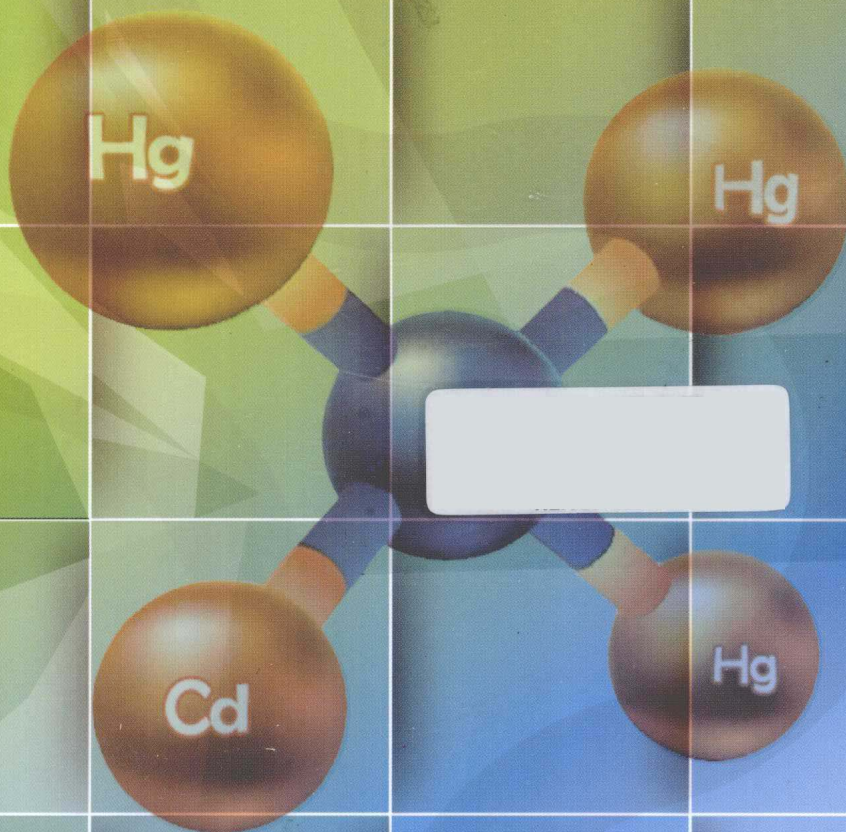




Physics and Technology
of HgCdTe Materials

碲镉汞材料物理与技术

杨建荣 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

碲镉汞材料物理与技术 / 杨建荣著. —北京:国防工业出版社, 2012. 11

ISBN 978 - 7 - 118 - 08431 - 3

I. ①碲... II. ①杨... III. ①碲化镉 - II-VI族化合物半导体 - 半导体物理②碲化镉 - II-VI族化合物半导体 - 半导体技术 IV. ①TN304. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 262273 号

※

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 30½ 字数 695 千字

2012 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 150.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

碲镉汞材料物理与技术的发展已经历了 50 多年的历史,从 20 世纪 50 年代 Lawson 等人发明碲镉汞体材料开始,发展到 80 年代的外延材料,2000 年以后碲镉汞材料继续朝着以超大面积、多层异质外延、新型掺杂技术和低缺陷密度为目标的方向发展。与此同时,碲镉汞红外探测器也从第一代红外探测器(单元或多元光导器件)发展到第二代红外焦平面器件,并继续朝着以超大规模、多色、甚长波、弱信号、高工作温度和智能化为特征的第三代红外焦平面器件技术的方向发展。目前,碲镉汞材料与器件的物理研究在学科的发展上依然充满朝气,在技术和产品的工程化应用上依然保持着不断创新和快速发展的趋势。

2009 年的 SPIE (Vol. 7298) 国际会议专门就碲镉汞材料和器件 50 年的历史和成就进行了回顾,并对未来的发展进行了展望。目前,CdZnTe 基的碲镉汞外延材料最大已做到 $80\text{mm} \times 80\text{mm}$, Si 基碲镉汞外延材料的尺寸则做到了 6 英寸,单层或双层碲镉汞外延材料已实现批量生产,异质衬底外延和多层掺杂组分异质结构外延技术也已获得突破。在此基础上,第二代碲镉汞红外焦平面器件实现了批量生产和应用。单色的中短波红外焦平面器件的最大规模做到了 $4\text{K} \times 4\text{K}$;探测波段在短波方向拓展到了可见光,而在长波波段已接近 $18\mu\text{m}$;双色碲镉汞红外焦平面器件也已达到批量生产的水平,新型的雪崩型红外焦平面(APD)和高温工作的红外焦平面器件(HOT)近年来也取得了重大的突破。碲镉汞红外焦平面探测器技术的发展也已使得红外系统技术在尺寸、重量以及性能、功耗和价格(即所谓的 SWaP³)等方面实现了跨代发展。但与此同时,我们也看到碲镉汞红外探测器制造技术的成熟度还不很高,其成本长期以来一直居高不下,在民用领域的应用受到了很大的限制,新型碲镉汞 APD 和 HOT 红外焦平面器件离实用化尚有一定的距离。由于研究规模相对较小,加之碲镉汞材料的窄禁带、高缺陷密度和三元化合物的复杂性等问题,给碲镉汞材料的研究带来了很大的困难。目前,对碲镉汞材料的认识 and 了解在许多方面还不完善,材料的位错密度仍处于 10^4cm^{-2} 的水平,材料中的沉淀物缺陷和表面缺陷也未能彻底去除,掺杂技术(尤其是 P 型掺杂技术)尚不能满足材料制备技术的发展需求,材料的整体性能也还不能完全满足红外焦平面器件发展的需求。

30 年前,本人有幸在我国碲镉汞材料物理与技术的开拓者——汤定元先生的引导下进入了碲镉汞材料这一研究领域,先后从事过碲镉汞材料物理性能的研究、外延材料的工艺技术研究 and 材料实用化技术的研究。2007 年前后,为庆祝汤定元先生 90 华诞(2010 年),作者萌发了将自己多年来在碲镉汞材料领域中的所见、所学、所思 and 所为整理成《碲镉汞材料物理与技术》书稿,并作为礼物回报导师的想法。正是在这一想法的驱动下,赶在汤定元先生 90 华诞之前完成了本书的草稿。2011 年在国家科学技术学术著作出版基

金、总装备部国防科技图书出版基金和国防工业出版社的支持下,使得草稿有幸变成了正式出版的书稿,作者对此深表感谢。撰写此书的另一个目的是为了便于读者了解和熟悉碲镉汞材料研究的知识框架和已有的研究结果,并对红外焦平面器件的性能和发展与碲镉汞材料的关系有所认识,起到承上启下和抛砖引玉的作用。

本书共 17 章,第 1 章至第 7 章主要介绍碲镉汞材料的基本参数和物理性能,其中包括碲镉汞材料的力学性能和能带结构以及材料的热学、热力学、电学、光学和缺陷性能,这些性能是开展碲镉汞材料物理和制备技术研究所需的基础知识;第 8 章至第 14 章介绍材料制备所需的工艺技术,包括材料的各种生长技术、热处理技术、通用工艺技术和性能检测技术,这些都是碲镉汞材料制备所需的基础工艺技术;第 15 章至第 17 章主要介绍碲镉汞材料和器件之间的关系,主要内容包括材料参数对器件性能的影响,器件性能和材料参数的关系,器件种类和材料制备工艺之间的关系,以及在碲镉汞红外焦平面技术的发展过程中,了解碲镉汞材料和器件的关系是促进碲镉汞红外焦平面探测器技术发展,促进工艺技术从基础技术研究走向工程化和产品化所需的实用化技术的物理基础。在系统介绍碲镉汞材料物理与工艺技术的同时,作者在每一个细节上都力求全面反映国内外已公开报道的研究内容和结果,并讲述了作者对已做工作的理解和对存在问题的思考,以便读者全面了解和掌握碲镉汞材料及器件研究领域已有的知识、经验、技术成果与未来发展的趋势。

需要说明的是,本书不是经典的教科书,书中的许多内容和观点值得做进一步推敲,即使是引用正式刊物发表的结果,那也是在特定环境、设备和工艺条件下获得的特定结果,是否具有普适性同样也需要经过再思考或再验证。碲镉汞材料的有些问题至今仍无定论,许多研究工作也仍处于发展之中,需要读者在学习和了解现有知识和技术,获取有用信息和观点的同时,去劣存优、去伪存真,并善于发现值得进一步思考和研究的问题,怀疑和批判是人类不断实现认知更新及技术创新的源泉。另外,由于是首次构建碲镉汞材料物理和技术的知识框架,且受到时间、精力和能力水平的限制,书中章节的安排和对问题的论述必然存在着许多不够合理、不够先进、不够全面、不够严谨以及文字表述不够恰当的问题,在此敬请读者予以谅解。

本书引用了一些来自专业杂志和书籍中发表的图片,这些杂志和书籍在本领域具有较高的权威性,但作者和出版社不能保证所有引用结果都具有 100% 的正确性。作者在引用材料之前已取得相关出版机构的引用许可,其中大部分的引用来自施普林格科学和商业媒体公司(Springer Science + Business Media B. V.)和美国物理研究所(American Institute of Physics),部分引用许可通过非盈利组织 Copyright Clearance Center, Inc. 提供的版权使用平台(<http://www.copyright.com>)获得。与此同时,作者也尽力和所有引用材料的原作者取得联系,回信的作者对要求的引用许可都表示同意,也有少数作者未给回复或无法取得联系,作者对此表示歉意。如果对书中的引用许可存在争议,请及时与我们联系,以便我们在下次印刷时加以改进。

在本书出版之际,作者还要感谢在碲镉汞材料领域默默无闻、奉献一生的老一辈研究人员,其中让作者受益匪浅的前辈有袁诗鑫、俞振中、陈伯良、刘普林、唐文国、郑国珍、沈

杰、张小平和刘激鸣先生。感谢褚君浩院士、夏义本教授和蔡毅研究员对本书的出版给予了鼓励和推荐。在长期的科研工作中,褚君浩院士、何力研究员、陆卫研究员、戴宁研究员、陈晓双研究员、陈新强研究员、丁瑞军研究员、张勤耀研究员、李言谨研究员和胡晓宁研究员对碲镉汞材料器件的研究和论述以及与作者进行的有益探讨给作者思考及认识问题带来了很多的启发和帮助,方维正、顾惠明、王庆学、魏彦锋、刘从峰、涂步华、曹秀亮、崔晓攀、仇光寅和盛锋锋等同志曾和作者一起从事碲镉汞材料的研究工作,他们的研究作为加深理解碲镉汞材料的物理性能和提高材料制备工艺水平做出了贡献,在此一并表示衷心的感谢。本书同时也将献给刚过 50 华诞的上海技术物理研究所,她为一批又一批的科研人员和工程技术人员提供了开展材料物理研究和技术研发的平台,并要特别感谢历届所领导,尤其是现任领导何力所长和郭英书记对本书出版给予的关心和支持。最后,作者还要对给予本书出版工作提供技术支持的上海技术物理研究所材料器件研究中心的青年学者和研究生表示衷心的感谢,并感谢以夫人林建华女士为代表的家人长期以来对本人工作的理解和支持。

杨建荣

2012 年 9 月 13 日于上海

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 红外探测器材料	1
1.2 碲镉汞材料制备技术的发展	3
1.3 碲镉汞材料物理与技术	7
参考文献	9
第 2 章 碲镉汞材料的基本特性	11
2.1 碲镉汞材料的基本结构特性	11
2.2 碲镉汞材料能带结构	14
2.3 碲镉汞材料的功函数	16
2.4 碲镉汞材料的热学特性	18
2.4.1 碲镉汞材料的基本热参数	18
2.4.2 碲镉汞材料中原子的热扩散特性	21
2.5 碲镉汞材料的力学特性	27
参考文献	29
第 3 章 碲镉汞材料相图	32
3.1 固—液两相平衡体系相图	33
3.2 液—气两相平衡体系相图	36
3.3 固—液—气三相平衡体系相图	36
3.4 固—气两相平衡体系相图	37
3.5 相图的理论计算	38
3.6 有关碲镉汞相图需要补充说明的问题	39
参考文献	40
第 4 章 碲镉汞材料的缺陷	41
4.1 点缺陷	41
4.2 线缺陷	45
4.2.1 穿越位错	50
4.2.2 界面失配位错	53
4.2.3 微缺陷	55
4.3 面缺陷和层状缺陷	57

4.4	体缺陷	57
4.5	表面缺陷	58
4.6	碲镉汞缺陷的观察和测量方法	60
	参考文献	62
第5章	碲镉汞材料的光学特性	65
5.1	光学常数	65
5.2	红外透射光谱	69
5.2.1	碲镉汞体材料	70
5.2.2	HgCdTe/CdZnTe 外延材料	71
5.2.3	HgCdTe/CdTe/GaAs 外延材料	73
5.2.4	具有组分梯度的碲镉汞外延材料	75
5.2.5	多层碲镉汞外延材料的红外透射光谱	80
5.3	红外反射光谱	81
5.4	椭圆偏振光谱	82
5.5	光致发光光谱	83
5.6	喇曼光谱	84
	参考文献	84
第6章	碲镉汞材料的电学特性	87
6.1	半导体材料电学性能的基础知识	88
6.1.1	单种载流子导电	88
6.1.2	载流子的迁移率与散射机制	88
6.1.3	两种载流子导电	89
6.1.4	载流子非均匀分布材料的电学性能	90
6.1.5	多种载流子导电材料的电学性能	95
6.1.6	载流子导电特性与温度的关系	96
6.1.7	表面层的电学性能	99
6.1.8	载流子的产生与复合	99
6.2	本征材料的电学性能	103
6.3	非掺杂碲镉汞材料的电学性能	104
6.3.1	载流子浓度和迁移率	104
6.3.2	少数载流子寿命	107
6.3.3	少数载流子扩散长度	110
6.4	掺杂碲镉汞材料的电学性能	111
6.4.1	N型掺杂材料	111
6.4.2	P型掺杂材料	112
6.5	碲镉汞材料电学性能测试结果的评价	113
	参考文献	115

第 7 章 碲镉汞材料生长及相关的材料物理特性	119
7.1 材料生长	119
7.2 材料生长的相图	123
7.3 材料生长的驱动力	126
7.4 材料的固—液界面	127
7.5 材料的表面特性	129
7.6 材料的边界层	132
7.7 外延材料的晶格失配和临界厚度	133
参考文献	138
第 8 章 碲镉汞液相外延技术	139
8.1 液相外延的相图	141
8.2 液相外延的理论描述	141
8.3 富碲推舟式液相外延	143
8.3.1 外延过程的理论计算	146
8.3.2 富碲推舟式液相外延中的一些工艺问题	148
8.3.3 富碲推舟式液相外延的设备	148
8.4 富碲垂直浸渍式液相外延	149
8.5 富汞垂直浸渍式液相外延	152
8.6 倾舟式液相外延	153
8.7 碲镉汞液相外延的相关技术	155
8.7.1 富碲液相外延的掺杂技术	155
8.7.2 表面形貌和表面缺陷的控制技术	156
8.7.3 位错密度的控制	157
8.7.4 Mosaic 结构衬底上的碲镉汞液相外延	161
8.7.5 双层碲镉汞液相外延技术	161
8.7.6 Si 基碲镉汞液相外延技术	162
8.8 碲镉汞液相外延技术的优势和局限性	163
参考文献	165
第 9 章 碲镉汞分子束外延技术	167
9.1 分子束外延系统的设备和相关技术手段	168
9.1.1 真空系统	168
9.1.2 束源炉	169
9.1.3 样品架	170
9.1.4 实时监测装置	171
9.2 碲镉汞分子束外延的常规工艺	174
9.3 分子束外延的基本原理和理论描述方法	180

9.3.1 蒙特卡洛方法	181
9.3.2 分子束外延的热力学描述	182
9.4 碲镉汞分子束外延的相关技术	185
9.4.1 原位掺杂技术	186
9.4.2 分子束外延的原位热处理技术	188
9.4.3 表面原位钝化技术	188
9.4.4 碲镉汞组分异质外延技术	188
9.4.5 异质衬底外延技术	189
9.4.6 CdTe/Si 复合衬底技术	193
9.4.7 Si 读出电路上的外延技术	193
9.4.8 原位表面处理技术	194
9.4.9 区域选择生长技术的研究	194
参考文献	196

第 10 章 碲镉汞体材料和气相外延生长技术	200
10.1 体材料生长技术	200
10.1.1 布里奇曼法	201
10.1.2 固态再结晶法	202
10.1.3 碲溶剂生长技术	202
10.1.4 体材料的局限性	203
10.2 碲镉汞金属有机化学气相沉积法	203
10.2.1 MOCVD 的基本原理	204
10.2.2 碲镉汞 MOCVD 设备介绍	205
10.2.3 碲镉汞 MOCVD 的工艺和生长机制	206
10.2.4 衬底及取向对 MOCVD 技术的影响	208
10.2.5 碲镉汞 MOCVD 技术的掺杂	209
10.3 碲镉汞等温气相外延法	210
参考文献	212

第 11 章 碲锌镉衬底材料的制备和性能	214
11.1 碲锌镉材料的基本物理性能	214
11.2 碲锌镉衬底材料基本特性的评价	216
11.3 碲锌镉材料的生长方法	218
11.4 碲锌镉材料的缺陷	221
11.4.1 体缺陷及其检测技术	221
11.4.2 碲锌镉材料沉淀物缺陷的形成机理	224
11.4.3 碲锌镉材料中的微缺陷	228
11.4.4 碲锌镉材料的点缺陷	237
11.4.5 碲锌镉材料的面缺陷	237

11.5	碲锌镉材料的热处理技术	238
11.6	碲锌镉衬底材料性能对碲镉汞外延材料质量的影响	240
11.7	碲锌镉衬底制备技术的发展	240
	参考文献	241
第 12 章	碲镉汞材料的热处理技术	244
12.1	控制汞空位浓度的热处理技术	244
12.1.1	闭管汞源热处理技术	245
12.1.2	汞碲源闭管热处理技术	247
12.1.3	开管汞源热处理技术	248
12.1.4	宽禁带覆盖层的真空热处理技术	249
12.1.5	HgTe 粉末源热处理技术	250
12.1.6	汞空位热处理工艺需要注意的问题	252
12.2	碲镉汞掺杂材料的热处理技术	253
12.2.1	In 掺杂材料的热处理	253
12.2.2	As 掺杂激活热处理技术	253
12.2.3	H ⁺ 掺杂热处理技术	256
12.3	表面掺杂热处理技术	257
12.4	缺陷和表面钝化相关的热处理技术	257
12.4.1	闭管高温热处理技术	257
12.4.2	MBE 原位高温热处理技术	259
12.4.3	Hg - Cd 源热处理技术	259
12.4.4	CdTe 钝化层的热处理技术	260
12.4.5	马赛克结构材料的热处理技术	261
12.5	表面注入或刻蚀后的材料热处理工艺	262
12.6	热处理工艺的复杂性和需要进一步思考的问题	265
	参考文献	266
第 13 章	碲镉汞材料制备的基础工艺技术	268
13.1	原材料的质量控制	268
13.2	配料	269
13.3	材料的清洗和腐蚀	270
13.4	抛光	273
13.5	粘片	274
13.6	材料切割技术	275
13.7	单点金刚石旋转切削加工技术	277
13.8	材料的刻蚀	278
13.9	离子注入	280
13.10	石英和玻璃的处理	281

13.11	石墨的选择与处理	283
13.12	合成	284
13.13	加热和控温技术	284
13.13.1	加热和保温	284
13.13.2	温度控制技术	285
13.13.3	温度测量技术	288
13.14	真空技术	289
13.15	净化环境的控制	297
13.16	高纯气体和去离子水使用技术	298
13.17	设备故障排除技术	300
	参考文献	301
第14章	碲镉汞材料物理性能的检测技术	304
14.1	电学性能测试	304
14.1.1	霍耳测试技术	304
14.1.2	深能级瞬态谱测试技术	307
14.2	红外光谱仪测试技术	309
14.3	光电检测技术	310
14.3.1	光电导衰退测量技术	311
14.3.2	微波反射光电导衰退检测技术	312
14.3.3	光束感应和电子束感应电流谱测试技术	313
14.4	X射线衍射技术	314
14.4.1	X射线衍射的基本知识	315
14.4.2	X射线摇摆曲线	317
14.4.3	晶格常数的测量	318
14.4.4	位错密度的测量	318
14.4.5	双晶衍射用于双层组分异质结构特性的测量	320
14.4.6	X射线倒空间矢量分布图分析技术	321
14.4.7	X射线貌相分析	323
14.4.8	X射线荧光分析	325
14.4.9	X射线粉末衍射	325
14.5	显微观察与分析技术	326
14.5.1	光学显微术	326
14.5.2	X射线光电子能谱	329
14.5.3	电子显微术	329
14.5.4	探针扫描显微术	332
14.6	质谱分析技术	333
14.6.1	二次离子质谱	334
14.6.2	辉光放电质谱	336

14.6.3 四极质谱	337
14.7 原子光谱技术	337
14.8 热分析方法	338
14.9 物性检测结果的评价	338
参考文献	340
第 15 章 碲镉汞材料参数对器件性能的影响	341
15.1 材料尺寸	341
15.2 平整度和粗糙度	343
15.3 晶向	344
15.4 组分	345
15.5 电学参数	348
15.5.1 导电类型	348
15.5.2 载流子浓度和迁移率	349
15.6 少子寿命	351
15.7 透过率	353
15.8 缺陷	354
15.9 双晶半峰宽	358
15.10 X 射线貌相	359
15.11 非均匀性	360
15.12 表面和界面	361
15.13 力学特性	363
参考文献	365
第 16 章 碲镉汞器件性能与材料参数的关系	367
16.1 漏电流	372
16.1.1 扩散电流	372
16.1.2 产生复合电流	374
16.1.3 隧道电流	378
16.1.4 碰撞激化电离电流	380
16.1.5 表面漏电流	382
16.2 品质参数 R_0A	386
16.3 响应率及响应光谱	390
16.3.1 填充因子	391
16.3.2 表面反射	392
16.3.3 光的吸收效率和光生载流子的复合效应	393
16.3.4 其他一些影响因素	396
16.4 噪声和噪声等效温差	398
16.5 探测率	402

16.6	增益	405
16.7	带宽	408
16.8	非均匀性和盲元率	409
16.9	串音	411
16.10	抗环境冲击性能	413
16.11	总结	414
	参考文献	416
第 17 章	碲镉汞器件结构与材料制备工艺的关系	421
17.1	$n^+ - on - p$ 平面结器件	422
17.2	$\underline{n}^+ - on - p$ 台面结器件	424
17.3	$p^+ - on - n$ 台面结器件	424
17.4	$p^+ - on - n$ 平面结器件	425
17.5	n^+/p 高密度垂直集成光电器件	426
17.6	全台面隔离器件	427
17.7	高温工作器件	428
17.8	顺序读出双色器件	430
17.9	同步读出的双色器件	432
17.10	三色碲镉汞红外焦平面器件	434
17.11	雪崩焦平面器件	435
17.12	多 pn 结的大光敏元器件	436
17.13	HgTe/CdTe 超晶格器件	438
17.14	$\underline{n}^+ Bn$ 型光电器件	438
17.15	单片集成式器件	439
17.16	碲镉汞红外焦平面材料和器件的发展	439
	参考文献	446
附录		449
	参考文献	459

Contents

Chapter 1 Outline	1
1.1 Materials of infrared detectors	1
1.2 Development of manufacture techniques of HgCdTe materials	3
1.3 Physics and technology of HgCdTe materials	7
References	9
Chapter 2 Primary properties of HgCdTe materials	11
2.1 Structure of HgCdTe materials	11
2.2 Band structure of HgCdTe materials	14
2.3 Work function of HgCdTe materials	16
2.4 Thermal properties of HgCdTe materials	18
2.4.1 Thermal properties of HgCdTe materials	18
2.4.2 Thermal diffusion of atoms in HgCdTe materials	21
2.5 Mechanical properties of HgCdTe materials	27
References	29
Chapter 3 Phase Diagrams of HgCdTe materials	32
3.1 Solid-liquid phase diagrams of HgCdTe materials	33
3.2 Liquid-vapor phase diagrams of HgCdTe materials	36
3.3 HgCdTe phase diagrams of solid-liquid-vapor equilibrium	36
3.4 Solid-vapor phase diagrams of HgCdTe materials	37
3.5 Theoretical calculations of phase diagrams	38
3.6 Other problems about HgCdTe phase diagrams	39
References	40
Chapter 4 Defects of HgCdTe materials	41
4.1 Point defects	41
4.2 Linear defects	45
4.2.1 Threading dislocations	50
4.2.2 Mismatch dislocations	53
4.2.3 Micro-defects	55
4.3 Planar defects	57

4.4	Bulk defects	57
4.5	Surface defects	58
4.6	Observation and measurement of HgCdTe defects	60
	References	62
Chapter 5	Optical properties of HgCdTe materials	65
5.1	Optical constants of HgCdTe materials	65
5.2	Infrared transmission spectra	69
5.2.1	Bulk materials	70
5.2.2	HgCdTe/CdZnTe epilayers	71
5.2.3	HgCdTe/CdZnTe/GaAs epilayers	73
5.2.4	HgCdTe epilayers with composition gradient	75
5.2.5	Multi-layer HgCdTe epilayers	80
5.3	Infrared reflection spectra	81
5.4	Ellipsometrical spectra	82
5.5	Photoluminescence spectra	83
5.6	Raman spectra	84
	References	84
Chapter 6	Electrical properties of HgCdTe materials	87
6.1	Fundamental knowledge of electrical properties	88
6.1.1	Conductance of single-type carriers	88
6.1.2	Mobility and dispersion mechanism of carriers	88
6.1.3	Conductance of electrons and holes	89
6.1.4	Electrical properties of HgCdTe materials with inhomogeneous distribution of carrier concentrations	90
6.1.5	Electrical properties of HgCdTe materials with multi-carriers	95
6.1.6	Dependence of electrical properties on temperature	96
6.1.7	Electrical properties of surface layers	99
6.1.8	Generation and recombination of carriers	99
6.2	Electrical properties of intrinsic materials	103
6.3	Electrical properties of undoped materials	104
6.3.1	Concentration and mobility of carriers	104
6.3.2	Lifetime of minority carriers	107
6.3.3	Diffusion length	110
6.4	Electrical properties of doped HgCdTe materials	111
6.4.1	n-doped materials	111
6.4.2	p-doped materials	112
6.5	Evaluation of HgCdTe electrical parameters	113

References	115
------------------	-----

Chapter 7 Crystal growth and relevant physical properties of

HgCdTe materials	119
7.1 HgCdTe growth	119
7.2 Phase diagrams of HgCdTe growth	123
7.3 Driving force of crystal growth	126
7.4 Solid-liquid interface	127
7.5 Surface characteristics of materials	129
7.6 Boundary layer of materials	132
7.7 Lattice mismatch and critical thickness	133
References	138

Chapter 8 HgCdTe Liquid phase epitaxy

8.1 Phase diagram of HgCdTe LPE	141
8.2 Theoretical description of LPE process	141
8.3 Te-rich horizontal sliding-boat LPE	143
8.3.1 Theoretical description	146
8.3.2 LPE technologies	148
8.3.3 Equipment of sliding-boat LPE	148
8.4 Te-rich vertical dipping LPE	149
8.5 Hg-rich vertical dipping LPE	152
8.6 Tipping LPE	153
8.7 Techniques relevant with HgCdTe LPE	155
8.7.1 Doping technique of Te-rich LPE	155
8.7.2 Controls of surface defects and morphologies	156
8.7.3 Controls of dislocation densities	157
8.7.4 LPE on substrates with Mosaic structures	161
8.7.5 Double layer epitaxy	161
8.7.6 Si based HgCdTe LPE278	162
8.8 Advantage and limitation of HgCdTe LPE	163
References	165

Chapter 9 Molecular beam epitaxy of HgCdTe

9.1 Equipment and capabilities of MBE system	168
9.1.1 Vacuum chamber	168
9.1.2 MBE sources	169
9.1.3 Sample holders	170
9.1.4 Real-time monitoring apparatus	171

9.2	Routine technology of HgCdTe MBE	174
9.3	Principle and theoretical description of HgCdTe MBE	180
9.3.1	Monte Carlo method	181
9.3.2	Thermodynamic description	182
9.4	Techniques relevant with HgCdTe MBE	185
9.4.1	In situ doping	186
9.4.2	In situ heat treatment	188
9.4.3	In situ passivation	188
9.4.4	Composition-heterogeneous epitaxy	188
9.4.5	Epitaxy on heterogeneous substrate	189
9.4.6	CdTe/Si composite substrates	193
9.4.7	Epitaxy on Si RIOC	193
9.4.8	In situ surface treatment	194
9.4.9	Selective area epitaxy	194
	References	196
Chapter 10	HgCdTe Bulk materials and vapor phase epitaxy	200
10.1	Growth of bulk material	200
10.1.1	Bridgman method	201
10.1.2	Solid state re-crystallization	202
10.1.3	Te-rich traveling heater method	202
10.1.4	Limitation of bulk materials	203
10.2	Metalorganic chemical Vapor deposition of HgCdTe	203
10.2.1	Principle of MOCVD	204
10.2.2	Equipment of HgCdTe MOCVD	205
10.2.3	Technology and growth mechanism of HgCdTe MOCVD	206
10.2.4	Influence of substrate orientation	208
10.2.5	Doping of HgCdTe MOCVD	209
10.3	Isothermal vapor phase epitaxy of HgCdTe	210
	References	212
Chapter 11	Preparation and properties of CdZnTe substrates	214
11.1	Basic properties of CdZnTe materials	214
11.2	Evaluation of CdZnTe materials	216
11.3	Growth methods of CdZnTe materials	218
11.4	Defects of CdZnTe materials	221
11.4.1	Bulk defects and their measurments	221
11.4.2	Formation mechanism of precipitates	224
11.4.3	Micro-defects of CdZnTe materials	228