

半导体异质结物理

虞丽生 编著

科学出版社

半导体异质结物理

虞丽生 编著

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书系统地总结了近年来国内外有关半导体异质结方面的研究成果。全书共分八章,主要介绍半导体异质结的基本物理性质,内容有半导体异质结材料的特性、能带图、伏安特性,以及异质结晶体管、二维电子气及调制掺杂器件、非平衡载流子、光电特性、量子阱及超晶格等。本书可供已学过半导体物理的高年级大学生、研究生及有关科技人员阅读。

半 导 体 异 质 结 物 理

虞丽生 编著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年5月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1990年5月第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 001—750 字数: 273 000

ISBN 7-03-001604-1/O · 321

定 价: 12.60 元

前 言

A. G. Milnes 和 D. L. Feucht 1972 年编写的“异质结及金属半导体接触”和 B. L. Sharma 及 A. K. Purohit 1974 年编写的“半导体异质结”，总结了异质结研究初期的一些成果。近十几年来，对半导体异质结的研究，无论在理论上还是在应用上都取得了很大的进展，二维电子气、调制掺杂、量子阱及超晶格的研究为半导体异质结增添了许多全新的物理内容。异质结晶体管、高电子迁移率器件、异质结激光器和量子阱及超晶格器件在集成电路、集成光学和光纤通信中有着重要的应用前景。半导体异质结是当前迅速发展的重要领域之一。

本书系统地论述了半导体异质结的基本物理性质，较全面地介绍了近十几年来的最新进展，可供高年级大学生、研究生及有关方面的工作人员参考。本书在编写的过程中得到了黄昆教授的关怀，他亲自审阅了第八章全部和第五章的主要部分，提出了若干重要修改意见，作者在此表示衷心的感谢。夏建白同志花费很多精力对本书进行了全面细致的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见；于淦同志审阅和修改了第五章的部分内容。在编写的过程中还和韩汝琦、江丕桓、韩汝珊、陆果、叶良修等同志进行了有益的讨论。作者在此一并表示感谢。

限于作者的水平，本书难免有许多错误和不妥之处，希望专家和读者指正。

1987 年 1 月

目 录

第一章 序言	1
参考文献	4
第二章 半导体异质结的组成与生长	6
§ 2.1 材料的一般特性	6
(1) 晶格结构	6
(2) 能带结构	9
(3) 有效质量和等效态宽度	18
§ 2.2 异质结界面的晶格失配	22
§ 2.3 异质结的生长	27
(1) 液相外延法	27
(2) 金属有机化学气相沉积法	30
(3) 分子束外延	33
参考文献	34
第三章 半导体异质结的能带图	36
§ 3.1 理想突变异质结的能带图	37
(1) 异型异质结	37
(2) 同型异质结	43
(3) 对 pN 异质结的修正	50
§ 3.2 异质结的能带偏移	52
(1) Anderson 定则及有关争议	52
(2) 测量能带偏移的方法	55
(i) X 光光电子发射谱	55
(ii) 量子阱光跃迁光谱	57
(iii) 电容-电压法	59
(iv) 电流-电压法	64
§ 3.3 有界面态的突变异质结能带图	66

(1) 界面态密度较小	66
(2) 界面态密度较大	69
(3) 界面态密度很大	70
§ 3.4 渐变异质结的能带图	71
参考文献	77
第四章 半导体异质结的伏安特性和异质结晶体管	79
§ 4.1 异质结的注入比	79
§ 4.2 异质结中的超注入现象	84
§ 4.3 理想突变异质结的伏安特性	87
(1) pN 异质结	87
(i) 扩散模型	87
(ii) 热电子发射模型	90
(iii) 穿通势垒尖的隧道模型	91
(2) nN 异质结	94
§ 4.4 有界面态的异质结的伏安特性	96
(1) 热电子发射和多阶隧道的并联模型	96
(2) 界面能级的电离对伏安特性的影响	98
(3) 空间电荷区的复合电流	101
(4) 完全经由界面态的复合电流	103
(i) 界面复合与热电子发射串联	103
(ii) 隧道复合	104
(iii) 界面复合与隧道复合串联	105
(iv) 反向串联 Schottky 二极管模型	106
(5) 表面复合对伏安特性的影响	108
§ 4.5 伏安特性的微商研究法	110
§ 4.6 异质结双极晶体管	112
(1) 理论分析	112
(i) 晶体管的增益	112
(ii) 频率特性	116
(2) 异质结双极晶体管的制备	120
参考文献	123
第五章 半导体异质结构中的二维电子气及调制掺杂器件	126
§ 5.1 方形势阱中粒子运动的特性	126

(1) 一维方形势阱	126
(i) 无限势阱	126
(ii) 有限势阱	128
(2) 方形沟道势阱中的粒子	130
§ 5.2 异质结量子势阱中的二维电子气	134
(1) 方形势阱的简单分析	134
(2) 异质结界面的量子阱	137
(i) 三角形势阱近似	138
(ii) 自洽解	140
(a) 无穷高势垒	141
(b) $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结中有限高势垒的自洽解	142
(3) 势阱中的面电子密度	144
(4) 界面组分渐变对势阱的影响	150
§ 5.3 二维电子气的输运	156
(1) 二维弛豫时间近似	156
(2) 二维电子气的散射	161
(i) 电离杂质散射	161
(ii) 晶格振动散射	165
(iii) 界面粗糙度散射	168
(iv) 合金无序散射	168
§ 5.4 调制掺杂结构和场效应晶体管	169
§ 5.5 强磁场中的二维电子气	174
(1) 磁量子效应和磁阻振荡	174
(2) 二维电子气的朗道能级	177
(3) 量子霍尔效应	182
参考文献	191
第六章 半导体异质结中的非平衡载流子	193
§ 6.1 过剩载流子的特性	194
(1) 准费米能级	194
(2) 过剩载流子的寿命	194
§ 6.2 异质结中的过剩载流子	196
§ 6.3 异质结中过剩载流子寿命的测量	203

(1) 荧光脉冲衰减法	203
(2) 反向电压恢复法	206
(3) 激光延迟法	208
(4) 光电流法	209
§ 6.4 热载流子的一般特性	212
(1) 电子温度和分布函数	212
(2) 热载流子的漂移和扩散	214
(3) 载流子在能谷之间的转移	215
§ 6.5 研究热载流子特性的实验方法	215
(1) 迁移率测量	215
(2) 光荧光光谱测量	216
(3) 吸收光谱测量	221
(4) 喇曼散射测量	222
(5) 隧道效应测量	223
(6) 时间分辨光谱的测量	225
§ 6.6 异质结中的热电子行为	227
(1) 异质结中热电子的光荧光光谱	227
(2) 异质结中电子迁移率随电场的变化	228
(3) 异质结中热载流子的远红外发射	231
(4) 异质结中热载流子的弛豫	231
(5) 异质结中热电子的实际空间转移	233
§ 6.7 几种实空间转移器件	237
(1) 负阻振荡器	237
(2) 负阻场效应晶体管	238
(3) 电荷注入晶体管	239
参考文献	241

第七章 半导体异质结的光电特性

§ 7.1 半导体异质结的受激光发射原理	243
(1) 半导体中受激光发射的必要条件	243
(2) 半导体的吸收系数的光谱分布	246
(3) 激光的阈值条件	249
§ 7.2 异质结在半导体激光器中的作用	253

(1) 载流子限制作用	254
(2) 光的限制作用	256
(3) 异质结对激光器的效率和寿命的影响	260
§ 7.3 异质结的光电特性	260
(1) 异质结的光伏特性和光电流	260
(2) 光伏谱方法	265
§ 7.4 异质结光电晶体管	267
§ 7.5 异质结中的持久光电导效应	276
参考文献	278
第八章 半导体超晶格和多量子阱	281
§ 8.1 超晶格和多量子阱的一般描述	281
§ 8.2 超晶格的能带	283
(1) GaAs-Al _x Ga _{1-x} As 超晶格	283
(2) InAs-GaSb 超晶格	288
(3) HgTe-CdTe 超晶格	290
(4) 应变层超晶格	293
(5) IV-VI 族和 II-V 族超晶格	295
(6) 掺杂超晶格	296
§ 8.3 垂直于超晶格方向的电子输运	297
§ 8.4 超晶格的光谱特性	308
(1) 吸收光谱实验	309
(2) 激子光谱	309
(3) 激子的饱和吸收	314
(4) 室温荧光特性	315
(5) 其他光谱特性	316
§ 8.5 超晶格和量子阱器件	318
(1) 量子阱激光器	318
(2) 光学双稳态器件	319
参考文献	323

第一章 序 言

计算机和自动化正在愈来愈广泛地进入到人们的生活中。一个技术革命的新纪元已经开始。计算机的心脏部分是集成电路，它使计算机的许多奇妙的功能得以实现。pn 结则是组成集成电路的主要细胞。50 年代 pn 结晶体管的发明和其后的发展奠定了这一划时代的技术革命的基础。

pn 结是在一块半导体单晶中用掺杂的办法做成两个导电类型不同的部分。一般 pn 结的两边是用同一种材料做成的（例如锗、硅及砷化镓等），所以称之为“同质结”。如果把两种不同的半导体材料做成一块单晶，就称之为“异质结”。结两边的导电类型由掺杂来控制。掺杂类型相同的称为“同型异质结”（nN 或 pP 结）¹⁾。掺杂类型不同的称为“异型异质结”（nP 或 pN 结）。

两种材料禁带宽度的不同以及其它特性的不同使异质结具有一系列同质结所没有的特性，在器件设计上将得到某些同质结不能实现的功能。譬如说，在异质结晶体管中用宽带一侧做发射极会得到很高的注入比，因而可获得较高的放大倍数。还有，如果在异质结中两种材料的过渡是渐变的，则禁带宽度的渐变就相当于存在着一个等效的电场，使载流子的渡越时间减小，器件的响应速度增加。禁带宽度的渐变也能使作用在电子和空穴上的力方向相反，因而能分别控制电子和空穴的运动。另外，同型异质结是一种多数载流子器件，速度比少子器件高，更适合于做成高速开关器件。

正因为有上述这些特点，早在 60 年代初期，当 pn 结晶体管刚刚取得巨大成功的时候，人们就开始了对于异质结的研究^{1,2)}，对

1) 为了表达清楚起见，我们用大写字母 N 或 P 表示异质结中禁带宽度较大的材料的导电类型，用小写字母 n 或 p 表示禁带宽度较小材料的导电类型。

异质结的能带图、载流子在异质结中的输运过程以及异质结的光电特性等提出了各种物理模型并做了理论计算。同时，在实验上也生长了一些异质结，并测量了它们的特性。其中做得较多的是 Ge-Si, Ge-GaAs 及其他 III-V 族异质结。但是，研究工作的结果并不理想；理论和实验未能做到一致，实验上也未能做出功能较好的器件。主要原因之一是实验上很难得到非常理想的异质结。因为组成异质结的两种材料的晶格常数不同，当它们长成同一块单晶时，晶格的周期性在界面上发生畸变，形成位错和缺陷。除了这种由材料本身固有性质决定的缺陷以外，生长工艺上的不完善还会引进更多的附加缺陷。这些界面上的位错缺陷将成为少数载流子的复合中心。早期生长的异质结中因为界面缺陷太多，无法实现少子注入的功能，因而也不能做成性能较好的异质结器件。

在异质结器件方面，首先在异质结半导体激光器上获得了突破性进展。异质结的禁带宽度之差造成的势垒对注入载流子的限制作用和异质结的高注入比特性，都有助于粒子数反转的建立。两种材料折射率的不同提供了做成光波导的可能性，以减少光在谐振腔以外的损失。因而用异质结，做成激光二极管是十分有利的。1968年美国的贝尔实验室和RCA公司以及苏联的约飞研究所都宣布做成了 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器^[3,4,5]。他们选择了晶格失配很小的多元合金固溶体做异质结对。GaAs 的晶格常数是 5.6531 埃，AlAs 的晶格常数是 5.6622 埃，两者之差为 0.16%，固溶体 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 GaAs 的晶格常数之差还要更小一些。同时，液相外延工艺的改善使生长的界面具有接近于理想的完整的晶格。经过十多年的努力，现在不仅 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 双异质结激光器，而且长波长的 InP-InGaPAs 激光器均可做到室温连续工作寿命十万小时以上，输出功率达数十毫瓦，模式及其它特性也在不断改进，已可正式使用到激光光导纤维通信系统中去了。

在 70 年代里，异质结的生长工艺技术取得了十分巨大的进展。液相外延 (LPE)、气相外延 (VPE)、金属有机化学气相沉积 (MO-CVD) 和分子束外延 (MBE) 等先进的材料生长方法相继

出现, 因而使异质结的生长日趋完善. 分子束外延不仅能生长出很完整的异质结界面, 而且对异质结的组分、掺杂、各层厚度都能在原子量级的范围内精确控制.

工艺技术的进步使异质结的研究重新获得了生命力, 使其在一个更新的基础上, 在更广阔的领域内蓬勃开展起来了. 近年来, 异质结晶体管的早期设想正在逐步实现, 据报道, 已用 $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 InP-InGaAs 做成了双极晶体管^[6,7] (简称 HBT), 其截止频率达到 35 GHz. 异质结光电晶体管的增益也已做到数千^[8]. 其它异质结的光电接收器件 APD 和 PIN 二极管等也达到了较好的水平. 在用分子束外延生长的调制掺杂异质结构中可以获得比一般体材料大得多的低温迁移率, 4K 下的电子迁移率可达到 $2 \times 10^6 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[9]. 用这种材料做成的场效应晶体管(称为高电子迁移率晶体管 HEMT 或调制掺杂场效应晶体管 MODFET) 可以高速工作, 响应时间在 77K 下至少可以做到 8.5ps^[10]. 这个速度已和超导约瑟夫森结相似, 但是超导结必须在液氮下工作, 而 HEMT 器件则可在 77K 下工作, 甚至可以在室温下工作, 因而实用价值要大得多. 近几年来对异质结中的热载流子行为也进行了较多的研究. 利用载流子在实际空间转移所产生的负阻现象已经做成了振荡器件^[11]. 在材料方面, 除了对 GaAs-AlAs 系统有了广泛和深入的研究之外, 对其它 III-V 族材料, 如 InP-GaAs , GaSb-InAs 系统也做了很多的研究工作. 对 II-IV 族 II-VI 族异质结和一些磁性半导体异质结, 如 HgTe-CdTe , Hg MnTe-CdTe , PbTe-PbSnTe , Si-SiGe 等的研究工作, 也相继展开^[12].

在这十多年间, 工艺的进步也促进了异质结物理研究的深入开展. 对异质结的宏观性质, 如 pn 结特性、载流子输运过程、光电特性、能带图、结构缺陷、复合和发光等方面的问题, 有了更细致的了解. 这对各种异质结器件的原理和设计都有指导作用. 分子束外延可以生长出厚度为数十埃的单层和多层的量子阱. 由于能带的断续和载流子的转移, 在突变异质结的界面上存在着一个

宽度约为 100—200 埃的量子阱。这些量子阱中的电子在垂直于界面的方向上的运动受到限制,使电子的运动具有准二维的特性。这是在未来的电子器件物理中需要认真考虑的一种现象。集成电路规模愈做愈大,器件尺寸愈做愈小。在许多情况下,器件的尺寸可以和电子的 de Broglie 波长相比拟。在薄层器件中,电子的运动应该看成是准二维的。在准二维运动中能级结构、散射和输运特性、跃迁等基本性质都和三维情况差别很大。例如,在极低温度和强磁场下的量子霍尔效应就是一种以前没有看到过的基本物理现象^[13]。因此,已引起了固体理论界的极大重视,并推动了固体理论的发展。量子霍尔效应的发现者 von Klitzing 获得了 1985 年度的诺贝尔物理奖。

自从 1969—1970 年 Esaki 等第一次提出超晶格的概念以来^[14],对异质结超晶格的研究也在逐步深化。已有多种异质结对做成了超晶格结构,并对它们的电学、光学及输运特性等进行了广泛的理论和实验的研究,而且已经用超晶格做成了器件。不过人们目前对超晶格物理性质的认识还很不够,有待做进一步深入的研究。

对异质结的研究正在走向高潮,异质结将在半导体器件、光电子器件、集成光学和集成电路等领域内广泛地发挥作用。本书对异质结物理做了系统的介绍,可供在上述领域内从事科研和教学工作的人员参考。

参 考 文 献

- [1] B. L. Sharma & R. K. Purohit, *Semiconductor Heterojunction*, Oxford Pergamon Press (1974).
- [2] A. G. Milnes & D. L. Feucht, *Heterojunction and Metal-Semiconductor Junction*, Academic Press, New York (1972).
- [3] I. Hayashi, M. B. Panish and P. Foy, *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-5, 211(1969).
- [4] H. Kressel and H. Nelson, *RCA Rev.*, 30, 106(1969).
- [5] Ж. И. Алфёров и др., *Физ. Тех. полупроводников*, 2, 1545 (1968).
- [6] A. N. M. M. Choudhury, K. Tabatabaie-Alavi & C. G. Fonstad, *IEEE Elec-*

Iron Device Letters, **EDL-5**, 251(1984).

- [7] R. Fischer & H. Morkoc, *IEEE Electron Letters*, **EDL-7**, 359(1986).
- [8] M. N. Svilans et al., *IEEE Electron Device Letters*, **EDL-1**, No. 12(1980).
- [9] S. Hiyamizu, J. Saito, K. Nanbu & T. Ishikawa, *Jap. J. Appl. Phys.*, **22**, 609(1983).
- [10] N. C. Cirillo, Jr., and J. K. Abrokwhah, Proc. 43rd Ann. Device Research Conf. (Boulder, CO, June 17—19, 1985) IIA-7.
- [11] M. Keever, W. Kopp, I. J. Drummond, H. Morkoc and K. Hess, *Jap. J. Appl. Phys.*, **21**, 1489(1982).
- [12] T. C. McGill & P. L. Smith, *J. Vac. Sci. Tech.*, **B1**, 260(1983).
- [13] K. V. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 494 (1980).
- [14] L. Esaki & R. Tsu, *IBM J. Res. Develop.*, **14**, 61 (1970).

第二章 半导体异质结的组成与生长

§ 2.1 材料的一般特性

可以组成异质结的材料很广泛,许多元素半导体、III-V 族、II-VI 族、IV-VI 族化合物半导体,甚至一些氧化物半导体,在一定条件下,原则上均可以组成异质结对。但是,目前大量的研究工作集中在 III-V 族化合物以及它们的三元和四元固溶体上。本节将着重介绍它们的一般特性。

(1) 晶格结构

大部分 III-V 族化合物半导体的晶体结构是闪锌矿结构。它们的原子排列如图 2-1 所示^[1,2],黑白两种点子分别代表两种不同的原子。每个原子和它的四个最近邻原子之间形成共价键,组成一个等四面体,键之间的夹角都是 $109^{\circ}28'$ 。这种结构可以看成是

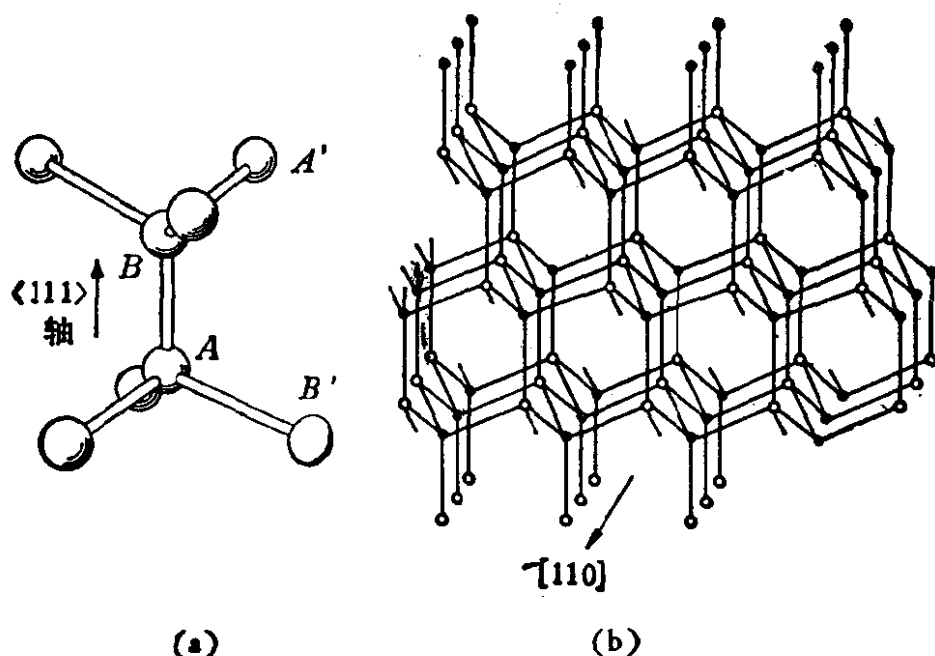


图 2.1 闪锌矿结构的原子排列

两套互相穿插着的.在对角线方向上相对移动了 $\frac{1}{4}$ 的面心立方晶

体. 图 2.2 是 GaAs 晶体的晶胞. 立方体的表面是 $\{100\}$ 面,它包含有三个独立的面,即 (100) 、 (010) 、 (001) 面. 在每个 $\{100\}$ 面上都只有一种原子,或者全是 Ga 原子或者全是 As 原子. 立方体的六个对角面是 $\{110\}$ 面. 在这个面上同时包含着 As 原子和 Ga 原子,因而它的结合力是比较强的. GaAs 材料的自然解理面是 $\{110\}$ 面. 图 2.2 中的阴影部分所示的斜对角面是 $\{111\}$ 面. 一共有六个独立的 $\{110\}$ 面,即 (110) 、 $(1\bar{1}0)$ 、 (011) 、 $(0\bar{1}1)$ 、 (101) 和 $(10\bar{1})$ 和四个独立的 $\{111\}$ 面,即 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$. $\{111\}$ 面也是完全由同一种原子组成,分为 As $\{111\}$ 面和 Ga $\{111\}$ 面. 在闪锌矿晶体中辨认这三个主要晶面的简单办法是: As 和 Ga 的原子之间的键都是 $\langle 111 \rangle$ 方向,垂直于此方向的面均属 $\{111\}$ 面. 任何一个原子和它最近的同种原子所联成的线都是 $\langle 110 \rangle$ 方向. 在图 2.1(a)中所示的四面体的四个棱都是 $\langle 110 \rangle$ 方向,垂直于此方向的面都是 $\{110\}$ 面. 在这六个独立的 $\{110\}$ 面中每两个相互垂直. 两个垂直的 (110) 面的交线则是 $\langle 100 \rangle$ 方向,因而 $\{100\}$ 面将与两个相互垂直的 (110) 面都垂直. 利用上述原则,根据两个相互垂直的 (110) 自然解理面,在工艺上可以很简单地对晶体进行定向. 所谓晶格常数是指如图 2.2 所示的晶胞的边长.

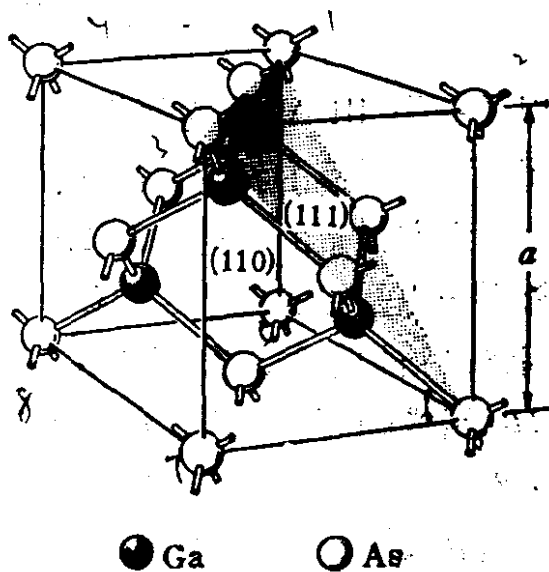


图 2.2 GaAs 晶体的晶胞

大部分 III-V 族化合物,如 GaAs, AlAs, InP, InAs, InSb, AlP, GaSb, GaP, BP 和 BAs, 都是属于立方晶系闪锌矿结构. 许多重要的 II-VI 族化合物,如 CdTe, HgTe, ZnTe 和 ZnSe 也是闪锌矿结构. 其他一些 II-VI 族化合物,如 CdS, ZnS, CdSe

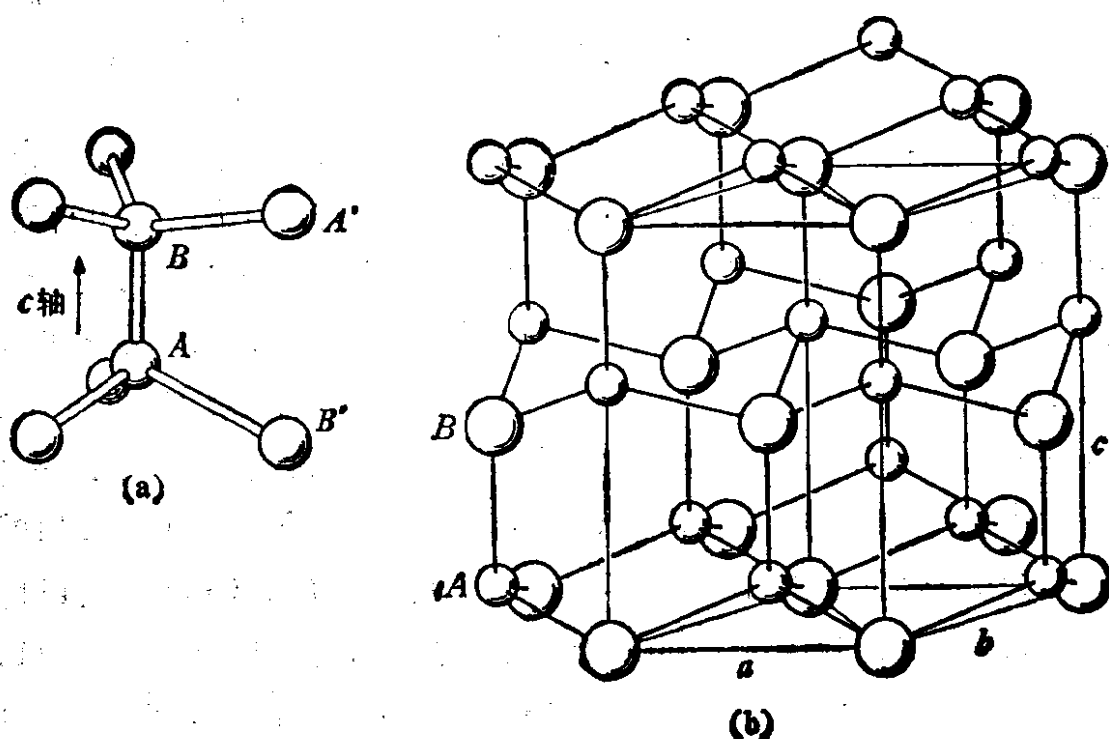


图 2.3 纤锌矿结构的原子排列

以及一些 III-V 族的氮化物，如 BN，AlN，GaN 和 InN 则是属于六方晶系的纤锌矿结构。

六方晶系的晶格如图 2.3 所示^[1]。每个原子和它的四个最近邻原子也是组成一个四面体。但是，在某一个方向上堆垛次序和闪锌矿结构不同。如图 2.3(a) 中上、下两个四面体中键 $A'B$ 和 AB 组成的面与 $B'A$ 和 AB 组成的面共面，而在闪锌矿结构中 $A'B$ 和 AB 组成的面与 $B'A$ 和 AB 组成的面之间的二面角为 60° [图 2.1(a)]，这个堆垛次序特殊的方向就是 C 轴。图 2.3(b) 中细线联接的区域表示这种结构的原胞。长的方向是 C 轴， $a = b$ ， a 和 b 之间的夹角为 120° ， a 和 c 及 b 和 c 之间的夹角均为 90° 。纤锌矿结构由两套互相穿插着的密排六方晶格组成，相互之间沿 C 轴移动了 $\frac{3}{8}c$ 的距离。

另一些重要的、可构成异质结对的半导体材料是 IV-VI 族化合物，如 PbTe，SnTe 等。它们的晶格结构如图 2.4 所示^[1]，和 NaCl 的晶格结构形式相同。和 GaAs 及 CdS 等以共价键相结