

半导体超晶格材料及其应用

康昌鹤 杨树人 编著

国防工业出版社

半导体超晶格材料及其应用

康昌鹤 杨树人 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

半导体超晶格材料及其应用/康昌鹤,杨树人编著. —
北京:国防工业出版社,1995.12
ISBN 7-118-01505-9

I. 半… II. ①康… ②杨… III. 超晶格半导体-半导体
材料 IV. TN304.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 13581 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 207 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:12.70 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主 任 委 员： 冯汝明

副 主 任 委 员： 金朱德 太史瑞

委 员： 尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长： 刘琯德

前 言

自从人们开始对锗和硅为代表的元素半导体材料研究以来,电子工业中出现了晶体管和集成电路。而以砷化镓为代表的化合物半导体材料及其固溶体的研究带来了半导体激光器和高速场效应晶体管等的问世。这些器件与计算机或者光通信系统联结在一起,给人类的文化和科技的发展带来了巨大的影响,做出了突出的贡献。

从 1970 年 IBM 的江崎等最初提出并试制了 GaAs/GaAlAs 超晶格材料以来,随着超薄膜晶体制备技术的发展,超晶格结构的研究获得了很大的成果。半导体超晶格材料的出现可以说是近 20 年来半导体物理学和材料科学中的一个重大突破。半导体超晶格材料的制造、设计是以固体能带结构的量子力学理论为基础的,也就是说,人为地改变晶体的周期势,做出具有新功能的人工超晶格结构材料。半导体超晶格材料具有一般半导体材料不能实现的许多新现象,可以说是超薄膜晶体制备技术,量子物理和材料设计理论相结合而出现的第三种类的半导体材料。利用这种材料,不仅可以显著提高场效应晶体管和半导体激光器等的性能,也可以制备至今还没有的功能更优异的新器件和发现更多的新物理现象,使半导体器件的设计和制造由原来的“杂质工程”发展到“能带工程”。因此,半导体超晶格是属于高科技范畴的新型功能材料。

编者结合教学和科研工作,编写了这本书。由于编者水平有限,错误在所难免,请广大读者批评指正。

编 者 1992 年 9 月

内 容 简 介

本书较系统地介绍了半导体超晶格材料的性质、制备方法和在器件方面的应用。全书共三篇十四章,第一篇一至五章介绍半导体超晶格材料的电学性质和光学性质及各种类型的半导体超晶格材料。第二篇六至十章介绍半导体超晶格材料的制备和分析方法。第三篇十一至十四章介绍半导体超晶格材料在器件方面的应用。

本书可供从事半导体材料和器件研制、应用的科研人员、工程技术人员参考,也可供大专院校有关专业师生阅读。

ISBN 7-118-01505-9/TN · 244

定 价: 12.70 元

目 录

第一篇 半导体超晶格材料

第一章 超晶格物理基础	1
1.1 超晶格的定义	1
1.2 半导体能带结构的特征及超晶格类型	2
1.3 超晶格的电子状态特征参数	5
1.4 单一势阱中的电子状态	5
1.5 子能带的形成	8
1.6 超晶格中的电子状态	9
1.7 超晶格的光学性质	11
1.8 GaAs/AlGaAs 超晶格的吸收谱	15
1.9 超晶格中的掺杂	16
第二章 超晶格器件的基础	19
2.1 GaAs/AlGaAs 的子能带结构	19
2.2 子能带能谱	22
2.3 GaAs/AlGaAs 的电导	24
第三章 量子霍耳效应	27
3.1 半导体超晶格中的 Shubnikov—de Haas 效应	27
3.2 异质结界面二维电子气的安德森局域化	32
3.3 量子霍耳效应的分析和观察	32
3.4 分数量子霍耳效应	39
第四章 超晶格中的光现象	40
4.1 发光波长与量子阱宽 L_w 的关系	40
4.2 窄发光半宽度	42
4.3 杂质效应和反 Burstein 漂移	43

4.4	室温激子	46
4.5	折射率与超晶格结构关系	49
4.6	单原子层超晶格的光学特性	50
4.7	能带交叉效应	52
第五章 各种类型的半导体超晶格材料		53
5.1	组分超晶格	53
5.2	多维超晶格	58
5.3	应变超晶格	60
5.4	掺杂超晶格	67
5.5	非晶态超晶格	69
5.6	破坏超晶格结构的因素	71

第二篇 半导体超晶格材料制备

第六章 超晶格结构的设计		72
6.1	设计方法	72
6.2	基础理论	74
6.3	固溶体的设计	74
6.4	异质结构的设计	77
6.5	超晶格设计	79
第七章 分子束外延法(MBE)		82
7.1	MBE 装置	84
7.2	MBE 生长	86
7.3	MBE 膜的特性	93
7.4	超晶格的制备	96
第八章 金属有机物化学气相外延生长		100
8.1	MOVPE 法的原理	100
8.2	MOVPE 层的纯度	105
8.3	MOVPE 多层生长	110
8.4	InP 系列超晶格、量子阱结构的生长	114
8.5	MOVPE 最近的进展情况	117
第九章 气体源分子束及其他处延生长技术		118
9.1	利用 V 族气体源的 MBE	118

9.2	MOMBE	122
9.3	气体源掺杂剂	126
9.4	为何使用气体源	127
9.5	原子层外延(ALE)	130
9.6	热壁处延生长(HWE)	135
9.7	其他制备超晶格技术	140
第十章	超晶格结构的观察与评价	142
10.1	反射高能电子衍射(RHEED)	142
10.2	电子显微镜	143
10.3	X 射线衍射	147
10.4	卢瑟福背散射(RBS)	149
10.5	俄歇电子能谱(AES)和二次离子质量分析(SIMS)	152
10.6	X 线光电子谱(XPS)	154

第三篇 半导体超晶格材料的应用

第十一章	超晶格中电子的往返运动	158
11.1	布洛赫振动和电磁场的相互作用	158
11.2	用波束描述布洛赫振动及量子能级	164
11.3	由布洛赫振动引起的负微分迁移率	169
第十二章	超晶格材料在电子器件方面的应用	181
12.1	GaAs 的电子迁移率	181
12.2	调制掺杂 GaAs/N-AlGaAs 单异质结构	181
12.3	高电子迁移率晶体管(HEMT)	190
12.4	超晶格霍耳器件	192
12.5	其他超晶格电子器件	198
第十三章	超晶格材料在光电器件方面的应用	201
13.1	量子阱激光器的能带结构	201
13.2	量子阱激光器结构及其振荡机理	209
13.3	量子阱激光器的特征	214
13.4	量子阱激光器存在的问题	217
13.5	量子阱激光器的展望	222
13.6	其他超晶格光电器件	224

13.7 非晶态超晶格硅太阳电池	227
第十四章 超薄膜及超晶格结构的发展趋势	229
14.1 量子微观异质结构的物理性质及其研究经过	229
14.2 沿异质结构的电导和超高速晶体管的发展动向	231
14.3 量子阱光电器件的研究动向	233
14.4 新材料的量子微观结构及超晶格	236
14.5 超晶格材料的展望	239
参考文献	242

第一篇 半导体超晶格材料

第一章 超晶格物理基础

1.1 超晶格的定义

自从江崎等提出超晶格材料的新功能特征之后,人们利用分子束外延法(Molecular Beam Epitaxy, MBE)制备出了半导体超晶格材料。这种新材料的周期性是可以按人们的要求任意改变的,因此,对其中运动的电子或空穴附加了人为的新周期势,也就是说,电子的波函数本身可被人们所控制,这一点是从来未有过的新特征,从这个意义来说,超晶格材料是新的人工物质。

超晶格材料除了周期性以外,根据量子势能,可以做出近乎理想的二维电子系。这种低维电子系在异质结或 MOS 结构界面中产生新的物理现象。比如,量子霍耳效应,分数量子霍耳效应,二维激子的形成等,开辟了物理学上的新研究方向。另外,还积极进行了超高速器件、高电子迁移率晶体管(HEMT)、半导体量子阱、应变量子阱激光器等超晶格和二维电子系器件的制作和应用的研究。现在超晶格材料的制备技术已达到控制生长层厚度误差在一个原子层以内的高精度水平。从材料的品种来说,除初期研究的 GaAs/AlGaAs 系以外,还对其他 III-V 族、II-VI 族、IV-VI 族以及元素半导体 Si 和 Ge 等的超晶格积极进行研究。

超晶格材料是由两种或两种以上性质不同的薄膜相互交替生长而形成的多层结构的晶体。在这种超晶格材料中,由于人们可以任意改变薄膜的厚度,控制它的周期长度。一般来说,它的周期长

度比各薄膜单晶的晶格常数大几倍或更长,因而取得“超晶格”的名称。

从江崎等提出并制出 GaAs/AlGaAs 系超晶格以来,随着超薄膜制备技术的发展,对超晶格结构的研究获得很大的成绩。超晶格材料具有一般半导体材料不具备的特殊功能。特别是 GaAs/AlGaAs 系超晶格材料,由于它们的单晶生长、物理性质控制等比较容易,两者的晶格常数相差不大,材料性质比较相近等原因,对这种超晶格结构进行了大量的研究,在基础理论和实验上以及在器件应用方面等都取得了很多成果。

近年来,对晶格常数相差较大的材料,利用应变性质的应变超晶格的研究也取得很大的发展。

1.2 半导体能带结构的特征及超晶格类型

图 1—1 为直接跃迁型半导体材料 GaAs 的能带结构。图中 ϕ 表示电子亲和势, E_g 表示禁带宽度, E_v 表示价带顶、 E_c 表示导带底, E_0 表示真空能级, k 表示波矢, $E(k)$ 表示电子的能量。

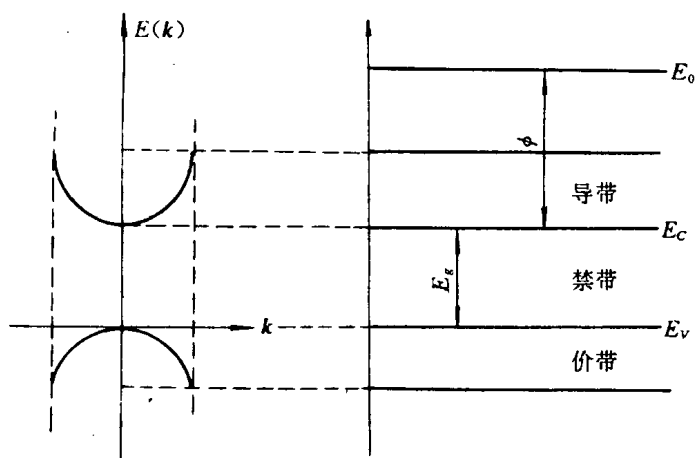


图 1—1 GaAs 的能带结构

1. 组分超晶格

如图 1—2 所示,如果两种不同种类的半导体薄膜相互交替生长而形成超晶格时,一般来说,它们的电子亲和势和禁带宽度都不同。如果超晶格材料中的一个重复单元是由不同材料的薄膜所构成,则被称为组分超晶格。

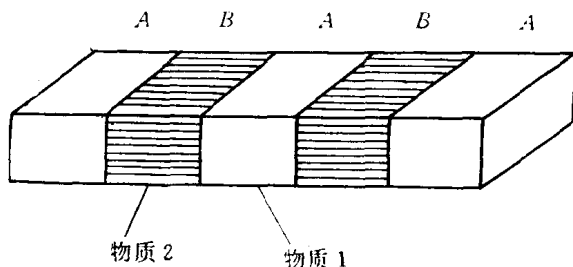


图 1—2 组分超晶格示意图

在组分超晶格中,由于构成超晶格的材料具有不同的禁带宽度,在异质界面处将发生能带的不连续。由不同材料电子亲和势的差可直接确定导带不连续的能量值。然后再考虑禁带宽度,就可以很方便地定出价带的不连续值。根据这些不连续的特点,可将组分超晶格分为若干类型。例如,电子亲和势为 ϕ_A 、 ϕ_B , 禁带宽度为 E_g^A 、 E_g^B 的两种半导体 A 和 B 形成组分超晶格时,如果满足 $\phi_A > \phi_B$, $\phi_A + E_g^A < \phi_B + E_g^B$ 的条件时,它们的能带结构如图 1—3(a) 所示。GaAs 和 AlAs 或者 GaAs 和 AlGaAs 形成的组分超晶格就属于这种类型的能带结构。具有这种能带结构的组分超晶格称为第 I 类型超晶格。

图 1—3(b) 所示的超晶格的能带结构与第 I 类型的不同。它是一种半导体的导带和另一种半导体的价带相重叠。具有这种能带结构的超晶格称为第 II 类型组分超晶格,由 InAs 和 GaSb 形成的超晶格属于这种能带结构。

在第 I 类型超晶格中,两种半导体的导带之间,或价带之间的相互作用是重要的。但是对第 II 类型超晶格来说,两种半导体的导带和价带之间的相互作用是本质的。可以预想到,在第 I 类型和第

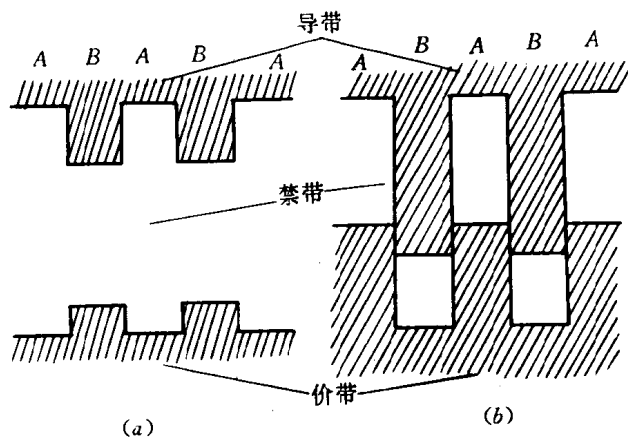


图 1—3 组分超晶格能带结构

(a)第Ⅰ类组分超晶格;(b)第Ⅱ类组分超晶格。

Ⅰ类型超晶格中,它们的电子状态有很大的差别。比如,第Ⅰ类型超晶格为半导体,但第Ⅱ类型中就有从半导体向半金属转移现象。

除了上述两种类型的组分超晶格之外,还有 HgTe/CdTe 结构的第Ⅲ类型超晶格和多元型结构的超晶格(重复单元是由三种以上的半导体材料构成)。

2. 掺杂超晶格

在同一半导体材料中,用交替改变掺杂类型的方法构成的半

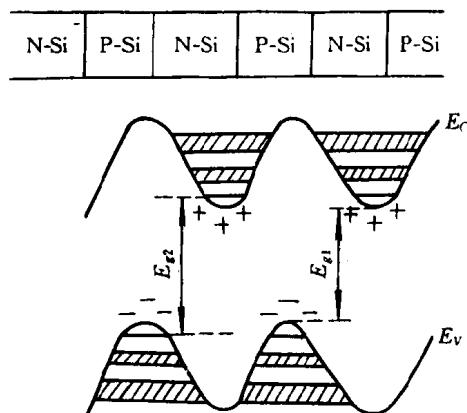


图 1—4 掺杂超晶格半导体能带结构

导体超晶格称为掺杂超晶格。图 1—4 示出掺杂超晶格的能带结构。关于各种类型超晶格的详细内容还将在第五章介绍。

1.3 超晶格的电子状态特征参数

如图 1—3(a)及(b)所示,超晶格系中的导带电子和价带空穴的势能可近似地表示为势阱。以第 I 类型组分超晶格(图 1—3(a))为例,导带底能量较低(价带顶能量较高)的半导体成为势阱,较高(价带顶能量较低)的半导体变为势垒。势垒的高度相当于两种半导体异质界面中导带、价带不连续的大小 ΔE_C 和 ΔE_V 。大体上说来, ΔE_C 可认为是两种半导体电子亲和势之差的近似值。另外,决定势阱形状的参数有势阱宽 L_W 和势垒宽 L_B 。因此,如图 1—5 所示,由这种势阱决定的超晶格电子状态依赖于 4 个参数 L_W 、 L_B 、 ΔE_C 、 ΔE_V 。

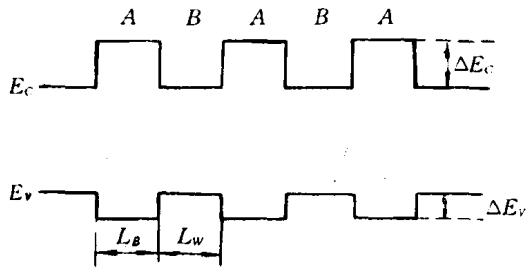


图 1—5 超晶格结构能带不连续 ΔE_C 、 ΔE_V 及势阱宽 L_W 、势垒宽 L_B

1.4 单一势阱中的电子状态

首先考虑 L_B 为无限大的情况,即阱宽为 L_W 、高 V_0 ($V_0 = \Delta E_C$, 或 $V_0 = \Delta E_V$) 的单一势阱中的电子状态。如图 1—6 所示,势阱中的电子,在与势阱垂直的 xy 面内是和自由电子一样。但是沿势阱的 z 方向,则由于势垒 V_0 的存在电子被束缚在势阱附近,而其波函