

“电子信息材料与器件国家级实验教学示范中心”系列规划教材
教育部“卓越工程师教育培养计划”系列规划教材

微电子专业实验教材系列丛书

半导体物理与器件

实验教程

刘 诺 任 敏 钟志亲 蒋书文 罗小蓉 编著



科学出版社

“电子信息材料与器件国家级实验教学示范中心”系列规划教材
教育部“卓越工程师教育培养计划”系列教材
微电子专业实验教材系列丛书

半导体物理与器件实验教程

刘 诺 任 敏 钟志亲 蒋书文 罗小蓉 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

全书分上、下两篇,上篇为半导体物理实验部分,包括晶体结构构建、晶体电子结构仿真与分析、单波长偏偏法测试分析薄膜的厚度与折射率、探针测试半导体电阻率、霍尔效应实验、高频光电导法测少子寿命、肖特基二极管的 $I-V$ 特性测试分析、肖特基二极管的势垒高度及半导体杂质浓度的测试分析和 MIS 的高频 $C-V$ 测试;下篇为微电子器件实验部分,包括二极管直流参数测试、双极型晶体管直流参数测试、MOS 场效应晶体管直流参数测试、双极型晶体管开关时间测试和双极型晶体管特征频率测试。

本书可作为电子科学与技术专业特别是微电子科学与工程、微电子学、集成电路与集成系统等专业的“半导体物理实验”和“微电子器件实验”的实验教材或参考书,也可供相关研究人员参考。



中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 092071 号

责任编辑: 杨 岭 黄明冀 / 责任校对: 杨悦蕾 黄明冀
责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015年6月第一次印刷 印张: 12

字数: 242千字

定价: 32.00元

出版说明

——微电子专业实验教材系列丛书简介

微电子技术是新一代信息技术的基础与支撑，是信息存储、处理与执行控制的核心技术，它伴随着国民经济和社会信息化进程，渗透到主流行业的方方面面，成为带动整个国民经济增长的战略要素。因此，国家对以集成电路为代表的微电子产业发展给予了前所未有的重视。2014年，国务院印发了《国家集成电路产业发展推进纲要》，推出了一系列针对集成电路产业发展的政策和规划，对集成电路技术与产业发展以及微电子人才培养提出了新的布局和要求。

微电子专业作为一门专业性和应用性很强的学科，除了需要理论课程的支撑外，完备的实验教学也是必不可少的，特别是在“卓越工程师教育培养计划”中，动手能力更是教学中的重中之重。但是，我们通过调研，了解到国内尚没有微电子专业的系列实验教材，为此，出版一套微电子专业的系列实验教材将会是一件非常有意义的事情。

本系列实验教材以微电子专业的理论课程设置为依据，并综合考虑微电子产业的流程，划分了4本分册，包括《半导体物理与器件实验教程》《数字集成电路实验教程》《模拟集成电路设计实验教程》和《微电子制造技术实验教程》。微电子以及相关专业的学生可以根据学习阶段来选择配套的实验教程。

本系列实验教材的编委由电子科技大学微电子与固体电子学院的骨干教师组成。该学院成立于电子科技大学建校之时，经过半个多世纪的发展，在微电子专业领域积累了雄厚的实力，不仅在科研方面取得了诸多成果，在教书育人方面，也建立起了一支优秀的教师队伍。同时，在建设“电子信息材料与器件国家级实验教学示范中心”过程中，始终坚持以学科方向为主线，注重学科交叉和互补。依托国家重点学科，跨专业整合资源，打造电子信息领域的“材料制备-器件与电路设计-工艺制作-系统应用”综合性实验平台，并取得了丰富的实验教学成果。这一切都为本系列实验教材的编写打下了良好的基础。我们相信，本系列实验教程的出版会填补国内微电子专业系列实验教材的空白，为我国微电子技术的教育事业做出贡献。

《微电子专业实验教材系列丛书》编委会

主 编 张怀武
副主编 于 奇 李 平 王忆文
编 委 (以姓氏笔画为序)
 王 刚 王 靖 王向展 王姝娅
 任 敏 刘 诺 杜江峰 杜 涛
 李 辉 张国俊 罗小蓉 钟志亲
 谢小东 蒋书文 戴丽萍

前 言

微电子技术是信息社会的基石，它的发展有力地推动了通信技术、计算机技术和网络技术的迅速发展，成为衡量一个国家科技进步的重要标志。掌握扎实的专业基础知识、具备出色的工程实践能力，是成为微电子领域高级技术人才的必要条件。微电子专业的本科生通过必修课程“半导体物理”和“微电子器件”的学习，已具备较好的理论基础，但是还需要通过相应的实验训练来培养工程实践能力。实践性教学环节在专业人才的培养中同样起着重要作用，与理论教学环节具有同等重要的地位。

作为“半导体物理”和“微电子器件”等先修理论课程的补充，“半导体物理实验”和“微电子器件实验”课程的教学内容与理论课程的教学内容相呼应。本书分上、下两篇，上篇为“半导体物理实验”，下篇为“微电子器件实验”。其中每篇又由“基础知识”和“实验”两部分构成，每个实验涉及的知识点在“基础知识”中进行了必要的描述。上、下篇既独立成篇又互为联系，隶属于微电子相关专业的知识体系。

“半导体物理实验”中的实验设计，根据“半导体物理”课程的知识体系，按照由浅入深的原则，主要围绕半导体的晶体结构、半导体的电子结构、半导体中的载流子、半导体中的电输运、肖特基二极管、半导体 MIS 结构开展。所包括的具体实验内容如下：

- (1) 晶体结构构建；
- (2) 晶体电子结构仿真与分析；
- (3) 单波长椭偏法测试分析薄膜的厚度与折射率；
- (4) 四探针测试半导体电阻率；
- (5) 霍尔效应实验；
- (6) 高频光电导法测少子寿命；
- (7) 肖特基二极管的 $I-V$ 特性测试分析；
- (8) 肖特基二极管的势垒高度及半导体杂质浓度的测试分析；
- (9) pn 结势垒特性及杂质的测试分析
- (10) MIS 的高频 $C-V$ 测试。

“微电子器件实验”主要围绕三类基础器件开展，包括二极管、双极型晶体管和金属-氧化物-半导体场效应晶体管。微电子器件在电路中表现出的电学特性，按其工作状态的不同，可分为静态特性和动态特性。静态特性指器件在稳定

的外加电流或电压下表现出的电学特性，而动态特性指在器件开、关转换等动态过程中表现出的电学特性。正确地认识和使用半导体器件，既需要掌握其静态电学特性，又需要掌握其动态电学特性。因此，本书在进行实验设计时，既考虑了器件的静态电学参数测试，又涉及器件的动态特性测试。由于学时有限，动态电学特性的研究将以双极型晶体管为例开展教学，学生可利用课上所学知识和方法，将其拓展到二极管、场效应晶体管等器件动态特性的研究中。之所以选取双极型晶体管，是因为它是最基础、最重要的微电子器件之一，应用广泛，其工作机理涉及双极载流子导电，物理机制丰富。“微电子器件实验”所包括的具体实验内容如下：

- (1) 二极管直流参数测试；
- (2) 双极型晶体管直流参数测试；
- (3) MOS 场效应晶体管直流参数测试；
- (4) 双极型晶体管开关时间测试；
- (5) 双极型晶体管特征频率测试。

本书中每个实验的目的是让学生学习和掌握相应课程的实验。每个实验的主要格局设计如下：

- (1) 实验目的。规定实验的特定目的，要求学生在实验中重点关注这些目标。
- (2) 实验原理。包括基本概念、原理和在实验过程中需要完成的简单讨论。
- (3) 实验仪器。
- (4) 实验步骤。明确说明实验的基本步骤，以帮助学生完成实验并解释结果。
- (5) 思考题。思考题列于每个实验后面，用于考查学生对于实验中的概念的理解和实验技术的掌握。

“半导体物理实验”和“微电子器件实验”作为两门独立的实验选修课，其目的在于让学生亲自完成相关实验，体验实验的基本原理，达到以下教学目的。

(1) 培养学生理论联系实际的能力。学生通过先修的“半导体物理”“微电子器件”等课程，对于常见半导体物理和微电子器件的基本工作原理已经有了一定的认识，但还停留在理论分析上，对器件在实际应用中体现出的电学特性没有直观的认识。本实验课程可以激发学生的学习兴趣，从而进一步巩固和加深先修课程中所学的器件基本理论、重要概念和公式的理解及应用，提高理论联系实际的能力和动手、动脑、观察及思考问题的能力。

(2) 培养学生的自学能力。实验内容涉及半导体的基本性质和电学性质的测试、器件电学特性的测试、晶体管图示仪等实验仪器的使用、测试电路的搭建和测试分析等，涵盖内容丰富，为培养学生的自学能力创造了条件。例如，让学生自学实验仪器使用说明书，以锻炼学生的阅读能力和获取所需新知识的自学能力；学生通过做实验和书写实验报告，对实验现象进行分析，总结和归纳实验结果并进行误差分析，提出对实验的改进意见，可以培养和训练其整理、归纳、综

合、评价知识的自学能力。

(3)培养学生的逻辑思维能力、科学探索能力和团队合作能力。实验通过让学生独立或以团队为单位完成实验研究方案的设计,实验研究方法的比较,实验研究条件的选择,实验研究结果的分析、总结、归纳和解释,锻炼学生的逻辑思维能力和解决问题的探索求新能力;通过实验研究报告的书写等培养学生基本的科研素养,从而在认知技能、实验分析技能、交流合作技能等方面具有更高层次的思考技能,为培养具有创新精神、适应国家需要的高质量专业人才打下坚实基础。

本书是对相应教材的补充,书中的实验用于说明和演示课程的基本原理。实验室训练能增强学生学习“半导体物理”和“微电子器件”的趣味性。

使用本书时,应根据相应专业实验教学大纲的要求,以实验为主、教学为辅,做到理论联系实际,从而加强基础理论、基本知识和基本实验技能的训练,提高教学质量和实践能力。本书可作为电子科学与技术专业,特别是微电子科学与工程、微电子技术、微电子学、集成电路设计与集成系统等专业的“半导体物理实验”和“微电子器件实验”的教材或参考书,教师可根据具体教学内容和教学深度的需要挑选与课程相关的内容供相应专业的本科生和研究生使用,也可供有关研究人员参考。

本书的前言由刘诺、任敏共同执笔。上篇的第1章由刘诺执笔,第2章的实验1、2、3、7、8和9由刘诺执笔,实验4和10由钟志亲执笔,实验6由蒋书文执笔,实验5由罗小蓉执笔。下篇的第4章由任敏执笔,陈勇提供了大量的文献资料。特别感谢黄明冀编辑为本书出版所做的大量工作。

由于作者的水平有限,本书难免存在不妥之处,望读者批评指正。

编者

2015年5月

目 录

上篇 半导体物理实验

第 1 章 半导体物理基础知识	2
1.1 半导体的晶体结构与价键模型	2
1.1.1 晶格	2
1.1.2 原子价键	3
1.1.3 晶体结构	5
1.2 半导体的电子结构	7
1.2.1 晶体能带模型与能带三要素	7
1.2.2 半导体的电子结构	8
1.3 半导体中的载流子	10
1.3.1 平衡载流子与非平衡载流子	10
1.3.2 本征半导体与本征激发	11
1.3.3 非本征半导体与浅能级	13
1.3.4 载流子的复合	17
1.4 三维半导体中载流子的电输运	18
1.4.1 漂移运动、漂移电流与迁移率	18
1.4.2 散射与迁移率	19
1.4.3 电导率	23
1.4.4 扩散运动与扩散电流	23
1.4.5 电流密度方程与爱因斯坦关系	24
1.5 金属-半导体的接触	24
1.5.1 功函数与电子亲和能	24
1.5.2 阻挡层和反阻挡层	25
1.5.3 金属-半导体肖特基接触	27
1.5.4 肖特基势垒的电流输运	28
1.5.5 势垒电容	33
1.5.6 金属-半导体欧姆接触	33
1.6 半导体表面效应和金属-绝缘体-半导体(MIS)结构	34

1.6.1	半导体表面强反型与开启电压	35
1.6.2	理想 MIS 结构的 $C-V$ 特性	36
1.6.3	理想 MIS 结构 $C-V$ 特性的影响因素	41
1.6.4	非理想 MIS 结构的 $C-V$ 特性	42
第 2 章	半导体物理实验	46
2.1	晶体结构构建	46
2.1.1	实验目的	46
2.1.2	实验原理	46
2.1.3	实验仪器(软件)	48
2.1.4	实验步骤	49
2.1.5	思考题	58
2.1.6	参考资料	58
2.2	晶体电子结构仿真与分析	58
2.2.1	实验目的	58
2.2.2	实验原理	59
2.2.3	实验仪器(软件)	60
2.2.4	实验步骤	61
2.2.5	思考题	64
2.2.6	参考资料	64
2.3	单波长椭偏法测试分析薄膜的厚度与折射率	64
2.3.1	实验目的	64
2.3.2	实验原理	65
2.3.3	实验仪器(软件)	68
2.3.4	实验步骤	68
2.3.5	思考题	69
2.3.6	参考资料	69
2.4	四探针测试半导体电阻率	70
2.4.1	实验目的	70
2.4.2	实验原理	70
2.4.3	实验仪器	74
2.4.4	实验步骤	75
2.4.5	思考题	75
2.4.6	参考资料	75
2.5	霍尔效应实验	76
2.5.1	实验目的	76
2.5.2	实验原理	76

2.5.3	实验仪器	79
2.5.4	实验步骤及注意事项	79
2.6	高频光电导法测少子寿命	81
2.6.1	实验目的	81
2.6.2	实验原理	81
2.6.3	仪器使用	83
2.6.4	实验步骤	86
2.6.5	思考题	87
2.6.6	参考资料	87
2.7	肖特基二极管的 $I-V$ 特性测试分析	87
2.7.1	实验目的	87
2.7.2	实验原理	88
2.7.3	实验仪器	88
2.7.4	实验步骤	89
2.7.5	数据处理	92
2.7.6	思考题	93
2.7.7	参考资料	93
2.8	肖特基二极管的势垒高度及半导体杂质浓度的测试分析	93
2.8.1	实验目的	93
2.8.2	实验原理	94
2.8.3	实验仪器	95
2.8.4	实验步骤	95
2.8.5	数据处理	101
2.8.6	思考题	101
2.8.7	参考资料	101
2.9	pn 结势垒特性及杂质的测试分析	102
2.9.1	实验目的	102
2.9.2	实验原理	102
2.9.3	实验仪器	104
2.9.4	实验步骤	104
2.9.5	数据处理	105
2.10	MIS 的高频 $C-V$ 测试	105
2.10.1	实验目的	105
2.10.2	实验原理	105
2.10.3	实验仪器	109
2.10.4	实验步骤	109

2.10.5 思考题	114
2.10.6 参考资料	114

下篇 微电子器件实验

第3章 微电子器件基础知识	116
3.1 二极管	116
3.1.1 二极管的基本结构	116
3.1.2 二极管的伏安特性	116
3.1.3 二极管的击穿电压	118
3.2 双极结型晶体管	119
3.2.1 双极结型晶体管的基本结构	119
3.2.2 BJT的工作状态	120
3.2.3 BJT的放大作用	120
3.2.4 BJT的输出特性曲线	123
3.2.5 BJT的反向截止电流和击穿电压	124
3.3 金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)	125
3.3.1 MOSFET的基本结构	125
3.3.2 转移特性曲线和输出特性曲线	126
3.3.3 MOSFET的阈电压	128
3.3.4 MOSFET的直流电流电压方程	129
第4章 微电子器件实验	130
4.1 二极管直流参数测试	130
4.1.1 实验目的	130
4.1.2 实验原理	130
4.1.3 实验器材	131
4.1.4 实验方法和步骤	136
4.1.5 实验数据处理	140
4.1.6 思考题	140
4.2 双极型晶体管直流参数测试	141
4.2.1 实验目的	141
4.2.2 实验原理	141
4.2.3 实验器材	142
4.2.4 实验方法和步骤	142
4.2.5 实验数据处理	148
4.2.6 思考题	152

4.3	MOS 场效应晶体管直流参数测试	152
4.3.1	实验目的	152
4.3.2	实验原理	152
4.3.3	实验器材	154
4.3.4	实验方法和步骤	154
4.3.5	实验数据处理	162
4.3.6	思考题	163
4.4	双极型晶体管开关时间测试	163
4.4.1	实验目的	163
4.4.2	实验原理	163
4.4.3	实验器材	165
4.4.4	实验方法和步骤	165
4.4.5	实验数据处理	168
4.4.6	思考题	169
4.5	双极型晶体管特征频率测试	169
4.5.1	实验目的	169
4.5.2	实验原理	169
4.5.3	实验器材	171
4.5.4	实验方法和步骤	171
4.5.5	实验数据处理	175
4.5.6	思考题	176
4.5.7	参考资料	176

上篇 半导体物理实验

第 1 章 半导体物理基础知识

1.1 半导体的晶体结构与价键模型

1.1.1 晶格

金属、半导体和绝缘体是制造半导体集成电路的材料。固体物质在集成电路中扮演着至关重要的角色。从几何形态上，固体分为非晶、多晶和单晶三种基本类型，如图 1.1 所示，它们的基本差异在于有序化区域的大小不同，即原子在周期性晶格位置上位移的程度不同。周期性空间点阵是一个三维点阵。单晶材料具有几何上有序的周期性。当单晶中出现杂质、位错和缺陷时，会使晶体发生畸变，周期性遭到破坏。单晶中出现的人为或非人为引入的其他元素原子是杂质。

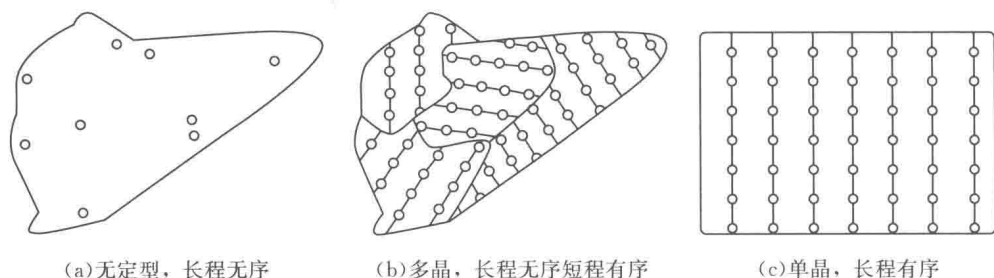


图 1.1 固体的三种几何类型示意图

晶体就是单晶，它的原子是一种周期性分布的点阵，这就是空间点阵，又称为晶格或者正格子。晶体的物理、化学和电学性质都由空间点阵的分布状况决定。格点是描述原子排列的点。图 1.2 给出了一种无限二维晶格和三维晶格中的格点、基元与空间点阵的排列。晶体点阵中的格点代表基元中某个原子的位置或基元质心的位置，也可以是基元中任意一个等价的点。当晶格点阵中的格点被具体的基元代替后就形成实际的晶体结构。晶格点阵与实际晶体结构的关系可总结为：晶格点阵+基元=实际晶体结构。晶格由一组原子周期性重复排列而成，能通过各种平移操作复制得到整个晶体的基元就称为晶胞。晶胞并不是唯一的，可以有多种结构。任一晶胞平移即构成整个晶格。最小的晶胞称为原胞，原胞重复

就形成了晶格。

晶格中格子的每个格点的情况是完全相同的。晶格又分为单式格子和复式格子。由一种原子组成的晶格称为单式格子；若晶格由几种原子组成，每种原子组成了一个子格子，则晶格由几个子格子套构而成，就称为复式格子。

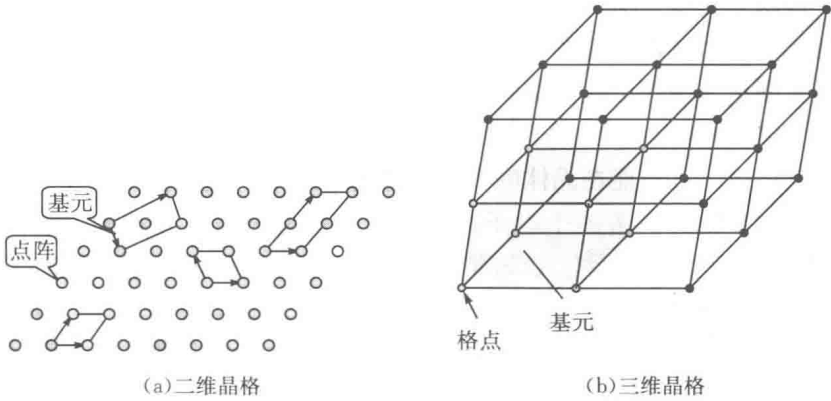


图 1.2 格点、基元与空间点阵

1.1.2 原子价键

特定的原子结合在一起形成特定的晶体结构。原子的结合形式与其结构、物理性质、化学性质彼此关联。热平衡下的系统的总能量是最小的。原子间的相互作用的类型就是原子价键。原子之间的相互作用趋于形成满价壳层，如共价键和离子键。主要的原子价键有离子键、共价键、金属键和 π 键。实际晶体的价键可以具有几种价键之间的过渡和耦合性质，形成所谓的混合键。在混合键中不同的价键之间相互关联。

共价结合的原子的电子在每个原子周围的分布相似，根据泡利(Pauli)不相容原理，每个价键由相邻两个原子各提供一个自旋方向彼此相反的价电子构成，电子在每个原子周围的分布是相似的，故称为共价键。共价键由未配对的电子形成。原子内层的电子称为芯电子。原子核及其芯电子被总称为原子实。由于内层的电子被原子核紧紧束缚，所以只有最外层的电子才能参与导电，外层的电子因构成化学价键而被称为价电子。共价键是相邻原子间通过共用自旋方向相反的电子对(电子云重叠)与原子核间的静电作用形成的。共价结合的结构具有两个特征：方向性和饱和性。原子只在特定方向形成共价键。每个原子与它的最近邻原子之间形成共价键，构成一个正四面体，键与键之间的夹角都是 $109^{\circ}28'$ 。因为共价键使得电子被相邻的原子共有，所以每个原子的价电子层都是满的，这就是共价键的饱和性。金刚石(C)、Si、Ge 等元素半导体都是通过共价键结合为晶体的。

图 1.3 是硅的共价键模型的示意图。图中圆圈表示硅原子实，圈中的“+4”说明硅是Ⅳ族元素。相邻原子实之间的每条连线代表一个共价电子。每个原子实周围共有 8 条连线，表明它有 8 个共价电子；其中 4 个是原子实提供的共价电子，另外 4 个则是与周围最近邻的 4 个原子实共享的价电子。图 1.3 的中部显示的是一个键断裂并释放出价电子的情形。因为该电子能在晶格之间自由移动，且仍在晶格势场中，所以它是准自由电子。图 1.3 的右部显示的是出现一个原子空位的情形。图 1.3 中部给出的是因环境温度产生的原子随机热振动或其他激发因素(如光照、辐射)都会导致原子键断裂而释放出电子。该电子被释放到键和原子核之间的晶格中，并且能在晶体的周期性势场中运动，是准自由电子。半导体是电中性的，在断键处失去一个电子，等效于在价电子原来所在的位置留下一个带 $+q$ 电量的正电荷，称为空穴(hole)。因此，因键断裂而产生了成对的电子-空穴对。半导体与金属的不同之处在于，半导体可以产生两种载流子，即带负电的电子和带正电的空穴。

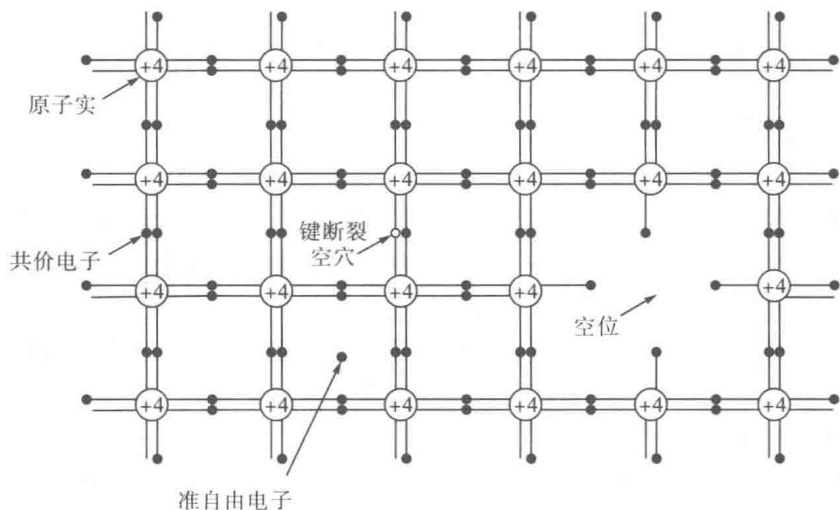


图 1.3 共价键模型

在离子键中，原子首先转变为正、负离子，原子因正、负离子之间的库仑吸引力即静电作用而结合，其成键条件是成键原子得失电子的能力不同。它是正、负离子相间排列而成。离子键的键能非常强。离子键没有方向性和饱和性。含有一部分离子性成分和一部分共价性成分的混合键或中间类型键称为极性键。大多数原子键都是具有一定程度的离子性和共价性的极性键。

在石墨烯的碳六元环组成的二维(2D)周期性蜂巢状晶格中，碳原子是 sp^2 轨道杂化，这些杂化轨道相互重叠，形成分子 σ 骨架。每一个碳原子与最邻近的三个碳原子以共价键(σ 键)相连，其中相邻碳原子与碳原子之间的键长为 1.42 \AA 。每个碳原子还有一个未参与杂化的 $2p$ 轨道，垂直于分子平面， p 轨道里面有一