



红外光电子学研究^{*}

沈学础 褚君浩 陆卫

(上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室 上海 200083)

摘要 红外光电子学是在红外光电技术推动下不断发展的学科,其发展与半导体物理学、凝聚态物理学、微电子学以及光学等的关系越来越密切。中国科学院长期将红外光电子学作为重要发展领域予以支持,在任务带学科的模式下取得了一系列重要成果。文中还对该学科的进一步发展提出了一些想法。

关键词 红外光电子学,研究现状,发展趋势



沈学础院士

红外光电子学属于信息领域的学科。在当今的信息时代,信息获取与处理一直是十分活跃的领域,它直接决定着当前众多高科技领域发展的水平。在信息获取方面,红外光电技术已成为一个国家战略高技术领域水平的标志

之一,同时,从红外光电技术发展中孕育而生的红外光电子学也成为当前备受关注的应⽤基础性学科。

红外光电子学作为技术需求与学科发展的衔接和统一,正表现出越来越明显的交叉科学特征。红外光电子学与微电子学结合形成了当今新一代的红外焦平面探测技术,并随着交叉的深入正在产生智能型和片上系统(SOC)的新一代红外焦平面技术。红外光电子学与低维半导体物理学交叉形成了低维子带物理学分支,并导致了基于子带物理学的新一代红外光电子器件,其中包括已实现实用化的量子阱红外探测器和红外级联激光器^[1-3]。依然是基

于子带物理,通过量子点特殊的少电子系统特性实现远红外波段的单光子探测则成为纳光电子学方面成果的范例。红外光电子学与凝聚态物理学的成果交叉导致了非制冷红外焦平面技术,其中凝聚态材料中氧化物材料热敏特性的巧妙利用导致了这类非制冷红外焦平面的实用化,同时也激发了许多新组分氧化物材料的研究。就总体而言,红外光电子学的发展重点体现在两个方面。一方面是适应红外光电技术发展需求,形成红外探测器技术,特别是对红外焦平面技术有重大影响的科学支撑。可以讲当今红外光电技术的跨代发展都起源于红外光电子器件的新突破。我国空间遥感技术发展的轨迹也已充分体现了这一特征。另一方面是红外光电子学中自身的新概念涌现和学科发展,当前最活跃的课题主要集中在子带物理学方面,特别是微、纳技术的应用导致对光子与电子的能态和位相调控能力不断提高,进而许多最新的相关学科研究成果均有可能被引入红外光电子学而形成新概念材料与器件,量子阱红外探测器、红外级联激光器、THz 级联激光器和单光子远红外探测器等均是典型的范例。当前人们已开始关注光子晶体、自旋电子学、分子电子学等新兴的学科热点与红外光电子学的有效交叉问题。

红外光电子学在领域上主要涉及红外波段电磁波的探测、辐射和传输。由于其在技术应用和学

^{*} 修改稿收到日期:2004年6月22日



科基础方面涉及内容的广泛性,希望在一篇文章中进行全面的描述是十分困难的。为此本文仅对应用牵引和研究发展两个方面的某些专题予以概述,希望能够通过以点带面的方式展示红外光电子学的基本内容与特征。在应用牵引方面将重点关注与红外焦平面技术相关的红外光电子学问题,在研究发展方面将突出子带物理给红外光电子学发展带来的新机遇。

1 国外研究现状和发展趋势

1.1 红外焦平面技术与红外光电子学

为了满足红外信息获取技术发展需求,美国等发达国家在频谱波段上积极探索“无缝隙探测”。在微波/毫米波、可见光/中波红外/长波红外等波段探测方面取得了长足进展,并已形成了以下基本发展态势:

1.1.1 红外焦平面列阵技术

首先在美国、法国和英国等发达国家,基于窄禁带半导体碲镉汞材料的单波段红外焦平面器件技术已经成熟,以 288×4 元长波和 256×256 元中波为代表的焦平面器件已基本取代了多元光导行列通用组件。 256×256 元碲镉汞焦平面探测器已实现工程应用。并已经向更大规模的凝视型面阵焦平面探测器、双色探测器发展。长波器件已达到 256×256 元的规模,中、短波器件达到了 512×512 元甚至 $2\,048\times 2\,048$ 元的规模;长线阵的扫描型焦平面因其在空间对地观测方面需求而受到高度重视,针对不同应用目标, $1\,500$ 元红外中长波、 $3\,000$ 元红外短波、 $4\,000$ 元红外长波以及 $6\,000$ 元红外中、短波长线列焦平面器件纷纷问世。

鉴于碲化汞化学键的脆弱,碲镉汞材料相对另一类成熟光电子半导体砷化镓材料而言,在材料与器件工艺成熟性与可控性方面显得明显不足。为此在上世纪 90 年代初,人们采用能带工程开始尝试基于量子阱中子带跃迁的红外探测器件,希望缓解碲镉汞材料先天不足和工艺成熟性欠佳导致的技术问题。依然是以美国为代表的发达国家在长期积累的碲镉汞焦平面技术基础上,充分利用砷化镓基材料与器件工艺的成熟性很快将量子阱红外焦平

面探测器推到了工程化应用程度。红外长波 256×256 元和红外甚长波 128×128 元器件相继成功,同时由于砷化镓基量子阱红外探测器具有比碲镉汞器件明显优越的抗空间高能粒子辐照能力,在空间红外光电技术应用方面显示出了很强的竞争力。与此同时,由于能带工程在低维半导体结构中给人们带来的优化设计可能性,人们还实现了将量子阱红外探测器与近红外发光二极管的集成,从而可以将所探测的红外光转化为硅探测器可以探测的近红外或可见波段的光辐射,为此将传统红外焦平面技术中部分困难工艺环节通过转换成硅凝视成像器件予以完成,进一步缓解了碲镉汞工艺成熟性不足导致的技术问题。

依然是从应用需求出发,红外焦平面技术发展的另一十分重要的方向是提升器件工作温度。因此,非制冷红外焦平面技术也在近 10 年得到了快速发展。目前,国际发达国家已有能力生产 256×256 元规模的非制冷红外焦平面器件,并在实际应用中得到广泛推广。人们不但发展了基于材料温度特性的硅 Bolometer 和铁电材料热释电或热容性红外焦平面器件,还着力发展了基于微光机电技术的热机械应变式红外焦平面器件。同时通过新型材料的探索,将优异的器件结构和材料特性有效地组合构成性能更为优越的焦平面器件,形成了当前发展的重要方向之一。

1.1.2 红外光电子物理

当前红外光电子物理发展的一个焦点是红外焦平面相关物理问题。如以碲镉汞材料为主要研究对象的窄禁带半导体物理已获得很好的发展,直接支撑了以碲镉汞为代表的红外焦平面技术;而基于半导体微结构、纳米结构能带工程的子带物理也在近 20 年快速发展,有力地推进了以量子阱红外探测器及其它量子器件为代表的新一类焦平面技术;以铁电物理为基础的新型红外探测应用材料与物理研究也在近年变得十分活跃。国际上已形成了若干个系列国际会议,如每 2—3 年一次的“国际窄禁带半导体物理会议”已超过 10 届;每年一次的“国际红外与毫米波会议”也总设有红外光电子物理专



题, 并已超过 30 届; 每年春秋二季均会在美国的 Orlando 和 San Diego 围绕窄禁带半导体物理及其应用方面专题举行 SPIE 会议; 每年美国还举行碲镉汞和相关 II-VI 族材料的物理与化学会议等。红外光电子物理已成为主要研究在红外波段能量范围内电磁辐射与物质相互作用, 研究红外辐射和探测的原理与机制, 探索新的材料和器件, 为红外光电子技术提供科学基础以及直接应用的热门学科。

2 我院的研究进展

与国外的情况相似, 我院的红外光电子学发展也是在应用牵引下逐步发展的。由于碲镉汞的禁带宽度可以随着镉组分变化在宽阔的红外波段调节, 并有优良的性能, 因此它是目前国际上最好的红外探测材料。在汤定元院士组织领导下, 上海技术物理研究所在 HgCdTe 晶体材料的基本物理性质包括光学性质、电学性质、能带参数、晶格振动、表面二维电子气等研究方面取得了系统的结果。这方面的研究工作促进了碲镉汞体材料红外器件在风云系列气象卫星扫描辐射计等空间技术中的成功应用。

随着我国红外光电技术从光机扫描成像向凝视型成像技术的发展以及热成像向光谱成像技术的发展, 单元或多元红外探测器升级换代为红外焦平面器件已成基本发展趋势, 并形成当代红外光电子器件的基本特征: (1) 从器件的规模来看, 是从红外单元探测器发展为大规模红外焦平面列阵探测器, 它可以在红外光学系统的焦平面上对目标实现凝视式观测和成像; (2) 从工作波段上来看, 在研制短波(1—3 μm)、中波(3—5 μm)和长波(8—14 μm)器件同时, 发展甚长波(14 μm 以上)器件, 适应不同目标特征的捕获与识别; (3) 从器件的工作温度上来看, 在研制低温下(液氮温度)工作的器件同时, 发展在室温下工作的非制冷焦平面器件。根据这些新的需求, 上海技术物理研究所又进一步推进了红外光电子学发展, 分别在窄禁带半导体碲镉汞薄膜光电子物理和高灵敏红外焦平面材料器件、低维结构红外光电子物理和半导体量子阱甚长波红外焦平面技术基础以及铁电物理学与非制冷铁电薄膜红外焦平面材料器件技术基础等方面进行了系统研究

与探索。

2.1 窄禁带半导体物理

碲镉汞薄膜材料是研制焦平面列阵红外探测器的关键问题, 是当前红外技术发展的前沿之一。由于含 Hg 混晶材料的特殊物理性质, 碲镉汞薄膜制备不同于 Si、GaAs 等, 在国际上被公认为具有极大的难度和挑战性。上海技术物理研究所重点研究了碲镉汞外延材料的大面积、均匀性问题和原位 pn 结、异质结的生长技术问题。基本解决了碲镉汞薄膜材料组分控制、均匀性、表面缺陷密度、位错密度、掺杂技术等关键问题, 成功获得了 2 英寸以及 3 英寸大面积碲镉汞分子束外延材料, 关键参数与国外主要红外探测器公司水平相当。1999 年美国材料学会的著名刊物《先进材料》(*Advanced Materials*)出版中国专刊, 何力研究员应邀撰写了关于上海技术物理研究所分子束外延碲镉汞的邀请文章^[4]。

在窄禁带半导体基本物理性质研究方面, 解决了带间光跃迁、带内光跃迁、杂质光跃迁、晶格振动和载流子输运方面若干重要疑难问题, 发现和总结了多项实验规律。由于上海技术物理研究所在窄禁带半导体碲镉汞研究方面的国际影响, 褚君浩研究员被聘为已经有 100 多年历史的科学手册《科学技术中的数据和基本关系》(*Landolt-Boernstein*)新版本 III/41B “半导体: II-VI、I-VII 族化合物及半磁半导体”作者之一^[5]。该书收录了上海技术物理研究所关于碲镉汞基本物理性质研究的 16 项结果。其中包括: 碲镉汞禁带宽度的组分和温度关系表达式、禁带宽度的非线性温度关系、禁带宽度的压力系数、电子有效质量、重空穴有效质量、带带跃迁本征吸收光谱、禁带宽度能量附近和以上范围吸收系数表达式、带边附近折射系数表达式、本征载流子浓度表达式、体电子和表面电子的迁移率谱分析、轻空穴和重空穴迁移率谱分析、碲镉汞中砷、铁杂质的能级位置和光电行为, 碲镉汞中空位能级和吸收强度及远红外声子参数和光学常数等研究结果。这些研究结果已经被国际上同行引用近 400 次。

2.2 低维半导体物理

半导体超晶格量子阱等低维结构中的光电子



性质研究,特别是对电子能带与波函数的调控是当前国际上辐射探测物理和光电子物理(包括红外光电子物理)研究的新发展和前沿,是半导体量子阱红外焦平面列阵技术的基础。沈学础院士和陆卫研究员等一批中、青年研究人员选定对相关高科技应用有重要影响的几类微观电子态跃迁过程作为主要研究内容,进行了创新的研究。在研究中,努力发展各种新型光谱实验方法,获得了常规光谱和其它实验方法不能获取的半导体超晶格和量子阱结构中光跃迁过程的新结果,其中包括单量子结构的光电子特性;低维激子及波函数;单量子阱的能态后调控;受限载流子传输的光谱研究;单量子线中的应力效应;量子台阶的电子波函数相干特征;单个 p 型 δ 掺杂结构中受限空穴态;磁极化子与束缚声子的相互作用和半导体量子点光谱等。以这些科学现象和规律的研究为基础,探索了新一代红外探测器及其焦平面列阵技术,解决了多项关键技术,包括功能材料设计与生长;量子阱体系红外光电耦合;量子阱结构界面混合效应;量子阱红外焦平面器件工艺等。

鉴于上海技术物理研究所同时在 HgCdTe 和量子阱红外探测器两方面的工作基础和进展,国际电子材料杂志特地邀请沈学础院士撰写的“HgCdTe 和量子阱结构作为红外探测器的比较”评论文章^[6]在 2001 年被美国夜视技术百年里程碑卷收录,该卷收录了上个世纪 60 篇在光电子学领域具有里程碑意义的论文。

2.3 极化物理

近年来,在信息科学技术和材料科学技术发展的需求下,极化物理逐渐成为新的研究热点。国际上连续召开了 6 次国际极化介电物理学会议(Polar Dielectrics)。极化问题也是制备铁电薄膜非致冷红外焦平面的科学基础。上海技术物理研究所在新型铁电功能薄膜材料方面获得了多项突破。研究结果表明了钛酸锶钡铁电薄膜适合于研制非致冷铁电薄膜红外焦平面列阵探测器。针对该结果美国材料学会通报以“单层厚度对溶胶-凝胶法制备 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 薄膜性质的影响”为题发表专门的评论文章。关于

溶胶-凝胶法制备 BST 薄膜的 P-E 电滞回线和 ϵ -T 介电常数温度谱结果发表后被写入美国的薄膜手册中。采用化学溶液方法生长高度择优取向的 LNO 薄膜的结果发表后受到同行重视,由 *Advanced coating and surface technology* 发表专文介绍。关于铁电材料的晶粒尺寸效应的研究结果也受到同行的关注,并应邀在美国科学出版社出版的 *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* 中编写“ BaTiO_3 纳米晶”专题部分。

3 发展我国红外光电子学的思考

鉴于学科发展的趋势和国家中、近期的需求及红外光电技术跨代发展对核心元器件的直接依赖性,红外光电子学的发展依然需要依靠高端器件技术的牵引和新概念器件的不断涌现。红外焦平面的发展对红外光电技术的影响就是最好的实例。为此,红外光电子学科发展的一个重要牵引方向就是新型元器件技术。

然而要明显地超越我国现有常规工业基础水平,高质量地完成像红外焦平面这样复杂器件的实际应用,我们在努力建设工艺技术平台的同时还要开始建立相应的设计平台。这一设计平台的核心之一就是红外焦平面技术中材料与器件及相关技术的专家系统。环视国际学科与技术发展情况,我们看到美国于上世纪 90 年代下半期,在半导体器件发展的蓝皮书中明确提出发展更高精度的器件建模与仿真技术,结合整个微电子发展的规律,不难看到元器件的真正发展必须有两个平台支撑,即工艺技术平台和能够在理论上预测器件的设计平台。所以我们需要通过多种研究途径来建立这种可对红外焦平面技术乃至具体工艺给予直接指导的基本模型与仿真能力。一旦我们同时拥有了可满足基本技术要求的工艺技术平台和以专家系统为核心内涵的设计平台,我们就有可能在我国现有的相对落后的常规工业基础上做出与国际上可比的红外焦平面器件,实现红外焦平面技术的跨越式发展。

另外,当今科技,包括当代红外光电子交叉学科中全新的概念不断涌现,如光子晶体的提出与实现,这将使人们有可能象控制半导体中电子输运特



性那样控制光子的输运特性,从而使人们有可能类似半导体电子器件设计那样去设计光子器件包括红外光子器件,为红外光电子学的发展提供新的机遇。又如人们运用纳米技术和量子限制能态演示了红外波段的光子计数灵敏度的红外探测器以及在红外甚至太赫兹波段的级联激光器;在充分应用了电子的电荷特性后,将电子的自旋长寿命特性应用到元器件中,提出了自旋电子学的新分支。类似的学科发展新动向还很多,这些新的学科发展成果无疑为红外光电子学的创新发展提供了丰富的矿藏。

主要参考文献

1 Komiyama S, Astafiev O, Antonov V *et al.* Nature, 2000,

403:405.

2 Beck M, Hofstetter D, Aellen T *et al.* Science, 2002, 295: 301.

3 Kohler R, Tredicucci A, Beltram F *et al.* Nature, 2002, 417: 156.

4 Li He, Jianrong Yang, Shanli Wang *et al.* Advanced Materials, 1999, 11: 1 115.

5 Blachnik R, Chu J, Galazka R R *et al.* Landolt-bornstein Group III: Condensed Matter, Volume 41 Semiconductor 2000.

6 S C Shen. Microelectronics Journal, 1994, 25:713.

Study on Infrared Opto-electronics

Shen Xuechu Chu Junhao Lu Wei

(National Lab for infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, 200083 Shanghai)

The infrared opto-electronics is continually promoted by the infrared technology. It shows a strong multidisciplinary characteristic, since it is related with semiconductor physics, condensed matter physics, micro-electronics and optics. The Chinese Academy of Sciences has given strong support to develop the infrared opto-electronics. As directed by the infrared technology application, a series of achievements have been accumulated. According to the development of infrared opto-electronics in China, we propose some suggestions on the further progress in our academy.

Keywords infrared opto-electronics, study, trend

沈学础 中国科学院院士,上海技术物理研究所研究员。1938年出生于江苏省溧阳县。1958年毕业于复旦大学物理系,1981年起任红外物理研究室主任,1985—1989年任中国科学院红外物理开放实验室(后更名为院重点实验室)主任,1989—1993年任红外物理国家重点实验室主任,1993年起任该室学术委员会主任,并担任多个国际学术团体与刊物的领导职务。主要从事固体光谱和固体光谱实验方法等方面的科学研究,取得过多项重要成果。