

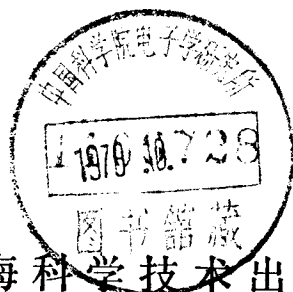
晶体管原理与实践

上海科技大学半导体器件教研组



晶体管原理与实践

上海科技大学半导体器件教研组 编



上海科学技术出版社

晶体管原理与实践

上海科技大学半导体器件教研组 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 556,000

1978年2月第1版 1978年2月第1次印刷

书号: 15119·1918 定价: 2.40 元

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。

前 言

在毛主席关于“教育要革命”的光辉思想指引下,我们根据近几年来进行教育革命实践的经验,并参考了其他兄弟院校的有关资料,经过多次修改,编写成《晶体管原理与实践》这本专业教材。

本教材基本内容是讨论双极型的低频大功率晶体管、高频小功率晶体管、高频大功率晶体管以及开关晶体管,同时对金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOS)也作了一定程度的分析。为了考虑到必要的基础知识及各课程的衔接,还列入了“半导体物理基础”、“ $P-N$ 结”这两章内容。高压整流二极管和金属-半导体表面势垒二极管在有关章节中也作了分析。

毛主席教导我们:“教材要彻底改革”。在编写过程中,由于我们对马列著作和毛主席著作学习得不够,对毛主席教育革命思想领会得不深,因此,在运用唯物辩证法作指导,理论联系实际以及便于自学等方面肯定存在不少缺点,恳切希望广大工农兵和革命师生批评指正。

上海无线电七厂、上海无线电十四厂、上海无线电十七厂、上海无线电十九厂、上海无线电二十九厂、上海无线电元件五厂以及上海半导体器件研究所等有关单位,对于本教材的编写曾给予大力支持和热情帮助;许多同志向我们提供了直接的生产经验和技术资料,并参加初稿的审查修改工作,在此,表示深切的感谢。

上海科技大学半导体器件教研组

一九七七年十月

符 号 表

A	面积	E_{F-}	电子的准费米能级
A_b	基区面积	E_{Fm}	金属费米能级
A_c	集电结面积	E_{Fn}	N 型半导体的费米能级
A_e	发射结面积	E_{Fp}	P 型半导体的费米能级
A_{ef}	发射结有效面积	E_g	禁带宽度
A_{cf}	集电结有效面积	E_i	禁带中央的能量
a	加速度、杂质浓度梯度	ΔE_i	杂质电离能
BV_{ebo}	eb 结最高反向电压 (集电极开路)	E_n	施主杂质能级
BV_{obo}	cb 结最高反向电压 (发射极开路)	E_p	受主杂质能级
BV_{ceo}	ce 极之间的最高工作电压 (基极开路)	E_s	表面能级
BV_{cer}	ce 极之间的最高工作电压 (be 之间接电阻 R)	E_t	复合中心能级
BV_{ces}	ce 极之间的最高工作电压 (be 短接)	$\mathcal{E}$	电场强度
BV_{cex}	ce 极之间的最高工作电压 (发射结反偏)	$\mathcal{E}_m$	最大电场强度
b	基极	$\mathcal{E}_{mB}$	击穿极限电场强度
C	电容	e	发射极
C_c	集电结电容	f	频率
C_e	发射结电容	f_m	最高振荡频率
C_D	扩散电容	f_T	特征频率
C_T	势垒电容	f_α	α 截止频率
C_n	复合中心的电子产生几率	f_β	β 截止频率
C_p	复合中心的空穴产生几率	h	普朗克常数 (6.63×10^{-27} 尔格·秒)
c	集电极	h_{FE}	共发射极直流电流放大系数
D	杂质扩散系数	I	电流
D_n	电子扩散系数	I_e	发射极直流电流
D_p	空穴扩散系数	I_b	基极直流电流
E	电子能量	I_c	集电极直流电流
E_0	自由电子的势能	I_{cbo}	集电结反向电流 (发射极开路)
E_+	价带 (满带) 顶电子能量	I_{ceo}	ce 极之间的穿透电流 (基极开路)
E_-	导带底电子能量	I_{ebo}	发射结反向电流 (集电极开路)
E_F	费米能级	I_{cm}	集电极最大电流
E_{F+}	空穴的准费米能级	I_D	扩散电流
		I_f	正向电流
		I_g	产生电流
		I_r	反向电流、复合电流

I_s	表面漏电流	N_t	复合中心浓度
I_n	电子电流	N_+	价带有效能级密度
I_{n0}	发射结电子电流	N_-	导带有效能级密度
I_{n0}	集电结电子电流	n	导带电子浓度
I_p	空穴电流	n_i	本征载流子浓度
I_{p0}	发射结空穴电流	n_{n0}	N 型半导体中的平衡电子浓度
i_e	发射极交流电流	n_{p0}	P 型半导体中的平衡电子浓度
i_b	基极交流电流	n_t	复合中心上的电子浓度
i_c	集电极交流电流	n_1	费米能级与复合中心能级重合时的 导带电子浓度
J	电流密度	Δn	非平衡电子浓度
J_{cm}	集电极最大电流密度	P	动量、 P 型半导体
J_n	电子电流密度	P_{cm}	集电极最大耗散功率
J_p	空穴电流密度	P_i	输入功率
j_n	电子流密度	P_o	输出功率
j_p	空穴流密度	p	满带空穴浓度
K	热导	p_{n0}	N 型半导体中的平衡空穴浓度
K_p	功率增益	p_{p0}	P 型半导体中的平衡空穴浓度
K_v	电压增益	p_1	费米能级与复合中心能级重合时的 满带空穴浓度
k	热导率, 玻尔兹曼常数	Δp	非平衡空穴浓度
L	沟道长度	Q	电荷总量
L_n	电子扩散长度	Q_n	$P-N$ 结势垒 N 型一边的空间电荷
L_p	空穴扩散长度	Q_p	$P-N$ 结势垒 P 型一边的空间电荷
L_o	发射结总周长	Q_{ss}	单位面积表面电荷(面密度)
l_o	发射条长度	Q_{sc}	单位面积表面势垒空间电荷(面密 度)
$\mathcal{L}_o$	发射极电感	q	电子电荷
M	雪崩倍增因子	R	电阻、复合率
m	电子质量、超相移因子	R_E	发射极镇流电阻
m_e^*	电子有效质量	R_j	信号源内阻
m_h^*	空穴有效质量	R_L	负载电阻
$N(E)$	能级密度	R_i	输入电阻
N	杂质浓度、 N 型半导体	R_o	输出电阻
N_B	衬底(基片)杂质浓度	R_{sb}	基区薄层电阻
N_b	基区杂质浓度	R_{sb1}	发射结下有源基区薄层电阻
N_c	集电区杂质浓度	R_{sb2}	淡基区扩散层薄层电阻
N_e	发射区杂质浓度	R_{sb3}	浓基区扩散层薄层电阻
N_n	施主杂质浓度	R_{ss}	发射区薄层电阻
N_p	受主杂质浓度		
N_s	表面杂质浓度		
N_{ss}	单位面积表面电荷数		

R_T	热阻	V_{ce}	ce 极之间的电压
r	电阻、半径	V_{bes}	be 极正向压降
r_e	发射结等效电阻	V_{ces}	ce 极饱和压降
r_o	集电结等效电阻	V_{DS}	漏源电压
r_b	基区电阻	V_{GS}	栅源电压
r_{b1}	发射结下有源基区电阻	V_{FB}	平带电压
r_{b2}	发射区边缘至浓基区边缘的基区电阻	V_{ms}	金属半导体接触电位差
r_{b3}	浓基区中的基区电阻	V_{je}	集电结偏压
r_{cs}	集电区体电阻	V_{je}	发射结偏压
r_{es}	发射区体电阻	V_p	夹断电压
s	表面复合速度	V_{pt}	穿通电压
s_e	发射区宽度	V_s	表面电势
s_{eff}	发射区有效宽度	V_{SB}	二次击穿触发电压
s_1	同 s_e	V_T	开启电压
s_2	发射区边缘至浓基区边缘的距离	v	速度
s_3	浓基区条宽度	v_e	发射结交流电压
s_4	基极电极接触区宽度	v_o	集电结交流电压
T	温度	v_m	极限漂移速度
T_o	环境温度	v_n	电子漂移速度
T_c	管壳温度	v_p	空穴漂移速度
T_s	散热板温度	w	基区厚度、沟道宽度
T_j	结温	w_o	集电区厚度
T_{jm}	最高结温	w_m	金属脱出功
t	时间	w_n	N 型半导体脱出功
t_d	延迟时间	w_p	P 型半导体脱出功
t_r	上升时间	w_t	外延层厚度
t_s	贮存时间	x_{je}	集电结结深
t_f	下降时间	x_{je}	发射结结深
t_{on}	开启时间	x_m	线性缓变结势垒半宽度
t_{off}	关断时间	x_n	突变结 N 型一边势垒宽度
t_{ox}	二氧化硅厚度	x_p	突变结 P 型一边势垒宽度
U	高频优值	x_1	扩散结势垒在扩散层中的宽度
V	电压	α	共基极电流放大系数
V_B	击穿电压	α_0	共基极低频电流放大系数
V_D	$P-N$ 结接触电位差	$\alpha(\phi)$	电离率
V_{co}	电源电压	β	共发射极电流放大系数
V_{be}	be 极之间的电压	β_0	共发射极低频电流放大系数
V_{bc}	bc 极之间的电压	γ	发射结注入效率

γ_-	复合中心对电子的俘获系数	σ_0	集电区电导率
γ_+	复合中心对空穴的俘获系数	τ	非平衡载流子寿命、自由时间
δ	势垒宽度	τ_n	电子寿命
δ_0	集电结势垒宽度	τ_p	空穴寿命
δ_e	发射结势垒宽度	τ_e	发射极时间常数
ε	相对介电常数	τ_b	基区渡越时间常数
ε_0	真空电容率	τ_d	集电结势垒渡越时间常数
η	输运系数	τ_c	集电极时间常数
μ	迁移率	ϕ_{mn}	金属 N 型半导体接触势垒高度
μ_l	杂质散射迁移率	ϕ_{mp}	金属 P 型半导体接触势垒高度
μ_L	晶格散射迁移率	ϕ_n	半导体表面导带底与费米能级的能量差
μ_n	电子迁移率	ϕ_p	半导体内部费米能级与满带顶的能量差
μ_p	空穴迁移率	ω	角频率 ($\omega = 2\pi f$)
ξ	基区电场因子	ω_e	发射结截止频率
ρ	电阻率	ω_b	基区截止频率
ρ_b	基区电阻率	ω_d	集电结势垒截止频率
ρ_0	集电区电阻率	ω_c	集电极截止频率
ρ_e	发射区电阻率	ω_α	α 截止频率
ρ_n	N 型半导体电阻率	ω_β	β 截止频率
ρ_p	P 型半导体电阻率	ω_T	特征频率
σ	电导率		
σ_e	发射区电导率		
σ_b	基区电导率		

目 录

前 言

符号表

第一章 半导体物理基础 1

第一节 什么是半导体 1

一、晶体的结构 1

二、半导体的特性 3

第二节 原子中电子的能级 5

一、量子化原理 5

二、分布几率与“测不准”关系 7

三、不相容原理 8

第三节 晶体中电子的能带 10

一、晶体中价电子的共有化运动 10

二、能带的形成 11

三、几种能带实例 13

第四节 本征半导体的导电机构——电子与空穴 15

一、导带电子能够导电 15

二、满带电子不能导电 16

三、本征半导体的导电机构 16

第五节 电子与空穴的统计分布规律 20

一、半导体的热平衡状态 20

二、能级密度 21

三、统计分布规律 23

四、导带电子浓度 n 和满带空穴浓度 p 24

五、几个结论 27

第六节 杂质半导体 29

一、 N 型半导体和 P 型半导体 30

二、杂质对半导体导电能力的影响 31

三、室温下杂质半导体的载流子浓度 33

四、杂质半导体中载流子浓度随温度的变化 35

五、杂质的补偿 36

第七节 非平衡载流子及其寿命 39

一、非平衡载流子的注入 39

二、非平衡载流子的寿命 40

三、复合中心 41

第八节 载流子的漂移运动 46

一、载流子的热运动和散射 47

二、迁移率 μ 48

三、半导体漂移电流公式 52

四、电阻率 ρ 53

第九节 载流子的扩散运动 56

一、扩散流和扩散方程 57

二、稳态扩散方程的解 57

三、扩散系数和扩散长度 59

第十节 半导体表面 62

一、表面能级和二氧化硅-硅系统中的表面态 62

二、表面能带弯曲和表面反型层 65

三、表面复合 66

四、表面处理 67

第二章 $P-N$ 结 71

第一节 $P-N$ 结的整流特性 71

一、 $P-N$ 结伏安特性的测量 71

二、 $P-N$ 结的能带和势垒 72

三、 $P-N$ 结整流特性的定性解释 75

四、 $P-N$ 结整流特性的定量分析 77

第二节 $P-N$ 结正向电流的讨论 81

一、正向电流与杂质浓度的关系 81

二、正向电流与扩散长度的关系 82

三、半导体禁带宽度对正向电流的影响 83

四、正向电流的温度效应 83

五、硅 $P-N$ 结正向小电流特性 83

六、硅 $P-N$ 结正向大电流特性 85

第三节 $P-N$ 结反向电流的讨论 86

一、硅 $P-N$ 结反向电流随外加电压的变化 86

二、反向电流随温度的变化 88

三、反向电流大是什么原因 89

第四节 $P-N$ 结势垒区的电荷、电场和宽度 90

一、突变结中的电荷、电场和势垒宽度 91

二、线性缓变结中的电荷、电场和势垒宽度 94

第五节 $P-N$ 结击穿 97

一、两种击穿机构——隧道与雪崩·····	97	二、晶体管最高工作电压·····	161
二、 $P-N$ 结的击穿电压与那些因素有 关·····	100	第七节 共发射极输出特性曲线讨论·····	166
三、几种不正常的击穿特性·····	105	第四章 晶体管极限参数和低频大功率 晶体管·····	173
第六节 $P-N$ 结电容·····	107	第一节 晶体管集电极最大电流 I_{cm} ·····	173
一、势垒电容 C_T ·····	108	一、晶体管电流放大系数在大电流时的 下降·····	173
二、扩散电容 C_D ·····	110	二、金属电极薄膜和引线导电能力的影 响·····	179
第七节 金属-半导体接触及欧姆电极·····	116	第二节 晶体管最高结温 T_{jm} 、最大耗散功 率 P_{cm} 和热阻 R_T ·····	181
一、金属与半导体接触的表面势垒·····	116	一、最高结温 T_{jm} 和环境温度 T_a ·····	181
二、金属与半导体接触的整流效应·····	117	二、最大耗散功率 P_{cm} ·····	182
三、欧姆接触·····	120	三、热阻 R_T ·····	182
第八节 半导体二极管设计举例——高压整 流二极管·····	122	第三节 大功率晶体管的二次击穿·····	186
一、参数分析·····	122	一、二次击穿现象·····	186
二、设计考虑·····	124	二、功率晶体管的安全工作区·····	187
三、设计计算·····	126	三、二次击穿的机构·····	188
四、制造工艺·····	127	四、改善二次击穿性能的方法·····	192
第三章 晶体管放大原理·····	131	第四节 低频大功率晶体管设计与制造·····	195
第一节 晶体管的基本结构·····	131	一、低频大功率晶体管设计·····	195
一、合金管·····	132	二、低频大功率晶体管制造工艺·····	201
二、合金扩散管·····	132	第五章 晶体管高频参数和高频小功率 晶体管设计·····	205
三、台面晶体管·····	133	第一节 电流放大系数随频率升高而下降·····	205
四、平面晶体管·····	134	一、发射结延迟时间常数 τ_e ·····	206
第二节 晶体管的放大机理·····	135	二、基区渡越时间常数 τ_b ·····	208
一、晶体管的放大线路·····	135	三、集电结势垒区渡越时间常数 τ_d ·····	212
二、晶体管中的载流子运动情况·····	136	四、集电结延迟时间常数 τ_c ·····	213
三、晶体管的放大作用·····	137	第二节 共基极截止频率 f_α 和共发射极截 止频率 f_β ·····	215
第三节 晶体管的特性曲线和等效电路·····	139	一、 f_α 的公式·····	215
一、晶体管的三种接法·····	139	二、 α 复平面表示法·····	216
二、晶体管的特性曲线·····	140	三、 f_β 的公式·····	217
三、晶体管等效电路·····	144	四、为什么 f_α 比 f_β 高得多?·····	218
第四节 共基极直流电流放大系数·····	146	第三节 特征频率 f_T ·····	220
一、共基极电流放大系数的定义·····	146	一、 f_T 公式与提高 f_T 的途径·····	220
二、均匀基区晶体管的共基极电流放大 系数 α ·····	148	二、 $ \beta $ 的 6 分贝/倍频下降率讨论·····	221
第五节 共发射极直流电流放大系数·····	153	三、 f_T 与晶体管工作点的关系·····	222
一、共发射极电流放大系数 β 的定义·····	153	第四节 噪声系数 N_F ·····	223
二、均匀基区晶体管的 β ·····	154		
三、缓变基区晶体管的共发射极电流放 大系数 β ·····	156		
第六节 晶体管的反向漏电流和击穿电压·····	160		
一、晶体管的反向漏电流 I_{ebo} 、 I_{cbo} 、 I_{ceo}			

一、什么是噪声	223	四、提高二极管开关速度的途径	288
二、噪声系数 N_F 的定义	224	第二节 晶体三极管的开关特性	289
三、晶体管产生噪声的机构	225	一、晶体管的开关作用	289
四、晶体管噪声频谱和高频噪声公式	227	二、静态特性分析——饱和与截止	290
第五节 高频小功率晶体管设计	230	三、饱和压降与正向压降	292
一、高频小功率晶体管结构的基本特点	230	四、动态特性分析	294
二、高频小功率晶体管设计举例	233	五、开关时间	297
第六节 高频小功率晶体管制造工艺	241	六、提高晶体管开关速度的途径	301
一、高频小功率晶体管制造工艺	241	第三节 开关晶体管设计实例	302
二、几种新工艺	247	一、开关晶体管设计的特色	302
第六章 晶体管的高频优值和高频大功率晶体管设计	251	二、中功率开关管主要参数指标及设计方案	303
第一节 晶体管的高频功率增益与高频优值	251	三、主要参数验算	305
一、晶体管功率增益随频率升高而下降的原因	252	第八章 MOS 场效应晶体管	308
二、高频功率增益 K_p	252	第一节 场效应晶体管概况	308
三、高频优值与最高振荡频率	254	第二节 MOS 场效应管原理	310
四、发射极引线电感对高频优值的影响	255	一、MOS 场效应管的特性曲线	310
第二节 晶体管高频参数与极限参数之间的矛盾	256	二、输出特性曲线的三个区域	312
第三节 高频大功率晶体管的四种图形结构	262	三、漏源电流公式	314
第四节 高频大功率晶体管设计实例	267	第三节 表面电荷和测定表面电荷的 $C-V$ 方法	316
一、设计程序	267	一、表面电荷与表面势	317
二、设计实例	268	二、外加电压与表面势	319
三、纵向结构参数估算	271	三、测定表面电荷密度的 MOS 电容 $C-V$ 方法	320
四、横向结构参数估算	273	第四节 MOS 场效应管参数	326
五、参数验算	275	一、MOS 场效应管的基本参数	327
第五节 管壳与寄生元件	278	二、MOS 场效应管的极限参数	329
第七章 晶体管的开关参数与开关晶体管	283	三、MOS 场效应管的频率参数	330
第一节 二极管的开关特性	283	第五节 MOS 场效应管设计制造	332
一、二极管的开关作用	283	一、设计考虑	333
二、静态特性分析	284	二、结构数据和参数验算	334
三、动态特性分析	285	三、MOS 场效应管制造工艺	336
		附录 A 常用常数及单位换算表	338
		附录 B 硅的主要物理性质	338
		附录 C 平面管扩散杂质分布	339
		附录 D 扩散层的表面浓度 N_s 、薄层电阻 R_s 和结深 x_j 之间的关系	342
		附录 E 基区电阻	357

第一章 半导体物理基础

第一节 什么是半导体

自然界中存在着各种各样的物质,它们可以是气态的、液态的或固态的等等。在这各种材料中,我们最感兴趣的是固体材料,因为晶体管、集成电路都是以固体器件而闻名的。对固体材料来说,如果按照它们的结构形式又可以分成晶体和非晶体两类;而按照它们的导电能力,则可以把它们分成导体、绝缘体和半导体三种。目前用来制造晶体管半导体器件的锗、硅、砷化镓等材料,它们在结构形式上都是晶体,而在导电机理上又都是半导体。因此,为了讲清楚什么是半导体,下面就分两个问题来讨论:一、晶体的结构;二、半导体的特点。

一、晶体的结构

在日常生活中,我们经常接触两类固体材料:一类如玻璃、橡胶、沥青等,它们是非晶体,其特点是没有一定的形状,只要稍微加热或作一定的处理,就容易把它们加工成任意的形状。另一类如食盐、明矾、半导体硅、锗等,它们是晶体,每种晶体都有一定的结晶形状。晶体与非晶体外观形状上的不同,正是它们内部原子结合规律不同的一个反映。在晶体中原子是按一定规律整齐地排列起来的,而非晶体中的原子排列则没有一定的规律。根据晶体中原子排列的不同型式,晶体结晶的形状也有对称性不同的几种形式,并在不同方向上表现出不同的特性,称为各向异性。

一般自然界中存在的晶体时常包含有许多小晶粒,每个小晶粒中的原子都按同一序列排列,但晶粒与晶粒之间的排列取向则是没有规则的,这样的晶体称为多晶。常见的铜、铁等许多金属就是这样的多晶。也有一些晶体,它本身只有一个晶粒,也就是说它体内的所有原子都是按同一序列排列起来的,这样的晶体称为单晶。自然界中虽然也有天然的单晶,但在多数情况下,需要在人工仔细控制的环境下,才能生长出大体积的单晶。图 1-1 是一个在工厂中制造出来的硅单晶。大多数半导体材料都是晶体,而用来制造晶体管的硅、锗材料还必须是单晶。“晶体管”的名称也就是由此而来的。

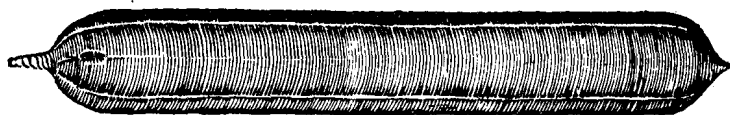


图 1-1 硅 单 晶

晶体中的原子按一定的规律,周期地排列在空间,形成一个个格点,称为晶格。不同的晶体常有不同的晶格结构。图 1-2 是三种常见的立方晶格结构的原子排列情况,立方晶体就是由这些基本结构重复排列而成。

半导体硅、锗具有金刚石晶格结构。金刚石晶格的结构是比较复杂的,实际上它是由两

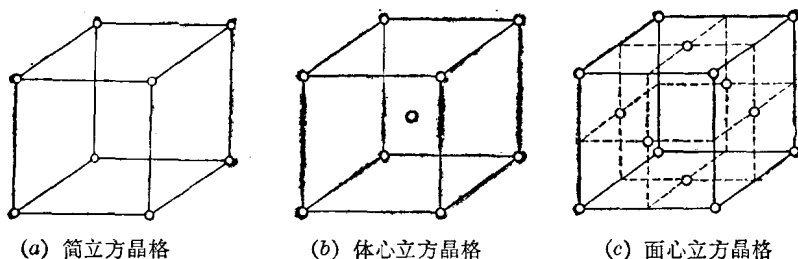


图 1-2 三种常见的立方晶格结构

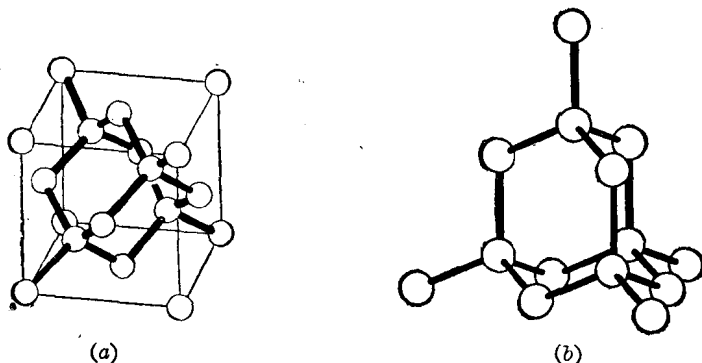


图 1-3 金刚石结构的原子排列

个面心立方晶格,沿空间对角线错开 $1/4$ 长度,互相套合而成。从图 1-3(a) 可以看到,金刚石结构的每个原子有四个最邻近的原子,图中把原子连接起来的粗线就代表这些原子之间的共价键。如果沿图 1-3(a) 金刚石结构空间对角线方向,把金刚石晶格竖立起来的话,金刚石结构也可以画成图 1-3(b) 所示的样子。

从图 1-2 和图 1-3 可以看到,沿晶格的不同方向,原子排列的周期和疏密情况是不相同的。因此沿晶体的不同方向,晶体的机械、物理特性也是不相同的。这种情况称为晶体的各向异性,常用 $\langle 100 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ 等符号来表征晶体的一定方向,这里括号中的三个数为晶向矢量在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的投影长度。例如图 1-4(a) 中与 x 轴平行的箭头方向称为晶体的 $\langle 100 \rangle$ 方向,与 $\langle 100 \rangle$ 晶向垂直的面称为 (100) 晶面;图 1-4(b) 中的箭头为 $\langle 110 \rangle$ 方向,与 $\langle 110 \rangle$ 晶向垂直的面称为 (110) 晶面;图 1-4(c) 中的箭头为 $\langle 111 \rangle$ 方向,与 $\langle 111 \rangle$ 晶向垂直的面称为 (111) 晶面。对金刚石结构来说, (100) 晶面原子密度最小, (111) 晶面原子密度最大,因此沿 $\langle 100 \rangle$ 与 $\langle 111 \rangle$ 方向,晶体有不同的特性。

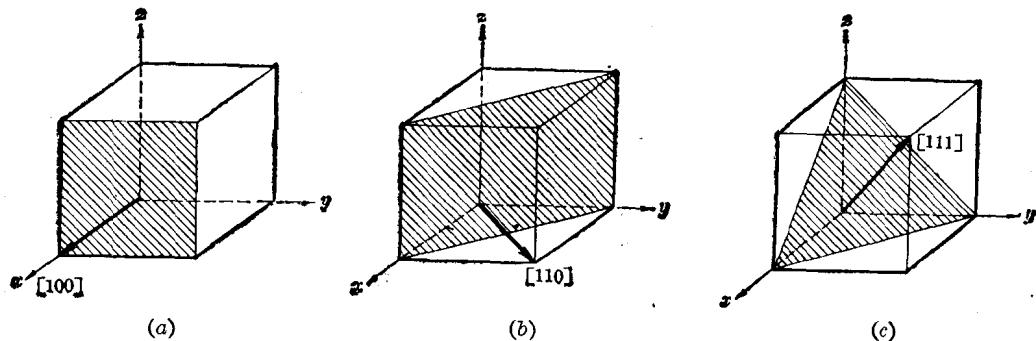


图 1-4 晶体的晶向与晶面举例

二、半导体的特性

半导体在结构形式上是晶体,那么它在电性能上有那些特性呢?

我们知道,导体有良好的导电能力,绝缘体基本上不导电,而半导体就是这样的一类物质,它的导电能力介于导体和绝缘体之间,既有一定的导电性,但电阻又比较大,半导体的名称就是由此而来的。

物质的导电能力常用电阻率 ρ 来表示。由实践经验得出:物体的电阻 R 与它的长度 l 成正比,与它的截面积 A 成反比(图1-5),即:

$$R = \rho \frac{l}{A}. \quad (1-1)$$

(1-1)式中的比例系数 ρ 称为电阻率。如果 R 以欧姆为单位, l 与 A 以厘米和厘米²为单位,则电阻率 ρ 的单位就是欧姆·厘米($\Omega\cdot\text{cm}$)。 ρ 的数值随不同物质而异, ρ 小表示

该物质的导电能力强,反之, ρ 大就表示导电能力差。一般导体的电阻率小于 10^{-3} 欧姆·厘米,绝缘体的电阻率大于 10^9 欧姆·厘米,半导体的电阻率在 10^{-2} 到 10^9 欧姆·厘米之间。

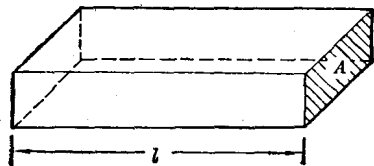


图 1-5

虽然半导体的电阻率范围是它的一个重要特性,然而电阻率并不是区分半导体与非半导体的唯一标准。事实上半导体还有一些其他的重要特性。

首先,半导体的导电能力随温度升高而迅速增加。与导体金属相比,主要有两个差别。第一,半导体电阻率的温度系数是负的,而金属则是正的,也就是说,当温度升高时,半导体的电阻率会迅速减小,而金属的电阻率却会增大。第二,半导体电阻率随温度的变化很快,而金属电阻率的变化则要慢得多。以纯净的硅为例,当温度从 30°C 降低至 20°C 时,其电阻率增加一倍;而金属铜,即使温度上升 100°C ,电阻率的增加也不到一半。

其次,半导体的导电能力随所含的微量杂质而发生十分显著的变化。一般的材料(例如化学试剂)纯度达到99%或99.9%就认为是很高了,此时尚剩余的1%或0.1%杂质,通常不会影响物质原来的特性。而对半导体来说,情况就不同了。纯净的硅室温时的电阻率为214,000欧姆·厘米。如果在纯硅中以每一百万个硅原子中掺入一个杂质原子的比例掺入杂质(例如磷原子),此时硅的纯度虽然仍高达99.9999%,但其电阻率却从214,000欧姆·厘米一下子降到0.2欧姆·厘米左右,几乎降低一百万倍!硅电阻率随所含微量杂质的惊人变化虽然可能使人难于想象,但却是客观事实。

第三,半导体的导电能力随光照而发生显著变化。例如一个沉积在绝缘基板上的硫化镉薄膜,其暗电阻为几十兆欧。当受光照后,电阻可能下降到只有几十千欧,阻值改变了几百倍。实际上这样的硫化镉薄膜就是一个光敏电阻。

此外,半导体的导电能力还会随电场、磁场等的作用而改变。

综上所述,我们看到半导体就是这样一种有时能导电,有时又不能很好地导电,容易受热、光、电、磁和杂质等作用影响而改变特性的固体材料。常见的半导体材料有:元素半导体硅(Si)、锗(Ge)等,III-V族化合物半导体砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等,金属硫化物半导体硫化铅(PbS)、硫化镉(CdS)等,以及金属氧化物半导体氧化亚铜(Cu_2O)等。这些都是已经在工业生产中获得广泛应用的半导体。此外,还有许多种半导体,其中有的特性不够理

想,有的加工制造有困难,有的在理论模型上还需作进一步的研究。

当人们还没有学会如何控制半导体的时候,半导体多变的特性曾阻碍了半导体的应用。因此在五十年代之前,随着电气化的发展,虽然使用了许多种导体和绝缘体,但半导体的应用却很少。然而,当广大群众通过长时间的大量实践,经过从实践到理论,又从理论再回到实践的多次反复,逐渐掌握了半导体的导电机理之后,人们开始认识到,正是半导体这种多变的特点才使半导体在电子工业中得到了日益广泛的应用。实际上,用半导体制成的各种热敏器件、光敏器件、场效应器件、霍耳器件以及各种二极管、三极管、场效应管等,都是利用了半导体电性能容易受热、光、电、磁等外界作用而改变的特点。

那么为什么半导体的电性能会有这样一些特点呢?半导体的导电机构是怎样的呢?

关于物体的导电机构,人们早期的认识是:金属导电是由于体内存在有大量能够自由运动的电子,绝缘体不导电是由于体内的电子都受原子核束缚,不能自由运动。这一说法中关于金属的部分,现在看来大体上仍然是对的,但关于绝缘体的提法就有问题了。由于许多绝缘体原子之间是依靠共价键结合起来的,共价键的特点就是共用电子。既然甲原子与乙原子共用电子,乙原子又与丙原子共用电子,这样电子可以由甲原子周围转到乙原子周围,又从乙原子周围转到丙原子周围、丁原子周围……,因此那种认为电子受原子核束缚不能移动的说法就讲不通了。为了解决这个矛盾和搞清半导体的导电机构,人们进行了大量的工作,逐渐总结出了一套理论,称为能带理论。能带理论较完满地解释了许多实验现象,并且根据能带理论所作的许多推断在后来的实践中又获得了证实,因此能带理论是目前人们认识物体导电机构的有效总结。

能带理论认为,物体中的电子按照它们的能量可以分别处在一些特定的能量区域中。每一个这样的能量区域称为一个能带。如果一个物体中的价电子把它的价电子能带填满了,成为满带,则由于装满电子的能带是不能导电的,这个物体就成为绝缘体。如果一个物体的价电子能带没有被填满,这个能带就称为导带,导带中的电子可以导电,这个物体就成为导体。如果一种材料的价电子虽然把价电子能带填满了,但在热、光、电、磁等作用下,这些电子容易激发到能量较高的另一个能带中去,这种材料的导电能力就容易受外界作用而改变,这样的物体就是半导体。

上面这一段叙述中包含了大量的新概念,许多问题是需要进一步讲清楚的。例如,什么是满带?什么是导带?满带中电子为什么不能导电?导带中的电子为什么可以导电?……为了讲清楚这些问题,就要从电子在原子和晶体中的基本运动规律讲起,这就是我们在第二、三、四节中要讨论的问题。

小 结

1. 半导体常常是一些晶体。晶体中的原子按一定的周期有规则地排列在空间,构成一定形式的晶格。制造晶体管所用的硅、锗单晶具有金刚石结构。沿晶体的不同方向,其机械、物理特性常常不同,称为晶体的各向异性。

2. 半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间,特点是其电阻率容易随热、光、电、磁和杂质等外界作用而改变。许多半导体器件就是利用它的这些特性而制成的。

3. 半导体导电机构的特点,可以在能带理论的基础上得到解释。

第二节 原子中电子的能级

物质是由原子组成的,要深入研究半导体的各种特性,就必须由物质的内部结构出发。这里,我们就来讨论原子的结构和原子中电子的运动状态。

根据科学实验和生产实践的大量事实可知:原子是由一个带正电的原子核和一定数目的绕核运动的电子组成的。电子质量很小(其静止质量约为 9.11×10^{-28} 克),带有负电荷“ $-q$ ”($q=1.6 \times 10^{-19}$ 库仑)。原子核的质量要比电子大几千到几十万倍,但它的体积很小,半径约为 10^{-13} 厘米;原子核带有正电荷,其正电荷的数量与外围电子电荷的总量在数值上相等,而符号相反,因此就整个原子来看,它是电中性的。不同的元素有不同的原子,主要表现在原子核的质量和电子的数目不同。例如:硅的原子序数是 14,其原子核有 14 个正电荷,而核外有 14 个电子;锗的原子序数是 32,其原子核带有 32 个正电荷,而核外也有 32 个电子。

恩格斯教导我们:“运动是物质的存在方式。无论何时何地,都没有也不可能有没有运动的物质。”因此,原子中的原子核和电子决不可能是静止地堆放在一起的。大量实验事实证明,原子是由一个带正电的原子核以及一些环绕着原子核不停地运动着的带负电的电子所构成的系统,其组成方式与太阳系有一些相似。原子核就好比太阳,绕核运动的电子则可比作绕太阳运动的行星。太阳依靠万有引力把行星束缚在轨道上运动,原子核则依靠正负电荷间的吸引力把电子束缚在它的周围运动,电子绕核运动的轨道可以是圆形的,也可以是椭圆形的。如果我们以某种方式增加电子的能量,电子就会过渡到能量更大的、距核更远的轨道上。如果给予电子的能量足够大,电子的运动轨道就可以距核很远,直至挣脱原子的束缚,成为自由电子。原子中电子的这些运动情况,与太阳系中的行星或绕地球运动的人造卫星很相似。此外,电子也象地球一样有公转,也有自转。电子的自转称为自旋,每个电子的自旋角动量的大小都相等,只是在空间的取向可以有顺时针与逆时针两种。

但是对原子和电子所作的许多实验表明,决不能把原子和电子的运动简单地看作与太阳系中的天体完全相同。太阳和行星都是庞然大物,而原子核与电子则是微观粒子,它们在体积和质量上有巨大的差别,从而导致它们的运动规律也不完全相同。在人们研究微观粒子运动规律的过程中,发现许多现象是不能用普通处理宏观物体运动的力学概念来说明的。根据大量的科学实验和在此基础上发展起来的量子论,对于微观粒子的运动,人们总结出以下三个重要的特点:

一、量子化原理

人们发现,原子中的电子绕核运动时,它的能量只能取一系列不连续的特定值。

以氢原子为例,氢原子是一个最简单的原子,它的原子核带一个正电荷,核外有一个绕核运动的电子。如果我们把电子刚好脱离原子核的束缚而成为自由电子时的能量取为能量的零点,则由实践得到的氢原子中电子可以取的能量特定值是:

$$E_n = -\frac{2\pi^2mq^4}{n^2h^2}. \quad (1-2)$$

其中 m 是电子的质量 ($m=9.11 \times 10^{-28}$ 克), h 称为普朗克常数 ($h=6.63 \times 10^{-27}$ 尔格·秒),