

电子工业 生产技术手册

半导体与集成电路卷

半导体材料

6

内 容 简 介

本书是《电子工业生产技术手册》第6分册,即半导体与集成电路卷的第1篇。书中主要介绍各种半导体材料制备工艺,同时包括晶片加工工艺、材料特征参数的测试和分析,材料的物理和化学性质等。本书特点是工艺性强,富集和精选了工艺中常用的数据、图表和基本公式。

本书是从事半导体材料制备和研究的工程技术人员、管理人员和工人的常用工具书,也可供高等院校有关专业的师生参考。

电子工业生产技术手册

(6)

半导体与集成电路卷

《电子工业生产技术手册》编委会 编

国防工业出版社出版发行

新华书店经售

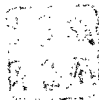
北京市卫版排印厂排印 国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张44 $\frac{1}{2}$ 插页2 1031千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷 印数:0,001—5,000册

ISBN7-118-00214-2/TN·39 定价:21.20元

科技新书目182-025



出版说明

《电子工业生产技术手册》(以下简称《手册》)是由电子工业部和中国电子学会联合组织编写的一部大型综合性工具书。全书共约一千五百万字,分成五卷:

1. 电子元件卷(1~3分册);
2. 电真空器件卷(4~5分册);
3. 半导体与集成电路卷(6~8分册);
4. 通用工艺卷(9~14分册);
5. 生产质量技术保证卷(15~17分册)。

《手册》主要是供具有中专以上水平的电子工业工程技术人员、高级技术工人及生产技术管理干部查阅使用,也可作为高等院校和中等专业学校电子类专业的教学参考书。

《手册》是在总结我国电子工业三十多年来生产技术实践经验的基础上,适当参阅了国外有关技术资料中对我国适用的电子生产技术编写而成的。对于一些即将淘汰而不宜继续采用的现行生产技术,一般不予编入;对那些国内外新近出现的,虽尚未经实践反复验证,但具有方向性的新技术,则在有关篇的“今后展望”中予以介绍。

《手册》力求突出电子工业生产技术的特点,原则上不编入与其他手册相重复的内容。但是,鉴于现代电子工业属高技术密集型工业,涉及的技术门类多,除与电子、机械、化工、冶金等基础科学有密切关系外,还涉及许多边缘科学。为便于查阅,也适当地收集了一些散见于其他手册中的共性资料。

在《手册》的编写过程中,结合我国电子工业的实际情况,认真贯彻了1984年国务院颁发的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》和《全面推行我国法定计量单位的意见》。

由于电子产品发展很快,更新换代频繁,各种生产技术进步迅速,第一次编写生产技术性的手册缺少经验,初版会有许多不足之处。为了使《手册》在我国电子工业的发展中能够不断地起到促进和指导作用,希望读者在使用《手册》过程中,如发现谬误或对《手册》的内容有新的建议,请及时与《手册》总编辑部(山西省太原市第115信箱)联系。今后将根据各篇的技术发展情况,及时修订或出版续篇。在适当时间,将全部重新编写出版。

《手册》的编写和出版工作,得到了中央各有关部、委、各省(市)电子工业领导部门及有关厂、所、院、校的大力支持。参加编写、审核和讨论的各方面的专家、教授、科技人员近千人。谨向这些单位与有关人员致以谢意。

《手册》总编辑委员会

一九八六年八月二十五日

总 编 辑 委 员 会

主 任 委 员

孙俊人

副主任委员

(按姓氏笔划为序)

边拱 陆崇真 周文盛 童志鹏 谢高觉 蒋葆增

委 员

(按姓氏笔划为序)

厉声树 刘联宝 陈力为 陈克恭 张立鼎
杨臣华 沈金宝 武尔楨 周生珣 林金庭
郭文昭 郭桂庭 袁行健 戴昌鼎

总 编 辑 部

主 任

孙 凤 阁

成 员

(按姓氏笔划为序)

李桂馨 赵全喜 虞苏玮

前 言

半导体与集成电路卷是电子工业生产技术的第三卷,这一卷又分为《半导体材料》、《硅器件与集成电路》、《化合物半导体器件》三篇(第6~8分册)。

半导体器件与集成电路在现代电子工业中占有极其重要的地位,一个国家的电子工业是否先进,在一定意义上决定于其半导体与集成电路工业是否先进,发达国家竞相建设“硅谷”就在于此。

半导体器件与集成电路工业依赖于材料制备、先进的设计、现代化的装备和精细的加工工艺。进入八十年代初,集成电路已向超大规模、集成系统、多层集成和砷化镓集成电路发展;硅集成电路生产工艺的特点是晶片尺寸大($\phi 150\sim 200\text{mm}$)、光刻线条细($1\mu\text{m}$ 左右)、采用干法工艺和计算机辅助生产。先进的生产技术使得集成电路价格越来越低,整机性能越来越高,电子产品更新换代越来越快。所以生产工艺技术是进行半导体和集成电路大生产的基础,世界性的攀比竞争的焦点也在于此。

半导体与集成电路这一卷汇集了通用生产技术和工艺数据,其目的是促进我国半导体和集成电路工艺技术的提高。由于富集了大量常用的数据和资料,我们希望从事半导体生产、教学和研究的工程师、科学家、教师、管理干部和具有中专以上文化水平的人员从中能得到裨益。

《半导体材料》为本卷的第1篇,共分12章,主要介绍硅和砷化镓半导体材料的制备工艺,参数测试,完整性分析及质量控制等。同时对其它常用Ⅲ-V和Ⅱ-V族半导体也进行了一定的论述。随着化合物半导体器件的发展,砷化镓等化合物材料的制备工艺也会有很大的发展。

《硅器件与集成电路》为第2篇,共20章,重点介绍硅集成电路工艺,特别是MOS和双极型集成电路的通用工艺,包括计算机辅助制版、氧化、扩散、CVD、离子注入、光刻、隔离技术、芯片分析、封装和可靠性等等。这些工艺技术对分立器件同样是适用的。虽然硅工艺已很成熟,但由于硅集成电路正向微米以下工艺和多层集成发展,就要求不断地采用新工艺。

《化合物半导体器件》为第3篇,共分16章,以GaAs半导体器件工艺为主,着重汇集了微波和光电器件方面的工艺方法和有关数据。本篇着重于Ⅲ-V族材料外延、亚微米光刻、离子注入、介质膜生长、有代表性的微波器件和光电器件的典型工艺,以及可靠性等。由于Ⅲ-V族半导体器件,尤其是GaAs集成电路,正处于重要发展阶段,所以这方面的资料和数据介绍得比较多。

参加本卷编审的研究所、高等学校和工厂近30家,共180多名科学家和工程师。其中无锡微电子研究中心(含永川微电子研究所),天津电子材料研究所、河北半导体研究所、南京固体器件研究所(现南京电子器件研究所)、中国科学院上海冶金研究所、永川光电技术研究所、骊山微电子有限公司、辽宁集成电路研究所、北京东光电工厂、北京电子管厂、江南无线电器材厂、南京半导体器件总厂、上海无线电五厂和十九厂、北京半导体器件研究所、北京无线电二厂、清华大学、北京大学、复旦大学、天津大学、成都电

讯工程学院、西安交通大学、南京工学院等单位承担了主要的编写和审校工作，中国电子器件工业总公司和许多单位领导给予了重要的支持，本卷编委会致以衷心的感谢！

半导体和集成电路的生产工艺的发展日新月异，由于编写水平所限，《手册》中错误和不足之处，欢迎读者给予批评指正。

半导体与集成电路

编辑委员会

卷 编 辑 委 员 会

主 任 委 员

武 尔 楨 林 金 庭

副主任委员

(按姓氏笔划为序)

邓先灿 车运洪 许居衍 宋秉治 俞忠钰

委 员

(按姓氏笔划为序)

王宗绪	庄同曾	许 康	刘清太	陈中佛
吴远庆	李克诚	李集生	江炳南	郑崇伟
张仁君	郭同生	郭维廉	黄汉祥	常振华
		蒋伏君		

卷 编 辑 部

主 任

王 英

副 主 任

徐 稼 迟

成 员

(按姓氏笔划为序)

王宗绪 宋马成 陈中佛 沈能珏

学术秘书：徐稼迟 王 英

责 任 编 辑

王晓光

目 录

第 1 篇

第 1 章 半导体材料的物理和化学性质

1.1 晶格结构	3
1.1.1 晶格结构的周期性、晶胞	3
1.1.2 晶列、晶面和密勒指数	3
1.1.3 密排数、配位数	4
1.1.4 主要半导体的晶格结构	7
1.1.5 晶格常数	10
1.2 能带和能级	12
1.2.1 布洛赫定理和布里渊区	12
1.2.2 主要半导体的能带结构	13
1.2.3 能带边及其参数	25
1.2.4 半导体中的杂质能级	30
1.3 物理性质和常数	35
1.3.1 半导体的物理性质与键特征的关系	35
1.3.2 半导体材料的机械和热学性质	36
1.3.3 半导体材料的电学性质	42
1.3.4 半导体的光学常数	47
1.4 键化特征	52
1.4.1 杂质分凝效应	52
1.4.2 相平衡和相图	57
1.4.3 半导体材料的热力学数据	65
1.5 材料的化学性质	71
1.5.1 硅的主要化学性质	71
1.5.2 锗的主要化学性质	72
1.5.3 碳化硅的主要化学性质	72
1.5.4 磷化砷的主要化学性质	73
1.5.5 磷化铟的主要化学性质	73
参考文献	73

第 2 章 元素半导体材料的制备

2.1 多晶硅制备工艺	76
2.1.1 工艺流程	76
2.1.2 工业硅的制备	76
2.1.3 SiHCl_3 的合成	77
2.1.4 SiHCl_3 的提纯	79
2.1.5 SiHCl_3 氢还原	80

2.2 直拉法制备硅单晶工艺

2.2.1 结晶原理	82
2.2.2 拉晶设备(单晶炉)	84
2.2.3 原料材料	87
2.2.4 热场(或温场)	90
2.2.5 拉晶工艺	90
2.2.6 质量控制	109
2.3 悬浮区熔法制备硅单晶工艺	111
2.3.1 区熔原理	111
2.3.2 区熔设备	113
2.3.3 区熔工艺	116
2.3.4 质量控制	119
2.3.5 悬浮区熔法的其他形态和应用	120
2.4 掺杂工艺	122
2.4.1 掺杂原理	122
2.4.2 直拉硅单晶的掺杂方法	122
2.4.3 区熔硅单晶的掺杂方法	128
2.4.4 铸单晶的掺杂计算	132
2.5 非晶硅制备工艺	133
2.5.1 基本特征	133
2.5.2 生长原理	134
2.5.3 非晶硅薄膜的制备方法	136
2.5.4 非晶硅掺杂及pn结制备工艺	144
2.5.5 微晶硅薄膜	146
2.6 锗和砷	150
2.6.1 锗	150
2.6.2 砷	154
参考资料	155

第 3 章 硅片加工工艺

3.1 晶体热处理	159
3.1.1 作用	159
3.1.2 条件	159
3.2 晶锭加工	160
3.2.1 晶锭截断	160
3.2.2 晶锭研磨	160

3.3 定向切割	163
3.3.1 原理	163
3.3.2 设备	163
3.3.3 刀片	165
3.3.4 粘结剂	166
3.3.5 冷却液	167
3.3.6 切割过程	167
3.3.7 质量控制	167
3.3.8 锗和化合物半导体材料的切割	168
3.4 硅片研磨	168
3.4.1 表面研磨	168
3.4.2 边缘研磨	171
3.4.3 化学减薄	172
3.5 硅片抛光	172
3.5.1 作用	172
3.5.2 抛光种类	173
3.5.3 二氧化硅抛光原理	173
3.5.4 设备	174
3.5.5 材料	174
3.5.6 抛光工艺过程	178
3.5.7 质量控制	179
3.5.8 化合物半导体晶片的抛光工艺	179
3.6 抛光硅片的清洗和超净包装	181
3.6.1 沾污的来源和种类	181
3.6.2 清洗剂	181
3.6.3 清洗条件	182
3.6.4 清洗程序	182
3.6.5 表面质量检测	184
3.6.6 超净包装	184
参考资料	184
第4章 硅外延工艺	
4.1 外延工艺分类	185
4.1.1 按结构分类	185
4.1.2 按外延层厚度和电阻率分类	185
4.1.3 按生长方法分类	186
4.2 气相外延	186
4.2.1 基本原理	186
4.2.2 外延生长	194
4.2.3 与质量有关的因素	199
4.2.4 工艺改进	204
4.2.5 几种特殊外延层生长工艺	206
4.3 其它硅外延工艺	208

4.3.1 SOS外延	208
4.3.2 液相外延	211
4.3.3 固相外延	214
4.4 对外延片的质量要求和测量	217
4.4.1 对外延片的质量要求	217
4.4.2 外延层测量	218
参考资料	219

第5章 化合物半导体单晶制备

5.1 GaAs 水平单晶制备工艺	220
5.1.1 水平法单晶生长工艺	220
5.1.2 掺杂无位错单晶生长	223
5.1.3 半绝缘GaAs 单晶生长	225
5.2 GaAs直拉单晶制备工艺	226
5.2.1 低压合成的LEC法(LP-LEC法)	227
5.2.2 高压原位合成的液封直拉法(HP-LEC法)	229
5.2.3 低阻GaAs单晶制备	230
5.2.4 半绝缘GaAs单晶制备和质量检测	230
5.2.5 影响单晶质量的因素及其控制	232
5.2.6 制备GaAs单晶的各种方法的比较	234
5.3 GaP和InP单晶制备工艺	235
5.3.1 GaP单晶制备	235
5.3.2 InP 单晶制备	237
5.4 其它Ⅲ-V族化合物半导体制备工艺	243
5.4.1 GaSb单晶制备工艺	243
5.4.2 InSb 单晶制备工艺	247
5.4.3 InAs单晶制备工艺	250
5.4.4 Ga _{1-x} In _x As单晶制备工艺	253
5.4.5 四元合金的制备	255
5.5 Ⅱ-V族化合物单晶制备工艺	257
5.5.1 Hg _{1-x} Cd _x Te 单晶制备	257
5.5.2 其它Ⅱ-V族化合物半导体单晶的制备	265
5.6 Ⅳ-V族化合物单晶制备工艺	267
5.6.1 铅-硫族化合物的制备	267

5.6.2	IV-V族三元系晶体的制备	267
5.7	化合物单晶质量要求	276
5.7.1	GaAs单晶质量要求	276
5.7.2	InP单晶质量要求	280
5.7.3	GaP单晶质量要求	280
5.7.4	CdTe单晶质量要求	281
5.7.5	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 晶体质量要求	281
5.7.6	$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 晶体质量要求	281
	参考资料	283

第6章 化合物半导体外延

6.1	II-V族化合物气相外延	284
6.1.1	工艺基本原理	284
6.1.2	外延装置与系统	287
6.1.3	外延工艺	289
6.1.4	GaAs外延	296
6.1.5	InP外延	298
6.1.6	多元II-V族化合物外延	299
6.2	II-V族化合物液相外延	300
6.2.1	工艺基本原理	300
6.2.2	外延装置与系统	306
6.2.3	外延工艺	308
6.2.4	GaAs、InP外延	314
6.2.5	多元化合物 GaAlAs、GaInAs、Ga-InAsP 外延生长	316
6.3	金属有机化学气相沉积法	324
6.3.1	工艺基本原理	325
6.3.2	外延装置与系统	326
6.3.3	外延工艺	328
6.3.4	GaAs及有关化合物外延	329
6.3.5	InP及有关化合物外延	334
6.3.6	工艺中的注意事项	338
6.4	分子束外延	338
6.4.1	工艺基本原理	339
6.4.2	外延装置与系统	340
6.4.3	外延工艺	344
6.4.4	GaAs外延	348
6.4.5	多元II-V族化合物异质结外延	349
6.4.6	选择分子束外延	356
6.5	II-V族化合物HgCdTe外延	357
6.5.1	HgCdTe外延方法	357

6.5.2	衬底的选择与制备	358
6.5.3	HgCdTe气相外延生长	359
6.5.4	滑块式液相外延	362
6.5.5	分子束外延(MBE)	365
6.6	IV-V族化合物PbSnTe外延	366
6.6.1	开管气相外延	366
6.6.2	液相外延	367
6.7	化合物外延质量要求	369
6.7.1	微波器件用GaAs外延片	370
6.7.2	光电器件用GaAs、GaP外延片	371

参考资料

		373
--	--	-----

第7章 缺陷与杂质

7.1	基本缺陷	375
7.1.1	点缺陷	375
7.1.2	线缺陷——位错	383
7.1.3	面缺陷	387
7.1.4	体缺陷	381
7.2	微缺陷	392
7.2.1	生长微缺陷	392
7.2.2	热浸生微缺陷	398
7.2.3	雾缺陷	402
7.3	辐射损伤缺陷	403
7.3.1	辐射损伤	404
7.3.2	电子辐照	405
7.3.3	离子辐照损伤	408
7.3.4	中子辐照损伤	406
7.4	硅中的杂质	406
7.4.1	硅中的氧	406
7.4.2	硅中的碳	413
7.4.3	硅中的氮	415
7.4.4	硅中的金属杂质	416
7.5	化合物半导体中杂质	417
7.5.1	砷化镓中的杂质	417
7.5.2	磷化镓中的杂质	419
7.5.3	磷化铟中的杂质	419
7.5.4	其他化合物中的杂质	420
7.6	缺陷、杂质的影响、控制和利用	420

7.6.1 缺陷、杂质的影响	420
7.6.2 缺陷的控制和利用	422
参考资料	427

第8章 半导体电学参数测量

8.1 导电型号	429
8.1.1 热探针法	429
8.1.2 冷探针法	430
8.1.3 整流法	431
8.1.4 霍尔效应法	432
8.2 电阻率	433
8.2.1 两探针法	433
8.2.2 四探针法	435
8.2.3 扩展电阻法	438
8.2.4 范德堡法	444
8.2.5 涡流法	448
8.2.6 光电压法	449
8.3 载流子浓度	451
8.3.1 三探针击穿电压法	452
8.3.2 微分电容法	454
8.3.3 二次谐波法	456
8.3.4 红外等离子反射光谱法	467
8.3.5 红外吸收法	459
8.4 迁移率	460
8.4.1 漂移迁移率测量	461
8.4.2 电导迁移率	464
8.4.3 霍尔迁移率	464
8.4.4 磁阻迁移率	469
8.5 补偿度	471
8.5.1 载流子浓度与温度关系分析法	472
8.5.2 迁移率分析法	476
8.5.3 经验曲线	478
8.6 载流子寿命	480
8.6.1 直流光电导衰退法	481
8.6.2 高频光电导衰退法	483
8.6.3 微波光电导衰退法	484
8.6.4 表面光电压法	484
8.6.5 光电流法	487
8.6.6 电子束感生电流法	488
8.6.7 MOS电容法(测量硅的产生寿命和表面产生速度)	490
8.7 禁带宽度	493
8.7.1 霍尔效应或电阻率法	493

8.7.2 吸收光谱法	494
8.7.3 光声光谱法	495
8.7.4 表面光电压谱法	496
8.8 能级参数	496
8.8.1 光吸收法	497
8.8.2 深能级瞬态谱(DLTS)法	498
8.8.3 光电容法	503
8.8.4 光电流瞬态谱(PITS)法	506
8.8.5 定值杂质光电导法	508
8.8.6 光致发光法	510
8.9 附录	522
参考资料	522

第9章 半导体材料晶向、晶体缺陷、光学常数和几何尺寸的测量

9.1 晶向的测定	525
9.1.1 光图法	525
9.1.2 单色X射线法	527
9.1.3 解理法	528
9.1.4 从晶体外形和腐蚀坑判明晶向	528
9.2 光学常数的测定	530
9.2.1 测量原理	530
9.2.2 测量仪器	532
9.2.3 样品制备	532
9.2.4 测量步骤	533
9.2.5 傅里叶红外光谱仪测定透射率和反射率	537
9.3 腐蚀金相法观测晶体中的缺陷	539
9.3.1 测量原理	539
9.3.2 测量仪器	540
9.3.3 样品制备	540
9.3.4 缺陷观测	544
9.4 厚度测量	544
9.4.1 晶片厚度测定	544
9.4.2 外延层厚度的测量	546
9.5 电容微感法测量晶片的翘曲度	548
9.5.1 测量原理	548
9.5.2 测量仪器	549
9.5.3 样品制备	549

9.5.4	测量步骤	549
9.6	光干涉法测量晶片的平整度	549
9.6.1	测量原理	549
9.6.2	测量仪器	550
9.6.3	样品制备	550
9.6.4	测量步骤	550
9.7	硅片初磨损伤层的测定	551
9.7.1	测量原理	551
9.7.2	测量装置和步骤	552
9.7.3	计算	552
9.8	抛光硅片边缘轮廓的测量	553
9.8.1	测量原理	553
9.8.2	测量装置	553
9.8.3	样品制备	554
9.8.4	测量步骤	554
9.9	附录 晶体缺陷图	554
	参考资料	558

第10章 结构及表面分析

10.1	概述	559
10.2	X射线衍射分析法	560
10.2.1	衬度形成原理简述	560
10.2.2	实验技术	560
10.2.3	在半导体材料分析中的应用	570
10.3	扫描电子显微分析法	576
10.3.1	结构及原理简述	576
10.3.2	二次电子像及其应用	577
10.3.3	背散射电子像及其应用	578
10.3.4	电子束感生电势像及其应用	579
10.3.5	阴极发光及其应用	580
10.3.6	特征X射线及其应用	581
10.3.7	电子通道花样及其应用	584
10.4	透射电子显微分析法	585
10.4.1	原理简述	585
10.4.2	分析技术	586
10.4.3	在半导体缺陷分析中的应用	592
10.5	红外显微技术	599
10.5.1	红外显微镜的原理和结构	599
10.5.2	半导体材料的光谱特性及有效工作谱带	600
10.5.3	红外显微技术的应用	601
10.6	微分干涉衬度(N-DIC)显	
	微术	602
10.6.1	N-DIC法原理	602
10.6.2	N-DIC法在半导体缺陷观测中的应用	605
10.7	光电子能谱分析法	608
10.7.1	原理简述	608
10.7.2	分析技术	609
10.7.3	光电子能谱分析在半导体材料中的应用	611
10.8	奥格能谱(AES)分析法	619
10.8.1	奥格能谱简述	619
10.8.2	分析技术	621
10.8.3	奥格能谱分析在半导体材料中的应用	623
	参考资料	625
	第11章 半导体材料的成份分析	
11.1	主要分析方法及其比较	626
11.2	发射光谱分析法(AES)	626
11.2.1	原理和仪器	626
11.2.2	方法与条件	628
11.2.3	硅及其化合物的分析	630
11.2.4	砷化镓及其原材料的分析	632
11.2.5	磷化镓及其原材料的分析	634
11.2.6	其它半导体原材料的分析	635
11.3	红外吸收光谱分析(IR)	636
11.3.1	原理和仪器	636
11.3.2	红外吸收法测定硅中氧的含量	638
11.3.3	红外吸收法测定硅中碳的含量	641
11.3.4	低温红外吸收法测定硅中硼磷含量	642
11.4	原子吸收光谱分析(AAS)	643
11.4.1	原理和仪器	643
11.4.2	测定条件及检测限	644
11.4.3	干扰及其消除	645
11.4.4	应用	646
11.5	光致发光分析(PL)	648
11.5.1	原理	648
11.5.2	测量装置	648
11.5.3	分析方法	649
11.5.4	应用	649
11.6	火花质谱分析(SSMS)	651

11.6.1	原理和仪器	651	11.10.2	常用试剂的纯化方法	673
11.6.2	质谱线的种类和识别方法	652	11.10.3	气体纯化方法	674
11.6.3	半定量分析方法	653	附表11-1	化学元素的天然同位素的原子 量 and 丰度	675
11.6.4	定量分析方法	653	附表11-2	中子活化分析法的检测限和使用 的基本数据	678
11.6.5	应用	654	参考资料		681
11.7	二次离子质谱分析(SIMS)	655	第12章	半导体材料工艺的发展趋势	
11.7.1	原理和仪器	655	12.1	硅材料	682
11.7.2	分析方法	658	12.1.1	直拉硅生长新工艺	683
11.7.3	应用	660	12.1.2	区熔硅研究新工艺	684
11.8	X射线荧光光谱分析 (XRF)	662	12.1.3	硅外延材料动向	684
11.8.1	原理和仪器	662	12.1.4	硅材料的物性研究	685
11.8.2	分析方法	663	12.2	Ⅱ-V族化合物材料	687
11.8.3	应用	664	12.2.1	Ⅱ-V族化合物体材料研究	687
11.9	活化分析(AA)	665	12.2.2	Ⅱ-V族化合物外延材料研究	690
11.9.1	原理和特点	665	12.3	Ⅱ-V及Ⅲ-V族等化合物 材料	694
11.9.2	中子活化分析法(简称NAA)	666	12.4	非晶态半导体	694
11.9.3	带电粒子活化分析法	669	12.5	有机半导体	695
11.9.4	γ射线照射活化分析法	672	12.6	材料评价技术	695
11.10	半导体材料分析中主要 试剂的纯化	673	参考资料		696
11.10.1	超纯水的制取	673			

半 导 体 材 料

主 编

郭同生

副主编 沈能珏 杨模诗 徐稼迟

主 审

宋秉治

副主审 韩继鸿 彭瑞伍 华庆恒 李集生 李中南

第1章 半导体材料的物理和化学性质

薛蔚时

1.1 晶格结构

1.1.1 晶格结构的周期性、晶胞

晶体可以看成由一个基本的结构单元（简称基元），沿三个不同方向，各按一定的距离周期地重复堆积而成。这种基元可以是一个原子或一个原子集团。为讨论它的周期性，每个基元都用一个点子来表示，这些点子所构成的格子称为布喇菲格子。

基元的内部结构可以用单胞来表示。单胞是以格点为顶点，以三个独立方向上的周期为边长所构成的平行六面体。体积最小的单胞称为原胞。一个原胞中只含有一个布喇菲格点。单胞的边长称为基矢量，原胞的边长称为原基矢量。

三维晶体中一共有十四种布喇菲格子，它们分属于七大晶系。图1-1中画出了这十四

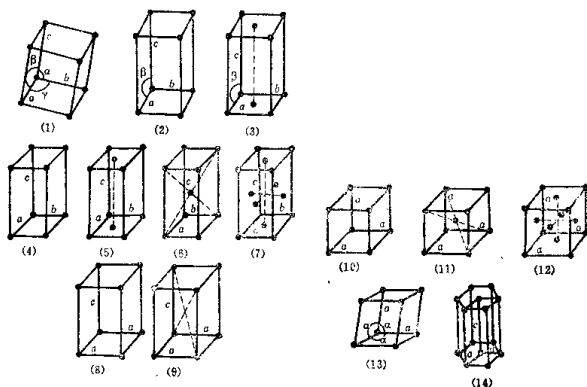


图1-1 十四种布喇菲格子

- (1)简单三斜；(2)简单单斜；(3)底心单斜；(4)简单正交；(5)底心正交；(6)体心正交；(7)面心正交；
(8)简单立方；(9)体心立方；(10)面心立方；(11)体心立方；(12)面心立方；(13)三角；(14)六角。

种布喇菲格子，它们的单胞基矢量和对称性列于表1-1中。

1.1.2 晶列、晶面和密勒指数

晶列的方向常用 $[l, m, n]$ 来表示。 l 、 m 和 n 为三个互质的整数，它表示晶格矢

表1-1 十四种布喇菲格子和惯用单胞

晶系	布喇菲格子	单胞基矢量	高指明的基矢量 长度和夹角	点群对称性
三斜晶系	简单三斜	$a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	a, b, c , α, β, γ	C_1
单斜晶系	简单单斜 底心单斜	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	a, b, c β	C_{2h}
正交晶系	简单正交 底心正交 体心正交 面心正交	$a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a, b, c	D_{2h}
正方晶系(四角)	简单正方 体心正方	$a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a, c	D_{4h}
立方晶系	简单立方 体心立方 面心立方	$a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a	O_h
三角晶系	三角	$a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$	a a	D_{3d}
六角晶系	六角	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	a, c	D_{6h}

($a+mb+nc$ 所指的方向, a, b 和 c 是单胞的基矢量。

晶面的方向常用(l, m, n)来表示, l, m 和 n 为三个互质的整数, 它表示晶面在三个坐标轴上的截距为 $a/l, b/m$ 和 c/n 。 (l, m, n) 为晶面族的面指数, 通常也称为密勒指数。

彼此对称的晶列族是等效的。对于立方晶体的布喇菲格子, 如晶列族 $[1\ 0\ 0]$ 、 $[0\ 1\ 0]$ 、 $[0\ 0\ 1]$ 就是彼此等效的。它们的集合用尖括号表示为 $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ 。彼此对称的晶面族是等效的。对于立方晶系的布喇菲格子, 如晶面族 $(1\ 1\ 1)$ 、 $(\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1})$ 、 $(1\ 1\ \bar{1})$ 、 $(\bar{1}\ \bar{1}\ 1)$ 就是等效的。它们的集合用大括号表示为 $\{1\ 1\ 1\}$ 。

对立方晶系来说, 如果晶列同晶面的指数相同, 则两者必定是垂直的。

如果一个晶面和晶列 $[u\ v\ w]$ 平行, 则称该平面属于晶轴 $[u\ v\ w]$ 。此时晶面指数 h, k, l 满足条件

$$hu + kv + lw = 0 \quad (1-1)$$

不同晶系的晶面夹角公式列于表1-2中, 表1-3中给出了计算平行晶面间的面间距的公式。表1-4中列出了立方晶系低指数晶面 $\{HKL\}$ 和 $\{hkl\}$ 之间的夹角。对于非立方晶系, 这些夹角值与单胞尺寸有关, 可用表1-2所列公式进行计算。

1.1.3 密堆积、配位数

当晶体由同一种原子构成时, 可以用大小相同的圆球代表原子, 把这些原子堆积起来模拟晶格结构。这样形成的最密集的堆积称为密堆积。

在晶格中, 一个原子周围的最近邻原子数称为配位数。配位数越大, 表示原子排列得越紧密。晶体中的最大配位数是12, 具有这种配位数的晶体有六角密积和立方密积两