1}{\hbar} \left[ \frac{\partial E(k)}{\partial k_x} \mathbf{i} + \frac{\partial E(k)}{\partial k_y} \mathbf{j} + \frac{\partial E(k)}{\partial k_z} \mathbf{k} \right] \quad (1-6)$$

利用式(1-1)即得： $v(-k) = -v(k)$ 。得证。

因为电子占据某个状态的概率只同该状态的能量有关，即  $E(k) = E(-k)$ ，故电子占有  $k$  状态和  $-k$  状态的概率相同，且  $v(k) = -v(-k)$ ，故这两个状态上的电子电流相互抵消，晶体中总电流为零。

评析：该题从晶体中作共有化运动电子的平均漂移速度与能量  $E$  的关系以及相同能量状态电子占有的概率相同出发，证明  $k$  状态和  $-k$  状态的电子速度大小相等、方向相反，以及无电场时，晶体总电流为零。

例 1.2 已知一维晶体的电子能带可写为

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{m_0 a^2} \left[ \frac{7}{8} - \cos(2\pi ka) + \frac{1}{8} \cos(6\pi ka) \right]$$

其中， $a$  为晶格常数。试求：

- (1) 能带的宽度；
- (2) 能带底部和顶部电子的有效质量。

解 (1) 由  $E(k)$  关系得

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dk} &= \frac{\pi \hbar^2}{m_0 a^2} \left[ 2\sin(2\pi ka) + \frac{3}{4} \sin(6\pi ka) \right] \\ &= \frac{\pi \hbar^2}{m_0 a^2} \left( 3\sin^3 \pi ka - \frac{1}{4} \sin 2\pi ka \right) \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\frac{d^2 E}{dk^2} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} \left( 18\sin^2 2\pi ka \cos 2\pi ka - \frac{1}{2} \cos 2\pi ka \right) \quad (1-8)$$

令  $\frac{dE}{dk} = 0$ ，得

$$\sin^2 2\pi ka = \frac{1}{12}$$

所以

$$\cos 2\pi ka = \pm \left( \frac{11}{12} \right)^{\frac{1}{2}}$$

当  $\cos 2\pi ka = \sqrt{\frac{11}{12}}$  时，代入式(1-8)可得

$$\frac{d^2 E}{dk^2} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} \left( 18 \times \frac{1}{12} \times \sqrt{\frac{11}{12}} - \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{11}{12}} \right) = \sqrt{\frac{11}{12}} \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} > 0$$

对应  $E(k)$  的极小值。

当  $\cos 2\pi ka = -\sqrt{\frac{11}{12}}$  时，代入式(1-8)可得

$$\frac{d^2 E}{dk^2} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} \left( -18 \times \frac{1}{12} \times \sqrt{\frac{11}{12}} + \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{11}{12}} \right) = \sqrt{\frac{11}{12}} \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} < 0$$

对应  $E(k)$  的极大值。

根据上述结果,求得  $E_{\min}$  和  $E_{\max}$ ,即可求得能带宽度。

$$E_{\min} = \frac{\hbar^2}{m_0 a^2} \left[ \frac{7}{8} - \frac{11}{8} \left( \sqrt{\frac{11}{12}} \right)^{\frac{3}{2}} \right] = \frac{\hbar^2}{m_0 a^2} \left[ \frac{7}{8} - \left( \frac{11}{12} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

$$E_{\max} = \frac{\hbar^2}{m_0 a^2} \left[ \frac{7}{8} + \left( \frac{11}{12} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

故能带宽度为

$$\Delta E = E_{\max} - E_{\min} = 2 \left( \frac{11}{12} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\hbar^2}{m_0 a^2}$$

(2) 能带底部和顶部电子的有效质量为

$$(m_n^*)_{\text{带底}} = \left[ \frac{1}{\hbar^2} \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right)_{\text{底}} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\hbar^2} \sqrt{\frac{11}{12}} \frac{\pi^2 \hbar^2}{m} \right]^{-1} = 4 \sqrt{\frac{12}{11}} m_0 = 4.18 m_0$$

$$(m_n^*)_{\text{带顶}} = \left[ \frac{1}{\hbar^2} \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right)_{\text{顶}} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\hbar^2} \left( -\sqrt{\frac{11}{12}} \frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0} \right) \right]^{-1} = -4 \sqrt{\frac{12}{11}} m_0 = -4.18 m_0$$

评析:本题根据能带宽度为能带顶和能带底的能量之差,即能量最大值和最小值之差进行解答。

## 1.3 练 习 题

### 一、填空题

- Si、Ge 半导体是\_\_\_\_\_结构,其原子组合成晶体靠\_\_\_\_\_结合。
- 闪锌矿结构的材料有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_;混合键是\_\_\_\_\_键+\_\_\_\_\_键。
- ZnS、ZnSe、CdS、CdSe 等都可具有\_\_\_\_\_矿和\_\_\_\_\_矿两种结构。
- 共价键具有两个特点:\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
- 体心立方晶体中,原子线密度最大的为\_\_\_\_\_晶向。
- 用\_\_\_\_\_来描述晶体电子共有化运动的状态。
- 半导体能带极值附近有效质量的确定方法:\_\_\_\_\_。
- 越是外层电子,共有化运动越\_\_\_\_\_,能带越\_\_\_\_\_, $\Delta E$ 越\_\_\_\_\_。
- 金刚石的电子能量带隙随原子间距的增加而\_\_\_\_\_。
- 光吸收的本征吸收线随着温度的降低而往\_\_\_\_\_波长方向移动,这是  $E_g$  变宽的缘故。
- $E_g$  与温度的经验关系:一般地, $E_g$  随着温度的升高而变\_\_\_\_\_ (由于热膨胀和电子-声子相互作用)。
- 脱离共价键所需的最低能量就是\_\_\_\_\_,用\_\_\_\_\_来表示。
- 能带中的能级是很密集的,可以把晶体中共有化电子的能量  $E$  视为\_\_\_\_\_连续的。

14. 一个允带对应的  $K$  值范围称为\_\_\_\_\_，禁带出现在\_\_\_\_\_。

15. 满带是由价电子组成的，所以满带又称为\_\_\_\_\_。

16. 能带底电子的有效质量为\_\_\_\_\_值，能带顶电子的有效质量为\_\_\_\_\_值。

17. 有效质量的特点：

(1) 对于能带极值附近的电子，只要知道其有效质量\_\_\_\_\_，就能得到极值附近的\_\_\_\_\_。

(2) 电子的有效质量不是电子的实际(惯性)质量，它概括了晶体\_\_\_\_\_的作用，它只有在\_\_\_\_\_附近才有意义。

18. 电子的有效质量与能带宽度有关：能带越窄， $m_n^*$  就越\_\_\_\_\_。对于内层电子的能带，宽度较窄， $m_n^*$  \_\_\_\_\_；对于外层电子的能带，宽度较大， $m_n^*$  \_\_\_\_\_，从而在外力作用下可以获得较高的加速度。

19. (1) 各向同性的\_\_\_\_\_形等能面情况：能带极值在  $k=0$  处(GaAs 的情况)。

(2) 各向异性的\_\_\_\_\_形等能面情况：能带极值在  $k \neq 0$  处(Si 和 Ge 导带底情况)。

20. 孤立氢原子中电子在\_\_\_\_\_势场中运动，其状态是\_\_\_\_\_，称为\_\_\_\_\_；一维下自由电子在\_\_\_\_\_势场中运动，其薛定谔方程的解是\_\_\_\_\_，自由电子在空间各点出现的概率是\_\_\_\_\_，状态是\_\_\_\_\_。晶体中电子在\_\_\_\_\_势场中运动，称为\_\_\_\_\_近似；一维下晶体中电子薛定谔方程的解是\_\_\_\_\_，称为\_\_\_\_\_，晶体中电子在各点出现的概率是\_\_\_\_\_，其概率具有\_\_\_\_\_性质，称为电子的\_\_\_\_\_运动，其状态是\_\_\_\_\_。

## 二、简答题

1. 试定性说明 Ge、Si 的禁带宽度具有负温度系数的原因。

2. 结合简易能带，分析金属、绝缘体和半导体的导电性不同的原因。

3. 说明金刚石结构的特点。



## 三、计算题

1. 已知晶格常数为  $a$  的一维晶体的电子能带关系为

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{ma^2} \left[ \frac{7}{8} - \cos(ka) + \frac{1}{8} \cos(2ka) \right]$$

求：(1) 能带的宽度；

(2) 电子在波矢  $k$  状态时的速度。

2. 已知晶格常数为  $a$  的一维晶体的导带极小值附近的能量为

$$E_c(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{3m} + \left[ \frac{\hbar^2 (k - k_1)^2}{m} \right]$$

价带极大值附近的能量为

$$E_v(k) = \frac{\hbar^2 k_1^2}{6m} - \frac{3\hbar^2 k^2}{m}$$

其中， $k_1 = \pi/a$ ； $a = 3.14 \times 10^{-10}$  m； $m$  为电子质量。求：

(1) 禁带宽度；

(2) 导带底电子的有效质量；

(3) 价带顶空穴的有效质量；

(4) 导带底电子跃迁到价带顶时准动量的变化。