

序

20 世纪 50 年代出现一门半导体学科，从 IV 族元素半导体到 III-V 族二元化合物半导体都有不同程度的研究。其中禁带最窄的半导体是 InSb(室温下禁带宽度为 0.18eV)。由于红外探测技术的需要，1959 年出现了以 II-VI 族二元化合物 HgTe 和 CdTe 为基础的三元化合物 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ，可以得到禁带更窄的半导体。改变 x 之值，有可能解决几个重要红外波段探测器的需要。同时禁带的变窄，出现一些有趣的物理特性。因而立即引起广泛的研究兴趣。1967 年即出现有关这一材料的国际性的专业讨论会。1976 年首次出现“窄禁带半导体”的国际讨论会。自那以后有关“II-VI 族半导体”或“窄禁带半导体”的专业讨论会，有国际的，有大西洋公约组织的，有各个国家的，真是层出不穷。每次会议规模都相当大，从而形成一个半导体物理学的重要分支——窄禁带半导体。在这迅速发展过程中，出版过不少有关这一半导体的论文专集。但作为全面综述窄禁带半导体有关研究成果的《窄禁带半导体物理学》，据本人所知，这还是国际上的第一本专著。

本书的编著者褚君浩教授曾在 HgCdTe 半导体的研究发展过程中做出过多方面的贡献，被认为是《窄禁带半导体物理学》一书最合适的编著者。1999 年国际著名的《Landolt-Boerstein 科学与技术中的数据 and 函数》出新版本时，就邀请他撰写有关 HgCdTe 的章节。2000 年美国 Kluwer Academic/Plenum 出版社计划出版《微科学丛书》(MicroScience Series)时，主编之一 A. Sher(曾任美国 II-VI 族材料物理与化学讨论会的主席)推荐褚君浩教授撰写《窄禁带半导体物理学》一书，现在这本书就是它的中文版。

本人有幸首先对这本《窄禁带半导体物理学》从头至尾通读一遍，真是受益匪浅。这本书对窄禁带半导体，主要是 HgCdTe 的各个方面，从晶体学的基本性质和制备方法，各个物理现象的基本原理、测试方法，还有从早期到最近的研究成果以及器件的原理和制备技术等，都有系统的清晰的论述。因而这本书不仅是从事窄禁带半导体研究、教学和产业人员必备的参考书，对所有从事半导体研究、教学和产业人员，也是值得一读的参考书。

冯宁元

2004 年 12 月

前 言

窄禁带半导体是半导体学科的分支学科。窄禁带半导体物理一方面反映了半导体的普遍规律，另一方面“窄禁带”的特点又赋予它许多新的特征，从而进一步丰富半导体学科。同时窄禁带半导体的发展又与红外光电子科学技术及其应用的发展紧密相连。因此本书在学术上对于半导体物理的发展会有一定意义，而且在应用上对于红外高技术发展研究也有一些参考价值。

关于窄禁带半导体物理已经有若干著作。1977年英国科学家 D. R. Lovett 出版“Semimetals & Narrow-bandgap Semiconductors” (London); 1978年德国科学家 R. Dornhaus and G. Nimtz 发表了一篇长篇总结文章，1983年再版，题为“The Properties and Applications of the HgCdTe Alloy System, in Narrow Gap Semiconductors” (Springer Tracts in Modern Physics Vol. 98, p119)。这两本书较系统地讨论了窄禁带半导体的物理性质，至今仍然是重要的参考书。1980年美国“Semiconductors and Semimetals” (Vol. 18)集中发表了关于 HgCdTe 材料器件的评述性论文集，是 HgCdTe 研究的重要参考文献。1991年中国科学家汤定元发表“窄禁带半导体红外探测器”(王守武主编，半导体器件研究与进展，北京：科学出版社，1~107)，系统阐述了 HgCdTe 红外探测器的基本理论。1994年英国汇编出版一书，名为“Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds”，其中有有关 HgCdTe 窄禁带半导体有关物理和化学性质的多篇文章，本书提供了丰富的 Cd 基半导体材料性质的数据及有关资料。

本书以半导体物理研究为线条，阐述窄禁带半导体的一般科学规律，并结合国际国内在该领域的主要研究结果，包括作者在内的我国科学家的研究结果。同时注重建立基本规律与科学前沿探索的桥梁，尽可能介绍窄禁带半导体物理学的基本理论和研究方法，以及该领域学科前沿和材料器件相关的科学问题。希望本书能够对于国内相关科技工作者包括研究生、大学生在半导体物理和光电子研究领域的学习、研究和技术发展工作中起到一定参考作用。

本书得到汤定元先生的鼓励和指导，汤先生审阅了本书并提出宝贵意见。吕翔、邵军、黄志明、桂永胜等博士参加了部分章节的编写，常勇、李标、张新昌、王善力、蔡毅、刘坤和俞振中等许多博士和研究人员给予了帮助，吕翔承担了全部稿件的计算机编辑。本书的研究工作得到国家自然科学基金委、国家科技部、中国科学院和上海市科委等多方面的支持；本书的出版得

到华夏英才基金的资助；并得到汤定元院士和薛永琪院士的推荐。作者在此表示衷心的感谢。

褚君浩

中国科学院上海技术物理研究所

红外物理国家重点实验室

2004年4月18日于上海

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 窄禁带半导体	1
1.2 现代红外光电子物理	6
1.2.1 红外材料平台	6
1.2.2 红外物理规律	7
1.2.3 红外功能器件	8
1.2.4 红外技术应用	9
参考文献	10
第 2 章 晶体	12
2.1 晶体生长的基本理论	12
2.1.1 引言	12
2.1.2 晶体生长热力学问题	15
2.1.3 晶体生长动力学问题	18
2.1.4 相图在晶体生长中的应用	21
2.1.5 分凝系数	29
2.1.6 凝固过程	33
2.2 体材料生长的主要方法	38
2.2.1 提拉法	38
2.2.2 布里奇曼方法	44
2.2.3 半熔法和 Te 溶剂法	49
2.2.4 固态再结晶方法	52
2.3 液相外延薄膜的生长	54
2.3.1 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延生长条件	55
2.3.2 液相外延的生长程序	60
2.3.3 不同方式液相外延的比较	67
2.3.4 影响 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液相外延层质量的几个因素	69
2.4 分子束外延薄膜生长	71
2.4.1 分子束外延生长过程	71

2.4.2	反射式高能电子衍射原位检测技术(RHEED)	75
2.4.3	生长温度的监控	77
2.4.4	组分控制	82
2.5	晶体完整性	86
2.5.1	X 射线双晶衍射	86
2.5.2	形貌相	94
2.5.3	Hg _{1-x} Cd _x Te 外延薄膜中的沉淀相	96
2.5.4	Hg 空位	100
	参考文献	103
第 3 章	能带结构	108
3.1	能带结构的简要描述	108
3.1.1	能带理论的基本方法	108
3.1.2	窄禁带半导体的能带结构的简要描述	110
3.2	$k \cdot p$ 表象和本征方程	116
3.2.1	$k \cdot p$ 表象	116
3.2.2	本征方程	118
3.2.3	选择定则	122
3.3	能带结构计算	130
3.3.1	$k_0 = 0$ 的解	130
3.3.2	$k \cdot p$ 一级微扰	131
3.3.3	$k \cdot p$ 一级微扰和 $(\nabla U \times P) \cdot \sigma$ 一级微扰	132
3.3.4	$\Phi_{i\alpha}$ 、 $\Phi_{i\beta}$ 之间的二级微扰	136
3.3.5	H_{kso} (k 线性项) 的贡献	138
3.4	能带参数	141
3.4.1	禁带宽度	141
3.4.2	导带电子有效质量	155
3.4.3	动量矩阵元 P 和重空穴有效质量 m_{hh}	160
	参考文献	162
第 4 章	光学性质	165
4.1	光学常数和介电函数	165
4.1.1	一般概念	165
4.1.2	Kramerg-Kronig 关系和光学常数	167
4.1.3	折射系数的色散	170
4.1.4	电场和磁场对光学常数的影响	174
4.2	带间光跃迁的理论和实验	178

4.2.1	直接带间光跃迁的理论	178
4.2.2	带间光跃迁的实验研究	185
4.2.3	带间的间接跃迁	192
4.3	本征吸收光谱的表达式	195
4.3.1	吸收边的规律	195
4.3.2	本征吸收带的解析表达式	199
4.3.3	本征吸收系数的其他表达式	204
4.4	光学常数的直接测量	211
4.4.1	引言	211
4.4.2	椭圆偏振光谱方法基本原理	213
4.4.3	实际工作模式	217
4.4.4	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光学常数的红外椭圆偏振光谱研究	220
4.4.5	实时检测碲镉汞的组分	223
4.5	自由载流子的光学效应	229
4.5.1	Burstein-Moss 效应	230
4.5.2	自由载流子吸收的一般理论	239
4.5.3	碲镉汞外延薄膜的自由载流子吸收	243
4.5.4	自由载流子的磁光效应	253
4.6	材料的光学表征	260
4.6.1	用红外光吸收法测定 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 组分	261
4.6.2	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 组分 x 的横向均匀性	265
4.6.3	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 外延薄膜的纵向组分分布	268
4.6.4	利用红外透射光谱确定 MBE 的 HgCdTe/CdTe/GaAs 多层结构的参数	273
	参考文献	278
第 5 章	输运性质	283
5.1	载流子浓度和费米能级	283
5.1.1	载流子统计规律	283
5.1.2	本征载流子浓度 n_i	285
5.1.3	补偿半导体中的载流子浓度和费米能级	295
5.2	电导率和迁移率	304
5.2.1	玻尔兹曼方程和电导率	304
5.2.2	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的电子迁移率的实验结果	308
5.2.3	$n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的电子迁移率的表达式	313
5.2.4	$p\text{-HgCdTe}$ 空穴迁移率的表达式	316
5.3	磁场下的输运现象	317

5.3.1	电导率张量	317
5.3.2	霍尔效应	321
5.3.3	磁阻效应	325
5.3.4	磁输运测试方法和系统	329
5.4	多种载流子体系的迁移率谱	331
5.4.1	多种载流子体系的电导率张量	331
5.4.2	多种载流子拟合方法	333
5.4.3	迁移率谱分析方法	337
5.4.4	定量迁移率谱分析	340
5.5	量子效应	349
5.5.1	磁阻振荡	349
5.5.2	n-InSb 的纵向磁阻振荡	355
5.5.3	n-Hg _{1-x} Cd _x Te 的磁阻振荡	361
5.6	热电子效应	366
5.6.1	热电子	366
5.6.2	HgCdTe 的热电子效应	368
	附录 迁移率谱的求解	375
	参考文献	377
第 6 章	晶格振动	380
6.1	声子谱	380
6.1.1	一维原子链的声子谱	380
6.1.2	声子谱的实验测量	383
6.1.3	声子谱的理论计算	386
6.2	晶格反射光谱	397
6.2.1	晶格振动的双模行为	397
6.2.2	晶格振动的多振子模型	400
6.2.3	等离子振荡量子-LO 声子耦合效应	405
6.2.4	HgCdTe 远红外光学常数	410
6.3	晶格吸收光谱	412
6.3.1	晶格吸收谱	412
6.3.2	双声子吸收	415
6.3.3	Hg _{1-x} Cd _x Te 混晶的低频吸收带	419
6.3.4	声子谱的特征估计	422
6.4	声子 Raman 散射	424
6.4.1	电极化率	424

6.4.2	散射截面	430
6.4.3	选择定则的应用	438
6.4.4	HgCdTe 的 Raman 散射	447
	参考文献	453
第 7 章	杂质缺陷	456
7.1	杂质缺陷的导电性和电离能	456
7.1.1	缺陷	456
7.1.2	杂质缺陷的化学分析和导电性	460
7.1.3	掺杂行为	465
7.1.4	杂质能级的理论估算方法	471
7.1.5	杂质缺陷的实验测量方法	481
7.2	浅杂质	492
7.2.1	引言	492
7.2.2	浅施主杂质	495
7.2.3	浅受主杂质缺陷	499
7.3	深能级	507
7.3.1	HgCdTe 的深能级瞬态谱	507
7.3.2	HgCdTe 的深能级导纳谱	516
7.4	共振缺陷态	521
7.4.1	共振缺陷态的电容谱测量方法	522
7.4.2	理论模型	525
7.4.3	阳离子替位杂质引起的共振态	527
7.5	杂质缺陷的光致发光谱	529
7.5.1	引言	529
7.5.2	光致发光的物理基础	530
7.5.3	Sb 掺杂 HgCdTe 的红外光致发光	542
7.5.4	As 掺杂 HgCdTe 薄膜的红外光致发光	546
7.5.5	Fe 杂质在 HgCdTe 中的行为	551
	参考文献	557
第 8 章	复合	562
8.1	复合机制和寿命	562
8.1.1	复合机制	562
8.1.2	连续性方程和寿命	564
8.1.3	碲镉汞中复合机制和寿命的简要描述	566
8.2	俄歇复合	572

8.2.1	俄歇复合过程的类型	572
8.2.2	俄歇寿命	572
8.3	Shockley-Read 复合	581
8.3.1	单能级复合中心	581
8.3.2	复杂情况下寿命的分析	585
8.4	辐射复合	589
8.4.1	半导体中的辐射复合过程	589
8.4.2	辐射复合的寿命	590
8.4.3	p 型 HgCdTe 材料的辐射复合	593
8.5	少数载流子寿命的测量	596
8.5.1	光调制红外吸收方法	596
8.5.2	微波反射法研究半导体少子寿命	605
8.5.3	扫描光致发光在寿命均匀性测量中的应用	607
8.5.4	HgCdTe 少数载流子寿命的实验研究	612
8.6	表面复合	618
8.6.1	表面复合效应	618
8.6.2	表面复合速度	623
8.6.3	表面固定电荷对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导探测器性能的影响	625
	参考文献	630
第 9 章	表面二维电子气	632
9.1	MIS 结构	632
9.1.1	MIS 的经典理论	632
9.1.2	量子效应	638
9.2	子能带结构的理论模型	639
9.2.1	引言	639
9.2.2	自洽计算理论模型	642
9.3	子能带结构的实验研究	649
9.3.1	子能带结构的量子电容谱模型	649
9.3.2	非量子限情况下的量子电容谱	657
9.3.3	HgCdTe 表面二维电子气的实验研究	660
9.3.4	InSb 表面二维电子气的实验研究	666
9.4	色散关系和朗道能级	671
9.4.1	色散关系和朗道能级	671
9.4.2	子能带电子的波函数混合和有效 g^* 因子	677
9.5	表面积累层	682

9.5.1	n-Hg _{1-x} Cd _x Te 表面积累层的理论模型	683
9.5.2	n-Hg _{1-x} Cd _x Te 表面积累层的理论计算结果	685
9.5.3	n-Hg _{1-x} Cd _x Te 表面积累层的实验结果	687
9.5.4	SdH 测量结果	689
9.6	表面界面	695
9.6.1	表面对 Hg _{1-x} Cd _x Te 光导器件性能的影响	695
9.6.2	表面对 HgCdTe 光导器件的磁阻特性的影响	701
9.6.3	表面对 Hg _{1-x} Cd _x Te 磁阻振荡的影响	706
9.6.4	表面对 Hg _{1-x} Cd _x Te 光导器件的电阻率-温度关系的影响	708
	参考文献	710
第 10 章	超晶格和量子阱	713
10.1	半导体低维系统	713
10.1.1	能带的色散关系	713
10.1.2	态密度函数	718
10.1.3	光学跃迁与选择定则	720
10.2	低维结构的能带理论	723
10.2.1	体材料能带结构的回顾	723
10.2.2	异质结包络函数理论	727
10.2.3	HgTe 量子阱的特殊性质	734
10.3	低维结构的输运特性	736
10.3.1	二维电子气系统	736
10.3.2	Drude 模型	738
10.3.3	垂直磁场下的 Landau 能级	740
10.3.4	Landau 能级展宽	742
10.3.5	2DEG 的 Shubnikov-de Hass 振荡	743
10.3.6	量子霍尔效应	745
10.4	HgTe/HgCdTe 超晶格量子阱的实验结果	750
10.4.1	HgTe/HgCdTe 超晶格量子阱的光跃迁	750
10.4.2	典型的 SdH 振荡和整数量子霍尔效应	755
10.4.3	n 型 HgTe 量子阱中的 Rashba 自旋轨道耦合作用	758
	参考文献	766
第 11 章	器件物理	770
11.1	HgCdTe 光电导探测器	770
11.1.1	引言	770
11.1.2	光电导器件工作原理简介	771

11.1.3	器件性能参数	775
11.1.4	噪声	779
11.1.5	漂移和扩散对光导器件的影响	785
11.2	光伏型红外探测器	791
11.2.1	光伏器件简介	791
11.2.2	p-n 结光电二极管的电流-电压特性	794
11.2.3	p-n 结中的光电流	807
11.2.4	光伏型红外探测器的噪声机制	811
11.2.5	响应率、噪声等效功率和探测率	815
11.3	金属-绝缘体-半导体红外探测器	819
11.3.1	MIS 红外探测器工作原理	819
11.3.2	MIS 器件中的暗电流	825
11.4	低维系统红外探测器	831
11.4.1	引言	831
11.4.2	量子阱红外探测器的基本原理	833
11.4.3	束缚态-连续态跃迁型量子阱红外探测器	838
11.4.4	微带超晶格量子阱红外探测器	845
11.4.5	多波长量子阱红外探测器	848
11.4.6	量子点红外探测器	850
11.5	低维系统红外激光器	857
11.5.1	引言	857
11.5.2	子带间级联激光器的基本原理	859
11.5.3	子带间级联激光器的基本结构	863
11.5.4	含梯半导体中红外激光器	874
11.5.5	带间级联激光器	877
11.5.6	量子级联激光器的应用	883
11.6	单光子红外探测器	884
11.6.1	引言	884
11.6.2	APD 基本原理	886
11.6.3	APD 基本结构	891
11.6.4	单光子雪崩二极管基本工作原理	895
11.6.5	单光子红外探测器实例	901
	参考文献	907
附录 A	不同组分的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{TE}$ 的物理量关系表	913
A1	禁带宽度 E_g (单位: eV)	913

A2	禁带宽度对应波长 λ_{E_g} (单位: μm)	918
A3	光电导响应的峰值波长 λ_{peak} 和截止波长 λ_{co} (单位: μm), 样品厚度 $d = 10\mu\text{m}$	922
A4	本征载流子浓度 n_i (单位: cm^{-3})	927
A5	导带底电子有效质量 m_0^* / m_0	930
附录 B	简要公式	933
B1	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的禁带宽度	933
B2	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导器件峰值波长 λ_{peak}	933
B3	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 光导器件截止波长 λ_{co}	933
B4	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 本征载流子浓度	933
B5	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 电子迁移率	934
B6	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 介电常数	934
B7	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 吸收系数	934
B8	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 导带底电子有效质量	934

第 1 章 概 述

1.1 窄禁带半导体

窄禁带半导体属于半导体范畴，是一类禁带宽度较窄的半导体。一般认为禁带宽度 E_g 小于 0.5eV 的半导体材料就为窄禁带半导体，或禁带宽度对应于响应波长 $2\mu\text{m}$ 以上红外波段的半导体材料都是窄禁带半导体材料(汤定元 1976, Long 1973)。从能带特征上来看，窄禁带半导体的导带具有较强的非抛物带性质，其自旋轨道裂距远大于禁带宽度，远大于波矢与动量矩阵元的乘积。窄禁带半导体的能带电子态以 1957 年 Kane 提出的 InSb 半导体能带模型为理论基础(Kane 1957, Kane 1966)。HgCdTe、InSb 是最典型的窄禁带半导体材料，这类材料电子有效质量小，电子迁移率高，载流子寿命长，是优良的红外光电信息功能材料(Kruse 1981)。窄禁带半导体最重要特征之一是禁带宽度对应于红外波段，因而是制备红外探测器的功能材料。对于本征红外探测器来说，红外辐射把半导体价带顶部附近的电子激发到导带底部附近的一些电子态上去，产生非平衡电子-空穴对，从而改变材料的电学性质。对于光导器件，则电导率增大，对于光伏器件，则产生光生电压。因此，窄禁带半导体物理的发展离不开红外探测器的发展。红外探测器是现代红外技术的核心，对红外探测器的需求和研制，促进了窄禁带半导体材料制备和物理研究的发展。

窄禁带半导体物理的发展经历了三个阶段。第一个阶段是从 20 世纪 40 年代开始的。当时红外探测器主要为 PbS、PbSe 及 PbTe 探测器，到 50 年代开始用 InSb、InAs 及 Ge:Hg 材料。在实验上，由于 InSb 材料的制备与研究的发展，在理论上 Ge、Si 能带结构研究已经取得明确结果。在此基础上，1957 年，E. O. Kane 利用 $k \cdot p$ 微扰理论计算了 InSb 能带，提出了窄禁带半导体的能带模型。这一理论可以很好地描述窄禁带半导体 InSb 在 K 空间布里渊区 Γ 点附近能量-波矢色散关系，成为描述载流子输运、光电子跃迁等各种过程的基础，从而奠定了窄禁带半导体物理研究的理论基础。这一阶段以建立窄禁带半导体能带理论为主要标志。

第二阶段从 20 世纪 60 年代开始，这一阶段主要是找到最好的窄禁带半导体材料，并进行全面研究的阶段。当初人们分别采用 PbS、InSb、Ge:Hg 制作的红外探测器，应用于波长 $1\sim 3\mu\text{m}$ ， $3\sim 5\mu\text{m}$ ， $8\sim 14\mu\text{m}$ 三个“大气透明窗口”的红外探测。按照黑体辐射光谱分布规律，室温物体的热辐射主要分布在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段。InSb 工作在 $3\sim 5\mu\text{m}$ ，因此对于室温目标的辐射探测利用率较低。Ge:Hg 杂质光电导型探测器工作在 $8\sim 14\mu\text{m}$ ，很有利于室温目标物体热成像，但它工作在 38K

温度以下，使用不便，而且其截止波长位置还不是最佳截止波长。因而人们希望寻找在较高温度下工作在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的本征光电导或光伏探测器材料。为了能在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 大气窗口范围有最好的响应，这样的探测材料必须是禁带宽度约为 0.09eV 左右的半导体。但是，自然界并不现存这样禁带宽度的元素半导体或二元化合物半导体。因此有必要人工合成一种合金半导体材料，通过调整合金组分，使其禁带宽度约为 0.1eV 。HgCdTe 半导体就是这样一种理想的本征型红外辐射探测材料。HgCdTe 可看成(HgTe)和(CdTe)的赝二元半导体。图 1.1 表示了部分化合物半导体材料的禁带宽度 E_g 与晶格常数 a 的关系。从图中可以看出，都为闪锌矿结构的 II-VI 族半金属化合物 HgTe($E_g = -0.3\text{eV}$)和宽禁带半导体化合物 CdTe($E_g = 1.6\text{eV}$)，它们的晶格常数很接近， $\Delta a/a = 0.3\%$ ，使 HgTe、CdTe 能以各种配比形成连续固溶体(HgTe) $_{1-x}$ (CdTe) $_x$ 赝二元系，即 Hg $_{1-x}$ Cd $_x$ Te 序列。根据不同的 Cd 组分，合金可以具有像 HgTe 那样的半金属结构，也可以具有像 CdTe 那样的半导体结构。禁带宽度 $E_g = E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8)$ ，在 4.2K 温度下，当 $x = 0$ 时，为 -0.3eV ，当 $x = 1$ 时，为 1.6eV ，随着 x 变化，禁带宽度在 -0.3 到 1.6eV 之间连续变化。在 4.2K 温度下，当组分 $x = 0.161$ 时， $E_g = 0$ 。Hg $_{1-x}$ Cd $_x$ Te 材料其禁带宽度随组分 x 连续变化，可以覆盖了整个红外波段，是制备红外探测器的重要材料。由于它的禁带宽度可以调节，因此在应用上这种材料不仅可用来替代 Ge : Hg，制作响应波长 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段并在 77K 工作的探测器；同时也用来替代 PbS 和 InSb，制作 $1\sim 3\mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段并在室温下工作的红外探测器。通过适当调节组分，这种材

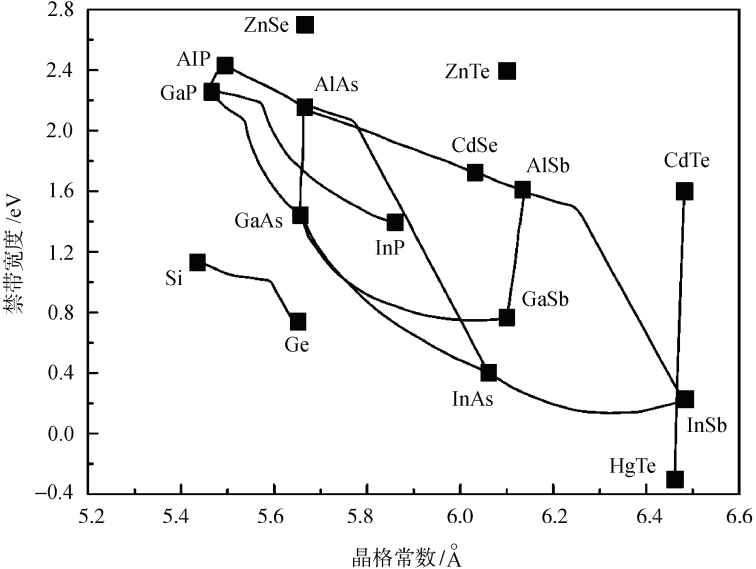


图 1.1 化合物半导体材料的禁带宽度 E_g 与晶格常数 a 的关系

料还可以用于制造光纤通信用的 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的 PIN 型和雪崩型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 探测器, 成为覆盖 $1\sim 30\mu\text{m}$ 宽光谱范围的红外辐射探测材料(Long 1973, Stelzer 1969)。同时在基础问题的研究上, 这种材料可用来研究能带结构的连续改变对输运过程, 光学性质及磁光效应等的影响, 以及研究其晶格振动特征, 而具有特别重要的意义。

1959 年 Lawson 与他的合作者们首先发表了碲镉汞 HgCdTe 研究的结果。但由于材料制备的困难, 一直到 70 年代由于熔体制备晶体能力和外延技术的进展, HgCdTe 材料、物理及器件研究工作开始有较大的发展。在我国汤定元在 1967 年起倡导了对碲镉汞材料器件的全面研究(汤定元 1976, 1974)。20 世纪 80 年代后 HgCdTe 材料已用于单元、多元、线列及焦平面列阵红外探测器研制。这一阶段的发展表明, HgCdTe 材料是一种较为理想的红外探测器材料(Long 1973)。它是一种直接带隙半导体材料, 制成的红外探测器为本征型探测器, 对应光学过程为能带间的本征跃迁过程, 从根本上避免了杂质型红外探测器的缺点。 HgCdTe 材料用于研制红外探测器主要有以下优点: 可调节禁带宽度覆盖整个红外波段; 材料具有大的光吸收系数, 使在 $10\sim 15\mu\text{m}$ 厚的器件芯片中, 产生的内量子效率接近 100%; 电子、空穴迁移率高; 本征复合机制产生载流子寿命及较低的热产生率, 允许器件在较高温度工作; CdTe/HgTe 晶格匹配好, 可制备高质量外延异质结构; 剩余杂质浓度可低于 10^{14}cm^{-3} ; 可掺杂质使之成为 p 型、n 型半导体; 表面可钝化等。但是 HgCdTe 也存在一些缺点, 如 Hg-Cd 键较弱, 在一般温度下, 也会出现 Hg 空位, 必须加以控制。同时, Te 沉淀问题也较严重, 需要解决杂质缺陷、均匀性、提高工作温度、优化器件性能以及器件研制中出现的问题。近 20 年来它已广泛地应用于制备红外探测器, 一直是研究工作的热点。在材料生长方面, 除了传统的体晶生长外, 人们开始采用外延生长技术与方法, 使材料性能进一步提高。在器件方面, 早在 1967 年已见法国关于 HgCdTe 元器件的广告, 到 20 世纪 70 年代末第一代单元 HgCdTe 红外探测器已较为成熟(Chapman 1979), 到 20 世纪 80 年代第二代线列探测器和小规模面阵器件(Elliott 1981)和后来第三代长线列和大规模焦平面列阵器件都研制成功(Arias 1989)。这一阶段由于碲镉汞材料的发现, 人们对窄禁带半导体材料、器件和物理的研究取得了系统的进展(Dornhaus 1983, Lovett 1977, 汤定元 1991)。

窄禁带半导体物理发展的第三阶段从 20 世纪 90 年代开始。在这一阶段窄禁带半导体碲镉汞薄膜材料和第三代长线列和大规模焦平面列阵红外探测器的研究越来越受到重视, 对窄禁带半导体物理的研究也越来越深入。除体材料生长以外(Micklethwaite 1981), 液相外延(LPE)(Schmit 1979)、金属有机物化学气相淀积(MOCVD)(Irvine, Mullin 1981)和分子束外延(MBE)(Faurie 1982)等方法制备的碲镉汞薄膜材料成功应用于制备红外焦平面列阵。人们掌握碲镉汞薄膜材料生长

中的组分控制、电学参数控制、掺杂控制等规律和方法；提出碲镉汞薄膜材料表征的手段；并要解决大面积薄膜的关键参数及其均匀性的测量与控制；材料设计、器件设计和物理研究进一步深入。材料生长与物理研究的结合、器件制备与物理研究的结合日趋紧密。人们研究 HgCdTe 薄膜离子束改性成结的科学规律、直接掺杂成结的科学规律；研究 HgCdTe 中的若干重要杂质缺陷态的操控方法和光电行为及其对材料器件性能的影响；研究 HgCdTe 中 p-n 结的空间结构、光电过程、实际器件结构、表面界面电子态、能带结构、异质结界面二维电子气以及光生载流子的动力学输运过程规律及其对 HgCdTe 器件的影响。在这些研究工作的基础上进一步完善窄禁带半导体红外焦平面列阵物理模型和器件制备的技术规范。当前 512×512 元和 1024×1024 元的大规模 HgCdTe 红外焦平面列阵已相继问世。同时，人们努力进一步探索光电转换、电光转换、光光转换的新效应及其在红外焦平面列阵和新型光电器件上的创新应用。

同时半导体学科本身的发展对窄禁带半导体的研究不断提出新的要求。围绕窄禁带半导体中光电转化过程的研究，有许多问题仍然吸引人们关注。例如：窄禁带半导体在红外辐射作用下，红外光子与电子、声子相互作用激发转化及其动力学过程的微观机制和规律；窄禁带半导体表面界面、异质结构、超晶格量子阱、低维结构等量子体系中的电子态、子能带结构和自旋电子态，以及低维电子的光电跃迁规律及其隧穿输运规律，低维电子在强磁场深低温下的量子输运和磁光共振行为等。在窄禁带半导体的研究工作中，采用了多种光学和电学的实验手段，其中包括了先进的实验手段，如红外荧光光谱、红外磁光光谱、红外椭圆偏振光谱、微区光谱、平带电容谱、定量迁移率谱研究方法等，以及深低温、强磁场下输运特性测量。

近十多年来由于半导体学科发展及红外器件研制的需要，窄禁带半导体的研究获得迅猛发展。窄禁带半导体学科的发展，一方面有其自身的规律，它属于半导体学科；另一方面窄能隙的特征又赋予它许多新的特点，人们在对它的研究中不断发现新的现象、效应和规律；同时它的发展又与红外光学和光电子科学技术及其应用(包括航天航空红外遥感、军事应用及各类高科技民用领域)的发展紧密相连。研究工作的积累推动了以 HgCdTe 为代表的“窄禁带半导体物理学”这一新分支学科的形成和发展。

窄禁带半导体除 HgCdTe、InSb 以外，还有 α -Sn、HgSe、HgCdSe、 $\text{HgS}_x\text{Se}_{1-x}$ 、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 、PbS、PbSe、PbTe、PbSnSe、PbSnTe、InAs、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_{1-x}$ 以及与它们相关的四元系材料等。同时半导体超晶格量子阱、量子线、量子点等低维结构在一定条件下也会形成窄禁带系统。窄禁带半导体和半导体低维结构窄禁带材料系统其用途除红外探测器以外，还用于红外光发射、红外非线性元件、红外传输元件，以及磁场传感器等。

在过去 40 年中 HgCdTe 成为在中远红外(3~30 μm)红外探测的最重要的半导体材料。人们总在希望寻找能够取代 HgCdTe 的材料。例如 HgZnTe、HgMnTe、PbSnTe、PbSnSe、InAsSb 以及含 Tl 或 Bi 的 III-V 族半导体和低维固体。取代 HgCdTe 的主要动机是想克服 HgCdTe 材料在制备器件时技术上的困难。由于 Hg-Te 键结合较弱,导致材料体内、表面以及界面的不稳定性以及非均匀性。尽管如此目前 HgCdTe 还是占主导地位,主要是由于 HgCdTe 具备一系列优良材料特性。同时易于剪裁适应制备不同波段的红外探测器,以及双色或多色红外探测器。当前人们在新型器件制备时需要制备具有复杂能带结构的异质结构,而 HgCdTe 在改变组分调节探测器波段时,晶格常数改变很小,从 CdTe 到 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 晶格常数仅改变 0.2%。如果掺少量 Zn,或者掺少数的 Se,可以使 $\text{Hg}_{1-x}(\text{CdZn})_x\text{Te}$ 或 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)$ 的晶格常数在调节组分 x 时几乎不改变,这就非常适合于异质结构,适应新型红外探测器的需要。当然,由于 HgCdTe 半导体材料在含汞方面的缺点,人们对新的窄禁带半导体材料的探索研究经久不衰,不断丰富着人们对窄禁带半导体的认识。

以上所有的研究工作,在科学上都基于窄禁带半导体的基本物理性质,包括晶体生长,能带结构,光学性质,晶格振动,载流子的激发、输运和复合,杂质缺陷,非线性光学性质,表面界面,二维电子气,超晶格和量子阱,器件物理等方面的新现象,效应和规律。这些内容正是本书所要讨论的主题。

关于窄禁带半导体物理读者还可以参考英国科学家 D.R. Lovett(1977),“Semimetals & Narrow-bandgap Semiconductors”(London);德国科学家 R. Dornhaus and G. Nimtz(1983),“The Properties and Applications of the HgCdTe Alloy System, in Narrow Gap Semiconductors”(Springer Tracts in Modern Physics Vol.98, p119);美国科学家 Semiconductors and Semimetals Vol. 18 中关于 HgCdTe 材料器件的评述性论文集(Willardson, Beer 1981);中国科学家汤定元、童斐明(1991)的“窄禁带半导体红外探测器”(王守武主编,半导体器件研究与进展,北京:科学出版社,1~107);以及 1994 年英国科学家 Capper 汇编出版的“Properties of Cd-based Compounds”,其中有关于 HgCdTe 窄禁带半导体有关物理和化学性质的多篇文章。同时德国再版的“Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology III/41B Semiconductors; II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds”(Rössler 1999)中有关于 HgCdTe 的数据和基本关系式。以上文献系统地讨论和评述了窄禁带半导体的基本物理性质和材料器件的理论和实验,并提供了丰富的 Cd 基半导体材料性质的数据及有关资料。这些著作是 HgCdTe 研究的重要参考文献。

1.2 现代红外光电子物理

窄禁带半导体物理研究是现代红外光电子物理的一个部分。从整个现代红外光电子领域涉及的内容,可以更清楚地知道窄禁带半导体在现代红外光电子学中地位和意义。

21 世纪人类逐步进入光子时代。一方面人们对光的认识更为深入,另一方面人们对物质形态的认识及控制能力不断增强。这一背景促进光电子物理及其应用的蓬勃发展,也推动红外光电子物理和应用在深度和广度上不断拓展。窄禁带半导体是现代红外光电子技术发展的一个重要因素。

当代红外光电子物理研究存在若干重要问题。由于工艺技术的突飞猛进,基础性规律研究与高技术应用的间距越来越短,高技术应用对于基础性规律研究也提出越来越迫切的需求。日益增加的应用需求是红外光电子学科发展的主要驱动力。从学科发展来看,新世纪红外光电子物理要深入研究红外辐射在物质中的激发、传输及接收,特别是要进一步研究物质中红外光到电的转化过程、电到红外光的转化过程,以及红外光之间、红外光与可见光之间的相互转化及其微观机制。当前人们对物质形态的认识大大深化,特别是对物质形态的控制能力大大增强,物质中光电、电光、光光转化过程呈现出越来越丰富的内容,提供给人越来越方便的应用。人们对物质中红外辐射与其他运动形态的转化的研究,不仅增加了人类的知识积累,同时将大大推动高技术应用。

1.2.1 红外材料平台

具有特定结构的物质系统是红外辐射与其他运动形态转化的平台。这些物质系统既包括天然物质材料,如半导体、氧化物、聚合物材料等,也包括人工设计的物质材料,如纳米材料、薄膜、半导体低维结构、异质结、量子阱、量子线、量子点,无论是天然材料,还是人工物质材料,它们的设计、控制、制备以及表征和特性研究,都成为红外光电子物理研究的最重要的基础。窄禁带半导体 HgCdTe、InSb、PbTe、InAsSb、PbEuTe, III-V 族半导体量子阱、量子线、量子点,氧化物铁电薄膜, PZT、SBT、BST, 以及红外窗口材料、红外辐射材料、红外镀膜材料,都是具有红外功能的物质系统。

红外功能材料制备是最根本的问题。当代最主要的红外辐射探测材料仍然是以 HgCdTe 为代表的窄禁带半导体。目前人们对 HgCdTe 材料生长及物理的研究日益深入。HgCdTe 体材料晶体生长,薄膜材料的液相外延生长、分子束外延生长以及金属有机化合物气相淀积生长都取得良好进展。特别是液相外延 HgCdTe 和分子束外延 HgCdTe 受到人们特别重视。为了符合大规模红外焦平面列阵研究

的需求,人们已经能够生长大面积均匀和性能良好的薄膜材料。当前的重要问题是碲镉汞高性能 p-n 结的制备和特性控制,特别是希望在薄膜生长过程中就完成 p-n 结制备。同时关注 Si 基碲镉汞材料制备以便于实现探测器芯片与 Si 基读出电路单片集成。HgCdTe 材料的各种非破坏无接触表征方法研究,材料中杂质缺陷规律研究及其生长中控制的研究,HgCdTe 材料表面界面的研究及其控制,HgCdTe 系列低维结构的制备及其物理特性研究,HgCdTe 中载流子的激发、传输和隧穿规律性研究,以及相关的许多基础物理问题的研究,是这一领域的研究热点。除 HgCdTe 以外的其他窄禁带半导体材料如 InSb、InSbAs、PbTe、PbEuTe 等,由于红外探测或红外光发射的需要,也是人们关注的材料。

铁电薄膜材料是近年来人们非常重视的材料。除了它可以用来研制非挥发存储器,以及压电驱动器等多种应用之外,它主要可以用来研制室温工作的焦平面阵列红外探测器,目前人们重视的是 PZT、BST 等铁电薄膜,一般采用溶胶-凝胶法、溅射法、激光等离子体沉积,金属有机化合物气相沉积等方法来制备,关于铁电薄膜材料的物理研究,特别是与红外探测器相关的物理特性,自发极化的微观机制等近年来正在国际学术界和工业界的热门研究之中。

半导体低维结构是重要的红外光电功能材料,III-V 族半导体量子阱、量子线、量子点结构用于制备红外探测器及焦平面阵列,特别是有意义于制备多色器件和长波器件。同时由于量子阱子带间光跃迁较窄的光谱响应特征,更有利于研制光发射器件。在中红外波段缺乏光发射器件,因而对半导体低维结构制备提出重要需求,目前 III-V 族半导体量子阱在中红外波段光发射已经实现。半导体低维结构用于红外非线性元件的研究也是重要方向。关于半导体低维结构的制备、控制及表征是这一方向重要需求的基础,是今后红外物理新发展的方面。

1.2.2 红外物理规律

红外光电子物理研究的核心,就是红外功能物质系统中光电转化、电光转化、光光转化过程及其规律和控制方法的研究。它提供了对自然界物质运动形态转化过程的认识。这种认识既是器件研制的基础,又是红外功能材料设计与制备的指导。在深入研究红外功能物质材料及其异质结、低维系统光电子物理过程的微观机制的基础上,人们努力研究光电激发和转换、电光激发和转换、光光激发和转换,是研究这些转换的现象、效应、规律以及建立各类器件应用的重要基础。物质中每一种光电间相互转化都可能对应着光电器件的研制和应用,红外探测、红外光发射、非线性光学元件、红外传输是四大类典型的应用。对这些红外光电器件物理的研究,以及器件的设计、制备、性能提高及其应用,构成红外物理和技术研究的重要内容,也是红外物理走向高技术应用的重要桥梁。当前,人们对各类器件,如大规模红外焦平面、中红外波段激光器、红外非线性器件、红外单光

子探测器等需求日益增加。这种需求对红外光电转化研究提出越来越高的要求。

在光电转换方面人们努力寻求光电转换过程与能带结构、杂质缺陷以及晶格振动的关系，获得清晰的物理图像和模型。过去人们对于三维系统中光电子过程的研究较为深入，当前还需要研究表面界面二维电子气以及杂质缺陷量子团簇对器件的影响。对于在二维系统中光电子过程的研究，要探索新方法以补偿响应带宽、光电耦合、量子效率等方面的缺点。

在电光转换方面，同步辐射光源和自由电子激光器是大型的电光转换器，它覆盖了宽阔的光谱范围，包括整个红外波段，是当前国际上重要的研究主题。另一方面半导体低维系统的电光转换过程是重要的研究热点。高速光开关、电光调制器、中红外激光器以及 THz 光源及其成像技术等的应用需求是这方面研究的主要驱动力。人们努力去发现高速电光调制物理过程，以及中红外波段光激射物理过程，这方面的研究工作主要集中在半导体低维结构、量子阱、量子线、量子点。GaAlAs 系列低维结构的电光调制，InGaAs 系列的量子点光激射，InAsSb 系列低维系统的级联激光发射，都取得重要进展。

在光光转换方面，人们主要研究红外光在介质中的传输规律、发射、透射以及红外非线性光学性质。研究集中在对新材料光光转换现象的规律的研究，以及对固体低维结构非线性光学元件的探索。传统的光光转换材料如红外辐射材料、红外透光材料、红外薄膜材料，仍然是该领域研究和应用探索的热点。

为了研究光电相互之间转换的完整物理图像与模型，红外功能材料及其异质结、低维结构的基本物理性质的研究始终是重要基础，各种新型光电测试方法的探索是获得新现象、新效应、新规律的重要保证，这两方面的研究工作在世界各地经久不衰。

1.2.3 红外功能器件

红外量子器件光电子物理是器件应用的科学基础。红外量子器件是各类红外应用中最重要方面，主要包括大规模红外焦平面列阵、红外单光子探测器和中红外激光器等。

大规模红外焦平面列阵是当代最先进的第三代红外传感器，它通过红外辐射在固体二维敏感元列阵中激发光生载流子获取信息，并经信号处理，可以以凝视方式直接获取目标物体清晰的红外图像及光谱。它包括在低温工作的窄禁带半导体红外焦平面和半导体量子阱红外焦平面，也包括在室温下工作的铁电薄膜红外焦平面。焦平面列阵器件的使用不仅大大简化红外系统的结构，提高红外系统的可靠性，又可显著提高探测性能。根据获取的目标物体的红外图像及光谱，可进而对目标物进行识别、定量分析及监控，既可用于宏观对象，如地面、水域、气象，也可用于微小物体，如生物细胞；既可用于静止目标，也可用于运动物体。

尽管在国际上红外焦平面列阵的研究已经取得相当的发展，但是，关于焦平面列阵的基本物理问题并没有研究清楚。特别是关于焦平面材料中光电子跃迁物理过程、光激发载流子及其动力学运输过程的微观机制和物理图像，包括 HgCdTe 中杂质缺陷、表面界面、异质结及低维结构中电子运输、器件物理模型等许多重大问题，还有待形成更清晰和完整的认识。目前的器件研制工作，还有待建立更为符合实际器件结构的物理模型。红外焦平面列阵研究涉及焦平面列阵薄膜材料生长、光电激发动理学研究、焦平面列阵器件物理模型、焦平面列阵关键技术基础，包括器件设计及技术规范、信号读出与处理等，是当前红外光电子技术的最重要前沿问题。室温下工作的红外焦平面列阵在新世纪将会有突破性进展。

红外单光子探测器是信息技术领域重要的量子器件。在信息技术进一步发展的背景下，已经提出对工作在 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波段红外单光子探测器的需求。InGaAs 系列雪崩光电二极管是研制红外单光子探测器的重要方面，已经有重要进展。窄禁带半导体 HgCdTe 和 HgMnTe 其自旋轨道裂开带和禁带宽度的匹配很有利于在 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.8\mu\text{m}$ 波段范围发生“共振碰撞电离”现象，可以用来研制高增益低噪声雪崩光电二极管。按照适当的组分比例，制备四元系 HgCdMnTe 将可以制备 $1.55\mu\text{m}$ 波段的雪崩光电二极管。因此，研究窄禁带半导体导带、价带、自旋轨道裂开带之间的跃迁复合过程及雪崩电离过程的实验和理论，研制高灵敏 HgCdTe、HgMnTe、InGaAs 雪崩光电二极管，探索窄禁带半导体单光子探测器是当前的又一个重要前沿问题。

中红外波段的激光器是上世纪末开始的重要研究课题，目前人们已经开始用 III-V 半导体量子阱结构制备中红外级联激光器，这一工作在新世纪还将深入发展。量子点红外激光器、量子点红外探测器，以及不用读出电路的红外焦平面器件的尝试都将在新世纪蓬勃开展。

1.2.4 红外技术应用

红外光电子物理应用研究的一个重要内容是凝聚态红外光谱与信息获取处理。红外探测器除了它的夜视和热像功能外，获取目标对象的光谱特征是它的另一个重要功能，也是红外技术用于各类环境目标、各类物质系统的监察控制基础。根据已知物质红外光谱特征从信息获取所得的光谱来判断分析物质成分是一种传统的红外光谱技术。随着高新技术的应用和扩展，特别是航空航天遥感技术的发展，人们还需要对地物景观的光谱进行分析，来判断农作物的产量、环境污染物成分、地面矿藏资源、监控高技术产品的生产过程等。随着学科交叉研究的发展，人们更希望通过生命物质或有机物质的光谱来判断生物学过程、化学过程等丰富的物质过程。

目标对象光谱特征与标定是红外应用的一个基础问题。通过各种遥感手段或

在线测量获取目标物体的光谱后, 重要的任务是进行识别控制, 控制的基础是监察识别。监察识别的基础在于对凝聚态物质的特征光谱进行前期研究, 研究定标曲线, 然后用于监察识别或实时监控。凝聚态物质的光谱研究, 包括矿物资源、污染物、各类农作物、环境目标、生命物质等复杂物质系统, 也包括半导体材料、金属、非金属等简单物质系统。凝聚态光谱种类包括反射、透射、吸收、辐射、偏振特性, 也包括荧光、拉曼、磁光等特性。对各类凝聚态物质光谱特征的研究在于发现其提供识别的特征光谱, 并加以定量标定, 建立定标曲线, 用于红外探测信号获取处理中的监控和实时控制, 这方面研究是研制各类专用红外监控系统的重要基础, 也是红外物理基础研究联系高技术实际应用及产业化广阔天地的重要途径。

因此, 对于红外功能材料制备及其特性研究, 红外光电激发转换和光光转换规律性研究, 大规模红外焦平面阵列、单光子红外探测器和中红外激光器等各类红外器件制备及其物理研究, 以及用于各类新型红外光电系统信息识别的凝聚态红外光谱研究等, 是当代红外光电子物理和应用研究的主要问题。红外光电子物理发展的主要驱动力是应用需求和学科自身发展的需求。这两种需求和谐地促进着现代红外光电子物理的发展。窄禁带半导体物理研究的发展正是与现代红外光电子物理研究的发展融为一体。

参 考 文 献

- 汤定元. 1974. 碲镉汞三元系半导体的性质. 红外物理与技术. 中科院上海技术物理研究所. 16: 345
- 汤定元. 1976. 碲镉汞作为红外探测器材料. 红外物理与技术. 中科院上海技术物理研究所. 4~5: 53
- 汤定元, 童斐明. 1991. 窄禁带半导体红外探测器. 见: 王守武主编 半导体器件研究与进展. 北京: 科学出版社. 1~107
- Arias J M, Shin S H, Pasko J G et al. 1989. Long and middle wavelength infrared photodiodes fabricated with $Hg_{1-x}Cd_xTe$ grown by molecular-beam epitaxy. *J. Appl. Phys.* 65:1747~1753
- Blachnik R, Chu J, Galazka R R, Geurts J et al. 1999. Landolt-Boernstein: Numrical Data and Functional Relationships in Science and Technology III/41B Semiconductors: II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds. Edited By U Rössler, Springer
- Capper P (Ed) 1994. Properties of Cd-based Compouands. INSPECT, London
- Chapman C W. 1979. The state of the art in thermal imaging: Common modules. Electro-Optics/Laser 79' Conference and Exposition, Anaheim, California, USA. 49~57
- Dornhaus R, Nimtz G. 1983. The Properties and Applications of the $HgCdTe$ Alloy System. In: Narrow Gap Semiconductors, Spring Tracts in Modern Physics Vol 98. Springer. 119
- Elliott C T. 1981. New Detector for Thermal Imaging Systems. *Electron. Lett.* 17: 312~314
- Faurie J P, Million A, Jacquier G. 1982. Molecular beam epitaxy of $CdTe$ and $Cd_xHg_{1-x}Te$. *Thin Solid Films.* 90: 107~112
- Irvine S J C, Mullin J B. 1981. The growth by MOVPE and characterisation of $Cd_xHg_{1-x}Te$. *J. Cryst. Growth.* 55: 107~115
- Kane E O. 1957. *J. Phys. Chem. Solids*, 1: 249
- Kane E O. 1966. *Semiconductors and Semimetals*. London: Academic press, 1: 75