

半导体物理学

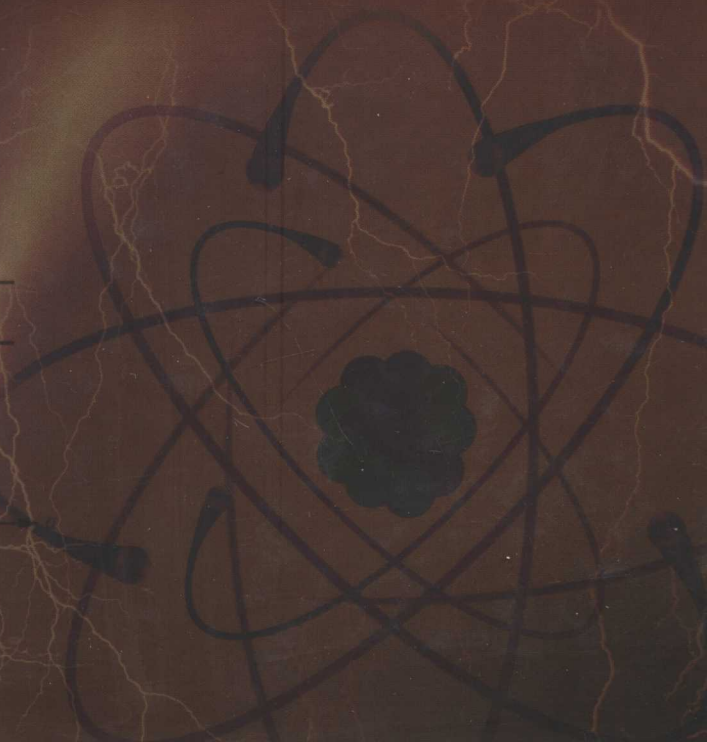
(第二版) 上册

■ 叶良修 编著

Semiconductor Physics

(Second Edition)

Part One



高等教育出版社
Higher Education Press

半导体物理学

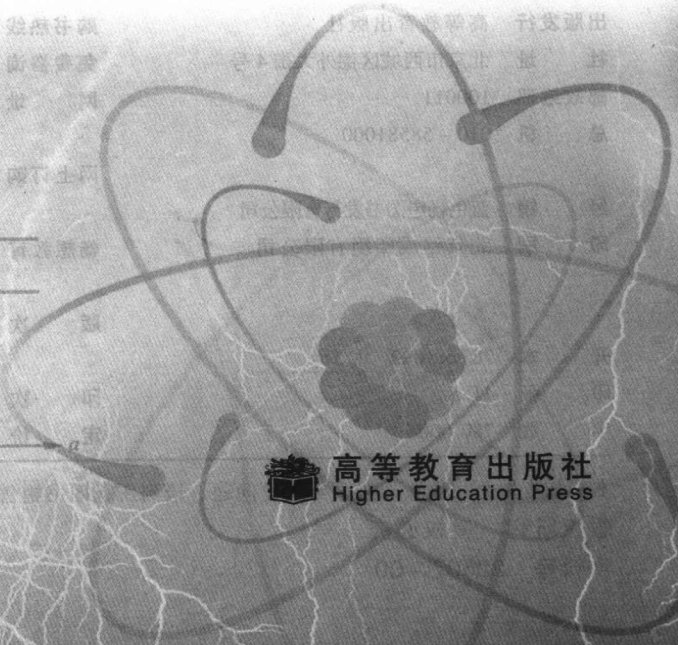
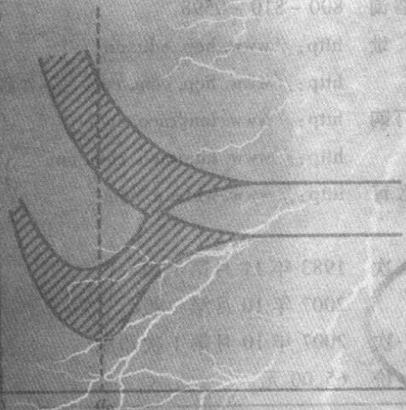
(第二版) 上册

■ 叶良修 编著

Semiconductor Physics

(Second Edition)

Part One



高等教育出版社
Higher Education Press

内 容 提 要

本书共十六章,分上下两册出版。上册主要涉及一些比较基本的内容,包括结构和结合性质,半导体中的电子状态,载流子的平衡统计,过剩载流子,接触现象,半导体表面层和 MIS 结构,微结构和超晶格,半导体的光吸收,半导体的光发射等十章。下册则收入一些专题,包括载流子的散射,热现象,复杂能带输运,强电场下的热电子,强磁场和磁共振现象,非晶态半导体等六章。本书可供已学过固体物理的大学生、研究生以及有关方面的研究人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体物理学. 上册/叶良修编著. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2007. 10

ISBN 978 - 7 - 04 - 022507 - 5

I. 半… II. 叶… III. 半导体物理学 - 高等学校 - 教材 IV. O47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 129479 号

策划编辑	王 超	责任编辑	王 超	封面设计	杨立新
责任绘图	尹 莉	版式设计	张 岚	责任校对	美国萍
责任印制	尤 静				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 41.5
字 数 780 000

版 次 1983 年 11 月第 1 版
2007 年 10 月第 2 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
定 价 65.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22507 - 00

重要符号表

a	晶格常量; $\tau = a\epsilon'$ 中的常数因子; 玻尔半径
α	基矢
A	面积
A^*	里查孙常量
b	基矢; 倒格子基矢; 滑移矢量
b	迁移率比; 宽度
B	磁感应强度
B	磁感应强度
c	真空光速; 俄歇系数
c	基矢
C	俘获速率; 电容; 态密度 $C\epsilon^{1/2}$ 的常数系数; 离子性对成键态和反成键态能量间隙的贡献
C_A	积累层电容
C_D	耗尽层电容
C_{Dm}	耗尽层电容最小值
C_{FB}	平带电容
C_i	绝缘层电容
C_{it}	界面态电容
C_l	反型层电容
C_s	半导体表面层电容
d	厚度
d_i	绝缘层厚度
d_s	半导体空间电荷层厚度
D	扩散系数; 态密度
D_n	电子扩散系数
D_p	空穴扩散系数
e	电子电荷绝对值

II 重要符号表

E	电子能量；电场强度；激发速率
E_A	受主电子态能量
E_C	导带边能量
E_D	施主电子态能量
E_F	费米能级
E_{Fe}	电子准费米能级
E_{Fh}	空穴准费米能级
E_{Fi}	本征费米能级
E_{Fn}	n 型半导体费米能级
E_{Fp}	p 型半导体费米能级
E_i	陷阱能级
E_v	价带边能量
$\mathcal{E}$	电场强度
f	分布函数；占有概率
f_A	受主能级占有概率
f_D	施主能级占有概率
f_i	离子性
f_p	空穴占有概率
f_0	零场分布函数
F	自由能；力
$\mathbf{F}$	力
F_j	费米积分
g	杂质能级自旋简并度；态密度；朗德因子
G	产生速率；电导
h	普朗克常量
$\hbar$	$\hbar = h/2\pi$
H	哈密顿算符；焓
I	电流强度
I_q	产生电流
I_{ph}	光电流
I_p	峰值电流
I_{PM}	光磁电流
j	电流密度
$\mathbf{j}$	电流密度
j_n	电子电流密度

j_p	空穴电流密度
j_o	饱和电流密度
J	光子流密度
J_n	电子流密度
J_p	空穴流密度
k_B	玻尔兹曼常量
k	消光系数; 电子波矢
$\mathbf{k}$	电子波矢
K	反应平衡常量
l	长度
L	扩散长度; 长度
L_D	德拜长度
L_n	电子扩散长度
L_p	空穴扩散长度
m	有效质量
m_d	态密度有效质量
m_l	纵向有效质量
m_n	电子有效质量
m_p	空穴有效质量
m_{ph}	重空穴有效质量
m_{pl}	轻空穴有效质量
m_t	横向有效质量
m_0	自由电子质量
n	电子浓度; 振动量子数; 实折射率
n_D	施主上电子浓度
n_i	本征载流子浓度
n_s	表面电子浓度
n_t	陷阱上电子浓度
n_0	平衡电子浓度
N	原子密度
N_A	受主浓度
N_C	导带等效态密度
N_{depl}	耗尽层电离杂质面密度
N_D	施主浓度
N_{it}	界面态面密度

IV 重要符号表

N_i	电离杂质浓度；间隙原子浓度；界面荷电中心面密度
N_{inv}	反型载流子面密度
N_q	波矢为 q 的声子数
N_s	肖特基缺陷浓度
N_v	价带等效态密度
N^*	约化浓度
p	空穴浓度，平衡空穴浓度
p_h	重空穴浓度
p_l	轻空穴浓度
p_s	表面空穴浓度
p_t	陷阱上空穴浓度
p_0	平衡空穴浓度
P	动量；蒸气压；散射概率；吸收概率
P_H	平面霍尔系数
q	声子波矢
$\mathbf{q}$	声子波矢
Q	电荷面密度
Q_B	耗尽层电荷面密度
Q_{BM}	耗尽层最大电荷面密度
Q_f	固定电荷面密度
Q_{it}	界面态电荷面密度
Q_{ox}	氧化层电荷面密度
Q_s	半导体表面层电荷面密度
r	原子半径；直接复合系数； $\tau \propto \varepsilon'$ 中的指数
r_D	扩散等效电阻
r_g	产生复合等效电阻
r_H	霍尔因子
r_n	电子俘获系数
r_p	空穴俘获系数
R	霍尔系数；电阻；复合速率
R_B	磁场下的电阻
R_C	接触电阻
R_s	表面复合速度；饱和区霍尔系数
R_0	零磁场电阻率
s	等价能谷数；位移；描准距离；激发概率；距离

S	熵; 表面复合速度; 黄 - 李因子
t	时间
T	温度; 隧道穿透概率; 渡越时间
T_M	磁阻系数
u	布洛赫波的周期性调制函数
U	内能
v	速度
v	速度
v_d	漂移速度
v_D	扩散速度
v_s	声速
v_{st}	饱和速度
v_T	热运动速度
V	晶体体积; 电压; 电势; 势能
V_c	转变电压
V_D	自建势
V_{FB}	平带电压
V_H	霍尔电压
V_i	绝缘层上的压降
V_{ms}	半导体金属间接触电势差
V_P	平面霍尔电压
V_{PM}	光磁电压
V_s	表面势
w	宽度
W	宽度; 热力学概率; 能量; 功函数; 跃迁概率
x	空间电荷区宽度, 化合物的组成成分
X	负电性
Z	以 e 为单位的电荷数
α	输运系数; 吸收系数
β	输运系数
δ	间隙宽度
ε	相对介电常数
ε_i	绝缘体的相对介电常量
ε_s	半导体的相对介电常量
ε_0	真空电容率

VI 重要符号表

ϵ	相对带边的载流子能量
ϵ_A	受主电离能
ϵ_D	施主电离能
ϵ_F	参考带边的费米能
ϵ_g	禁带宽度
ϵ_i	电离能
ζ	相对带边的费米能
η	约化费米能, $\eta = (E_F - E_c)/kT$; 比例分数
θ	角度; 霍尔角; 散射角
θ_n	电子霍尔角
θ_p	空穴霍尔角
λ	波长
Λ	牵引长度
μ	迁移率; 有效质量比 m_n/m_p ; 化学势
μ_H	霍尔迁移率
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
ν	频率
ξ	约化电子能量 $\xi = \epsilon/kT$
ρ	电阻率; 电荷密度
ρ_B	磁场下电阻率
ρ_0	零磁场电阻率
σ	电导率
σ_0	零磁场电导率
$\sigma^{(1)}$	含磁场一次项的电导率张量
$\sigma^{(2)}$	含磁场二次项的电导率张量
τ	寿命, 弛豫时间, 时间常量
τ_d	介电弛豫时间
φ	方位角; 分布函数改变量, 电子波函数
ϕ	势垒高度; 角度
χ	电子亲和能
ψ	电子波函数, 角度
ω	振动的角频率
ω_c	回旋角频率
Ω	立体角; 原胞体积

第二版前言

大约在去年这个时候，高等教育出版社的编辑给我打来电话，建议再版我二十多年前的《半导体物理学》。我感到为难，因为由于种种原因，我已有很多年未接触过这个领域了，我不想让这本书按二十多年前的原貌和读者见面。编辑同志从多方面说明了应该再版的理由，我还是被说服了。这不能不说到写这本书的初衷。当“科学的春天”到来的时候，我感到我们这一代能做的最有效的工作首先莫过于为后来者当个铺垫，或者说就是当个“肩膀”。对此我是十分认真的。这些年来，我还是真实地感到了这本书确实起到了一定的铺垫作用。这是让我一直感到欣慰的事。既然我现在还有一些精力，那就再扛一次吧。

至于本书的内容和特点，已故黄昆院士对本书上册第一版的书稿曾作过如下概括：

“和过去编写的半导体物理，如我和谢希德合写的书相比，有以下几方面最显著的发展：

1. 在大部分章节上，对理论都作了更为深入的阐述。如果说，过去的书主要限于最基本的原理、概念和方法的介绍，这个稿子则对问题进行了更为深入的具体的处理，使之更为切合把理论实际用于分析问题的需要。最明显是在统计理论和输运过程的处理上。

2. 这个稿子重视联系实际半导体，阐述它们的基本性质和资料。过去我们写的那本书侧重阐述一般的概念，这个稿子则注意了适当阐述各类主要半导体材料的性质和特征。

3. 在各个部分，都作了努力，反映近年来的新发展，如混晶、异质结、深能级的研究等等许多方面。

在阐述的科学水平上，我认为，总的来说，阐述是正确的，表达上是准确和精炼的。这一点我认为是很重要的。

我想，按这个稿子写成书，作为大学的教材，分量可能是太重了；但是，作为教学参考书将是合适的，和很有作用的。”

黄昆先生说这本书“表达上是准确和精炼的”，对我个人来说这是过奖了，

II 第二版前言

我只是把它看成是一种鼓励。因为正如我在本书第一版前言中说过的,“由黄昆教授和谢希德教授合写的《半导体物理学》是大家公认的一本好书”;“在编写本书时作者力图吸取这本书的精华”。

黄昆先生这里说到“准确和精炼”,我想是因为他对“准确和精炼”的特别的重视,尤其是对于面对学生的教科书和教学参考书。我想,不管是物理内容的阐述还是数学推导,都应该通过深入的思考,提炼出其中的精华和关键,使用准确的语言和简练的步骤,符合逻辑地把它们表达出来,并努力使物理和数学这两者密切结合。

本书上册的第二版大体保持了第一版的基本风貌。作者仍把“准确和精炼”作为最主要的指导思想之一。根据二十多年来的发展,作者对本书作了全面的审定,并对内容作了幅度相当大的调整和补充,但力争做到结构上的合理和内容上的严谨。

第二版上册中较大的变动是由原来的八章调整为十章。

原书第6章pn结和第8章金属半导体接触和异质结合并为第6章:接触现象。这样做不仅有利于对篇幅作适当的压缩,而且有利于通过比较对同质pn结、异质结和金属半导体接触这三者的同、异有更深入的认识。

原书下册中的光的吸收和反射及半导体中的发光现象这两章移入上册作为第9章和第10章。

新增加的内容大部分集中在微结构和超晶格上,以反映近年来这个领域的相当集中而又迅速的发展。大部分内容放在第8章中。这一章比较大,篇幅大约相当于两个大章的大小。一小部分,如微结构和超晶格的光谱现象等,则放在第10章。

作者特别感谢李荫远院士对本书的支持。朱邦芬院士、李树深教授和章蓓教授对第二版的内容提出了不少宝贵的建议。在编写过程中还得到了郑捷女士、王兆林先生、张斌女士以及张绮香女士的宝贵帮助。在此一并感谢。由于时间过于仓促,错误和不妥之处在所难免,欢迎指正。

作者

2007.5.27

第一版前言

在从事教学的过程中，深感需要有一本较多反映近年来半导体物理发展的教学参考书，这就是作者编写本书的意图。

1958年出版的由黄昆教授和谢希德教授合写的《半导体物理学》是大家公认的一本好书。它以对物理概念的清楚、准确和精辟的阐述吸引着读者。因此在编写本书时作者力图吸取这本书的精华。

由于本书所涉及的内容比较广泛，分上下两册出版。上册包括一般教学中所涉及的比较基本的内容(参看本书目录)，而下册则收入一些专题，包括载流子的散射、热现象、复杂能带输运、强电场下的热电子、光的吸收和反射、强磁场和磁共振现象、光发射、非晶态半导体等方面的有关内容。但是，这种划分也并不是绝对的，像热电子现象及光的吸收和发射等也具有基本内容性质，至于各章内容的处理，为了便于教学上的选择，一般把更基本的内容安排在一个章、节的较前面的部分。当然，这只是作者个人的考虑，读者还可以根据需要加以调整。

本书采用国际单位制，但保留习惯使用的单位。重要的公式一般都写成了便于计算的形式。由公式本身一般可以立刻得到有关物理量的数量级的概念。

本书是作者在北京大学讲课所用的讲义的基础上编写的、本书在编写过程中始终得到了黄昆教授的关怀，他不仅审阅了本书，而且进行了具体的指导并作了若干重要修改。作者在此表示衷心的感谢。

作者在编写本书的过程中和韩汝琦、武国英同志进行了很多有益的讨论。他们在本书的内容选取和组织上都提出了许多宝贵意见，和李志坚、甘子钊、秦国刚、李瑞伟、刘文明、杨顺华、张绮香、江丕桓、虞丽生、梅良模、杨楚良、林彰达、黄培忠、王子滨等同志就有关问题进行了有益的讨论。这些对于本书的编写也有很大帮助，在此一并表示感谢。

限于作者的水平，本书难免有许多错误和不妥之处。希望得到有关方面的专家和读者的指正。

叶良修

1983年3月14日

目 录

重要符号表	1
第 1 章 晶格结构和结合性质	1
§ 1.1 晶格的周期性	1
§ 1.2 常见半导体的晶格结构	7
§ 1.3 结合性质	11
§ 1.4 晶格缺陷	21
§ 1.5 半导体表面的再构	29
第 1 章参考文献	35
第 2 章 半导体中的电子状态	39
§ 2.1 晶体中的能带	39
§ 2.2 晶体中电子的运动 有效质量和有效质量近似	51
§ 2.3 导电电子和空穴	59
§ 2.4 常见半导体的能带结构	63
§ 2.5 杂质和缺陷能级	77
§ 2.6 局域态的晶格弛豫	88
§ 2.7 重掺杂半导体	93
§ 2.8 表面态	96
第 2 章参考文献	100
第 3 章 电子和空穴的统计平衡分布	107
§ 3.1 费米分布函数	107
§ 3.2 载流子浓度对费米能的依赖关系	111
§ 3.3 本征载流子浓度	115
§ 3.4 含单一能级杂质情形的统计	118
§ 3.5 补偿及多重能级情形的统计	123

II 目录

§ 3.6 简并情形的统计	130
§ 3.7 化学势和费米能	133
§ 3.8 宽禁带半导体的掺杂问题和自补偿	137
附录 3.1 若干半导体的等效态密度(300K)	142
第 3 章参考文献	142
第 4 章 电荷输运现象	145
§ 4.1 电导和霍尔效应的分析	145
§ 4.2 载流子的散射	156
§ 4.3 电导统计理论	168
§ 4.4 霍尔效应的统计理论	174
§ 4.5 磁阻	180
§ 4.6 强电场下的载流子输运	187
§ 4.7 漂移速度过冲和近弹道输运	194
附录 4.1 微扰势引起的状态之间的跃迁	203
附录 4.2 玻尔兹曼积分—微分方程和弛豫时间的存在性	206
附录 4.3 电阻率和杂质浓度的对应关系	208
第 4 章参考文献	209
第 5 章 过剩载流子	213
§ 5.1 过剩载流子及其产生和复合	213
§ 5.2 过剩载流子的扩散	217
§ 5.3 过剩载流子的漂移和扩散	223
§ 5.4 双极扩散和双极漂移	228
§ 5.5 丹倍效应和光磁效应	231
§ 5.6 表面复合对寿命的影响	233
§ 5.7 复合机制和直接复合	236
§ 5.8 间接复合	245
§ 5.9 陷阱效应	256
§ 5.10 空间电荷的弛豫	262
第 5 章参考文献	265
第 6 章 接触现象	269
§ 6.1 同质和异质 pn 结势垒	269
§ 6.2 金属—半导体接触:肖特基势垒	278

§ 6.3 pn 结电流: 注入电流 势垒区产生复合电流	288
§ 6.4 肖特基势垒电流 尖峰发射	297
§ 6.5 势垒电容和扩散电容	306
§ 6.6 隧道穿透势垒——隧道电流	315
§ 6.7 光生伏特效应	327
§ 6.8 雪崩击穿和齐纳击穿	332
第 6 章参考文献	336
第 7 章 半导体表面层和 MIS 结构	342
§ 7.1 半导体表面电荷层	342
§ 7.2 MIS 电容	347
§ 7.3 界面态及其电容效应	358
§ 7.4 场效应和表面电导	366
§ 7.5 表面复合	370
附录 7.1 半导体表面电荷层电荷、表面电场和电容作为 V_s 函数的 一般表示式	375
第 7 章参考文献	376
第 8 章 微结构和超晶格	379
§ 8.1 半导体中的尺寸量子化和低维电子气	379
§ 8.2 微结构和超晶格的生长和形成	390
§ 8.3 二维电子气的电荷输运	397
§ 8.4 微结构中垂直于界面的输运 共振隧穿	407
§ 8.5 一维系统的输运 介观输运	413
§ 8.6 有关量子点的输运现象	426
§ 8.7 半导体超晶格	438
§ 8.8 超晶格的输运	446
§ 8.9 Rashba 效应和自旋晶体管	453
§ 8.10 碳纳米管	457
§ 8.11 异质结构的带阶	465
§ 8.12 晶格失配的异质结构	471
第 8 章参考文献	479
第 9 章 半导体的光吸收和光反射	501
§ 9.1 光的吸收和基本吸收边	502

IV 目录

§ 9.2 基本吸收与能带结构	515
§ 9.3 激子和激子吸收	520
§ 9.4 杂质吸收	526
§ 9.5 自由载流子吸收	531
§ 9.6 晶格吸收和反射	537
第 9 章参考文献	540
 第 10 章 半导体中的发光现象	545
§ 10.1 自发发射和受激发射	545
§ 10.2 发光光谱	551
§ 10.3 微结构和超晶格的光谱现象	566
§ 10.4 发光二极管及相关问题	581
§ 10.5 半导体激光器	593
§ 10.6 单光子发射和量子点-微腔系统	609
第 10 章参考文献	620
 索引	638
 重要的物理常量	647

晶格结构和结合性质

本书以半导体中的电子性质为主要的讨论对象。但对晶格结构和结合性质有适当的具体的了解也是十分必要的。在固体物理学教科书中，对这些内容都有详细的一般讨论，因此在这一章中只就常见半导体的晶格结构和结合性质的特点做更多一点的介绍，并适当介绍晶格缺陷和表面再构。

§ 1.1 晶格的周期性^[1]

晶体可定义为由周期性排列的原子(离子或分子)构成的物质。图 1.1 为由同一种原子构成的晶体的二维示意图。图中的圆点代表原子。常把相应的周期性的结构称为晶格。

晶胞和原胞

任何三维的晶格都可以由适当的平行六面体单元作为基本单元，沿不平行的三个边作周期性的堆砌得到。例如，简单立方晶格、体心立方晶格和面心立方晶格可分别由图 1.2(a)，(b)，(c)所示的基本单元周期重复得到。这种基本单元被称为晶胞。

如图 1.1 所示，晶胞的划分有一定的任意性。有实际意义的选取方法有两种：一种是选取最小的重复单元，即使晶胞中包含的原子最少。我们把这种最小的周期重复单元称为原胞。图 1.2(a)所示的简单立方晶格的晶胞同时也是这种晶格的一种原胞。另一种是选取能够最大限度反映晶体对称性的最小周期重复单元，称为晶体学晶胞。图 1.2(a)，(b)，(c)都是这样的晶胞。这些具有立方对称性的晶格构成

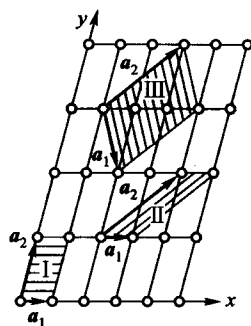


图 1.1 晶格的二维示意图