

红外物理学引言及若干新进展

Progress in the Infrared Physics Research

沈学础

(中国科学院红外物理国家重点实验室, 研究员)

红外是指电磁波谱中或光量子波谱中界乎可见光和微波之间的广阔谱区, 它相应的电磁波长从 0.76 微米到 1000 微米, 光量子能量从约 1 电子伏到 1 毫电子伏左右。

红外物理是研究这一波段电磁波或电磁辐射的产生、传播和与物质的相互作用、接收以及应用的科学, 是凝聚态物理和光学(包括应用光学)相互交叉结合形成的学科。红外物理的研究和发展历史表明, 它是红外光电子技术应用及其他有关高技术应用的物理基础和先导, 有广深的应用背景, 在经济建设、国防建设, 乃至人们日常生活中都有许多重要和直接的应用。

红外辐射和物质的相互作用

——红外物理的一个主要研究领域

红外辐射与物质的相互作用是红外物理的基本研究领域之一。它是凝聚态物理和红外光电子学的交叉和结合, 一方面给凝聚态实验物理研究扩充新内容、提供新方法、创造新成就, 另一方面又形成了红外光电子物理的基础。例如, 固体红外光电效应和热电效应的发现和研究既是固体物理的重大成就, 又导致今日各种红外辐射探测器的出现和应用。各种凝聚态物体的宏观红外辐射、反射和透射特性既反映了物体内部微观的电子跃迁过程和声子跃迁过程, 又是当今红外技术广泛应用的物理背景和依据。正是太阳红外辐射的发现和研究导致今日人类利用太阳能的重大突破。

窄禁带半导体混晶碲镉汞是目前最重要的红外光电子材料, 通过调节混晶组份, 可以获得适用于不同波段的高性能红外探测器。有关碲镉汞的研究已形成了红外物理的一个专门的领域——碲镉汞物理。美国学者每年都要开一次专门的碲镉汞学术讨论会。由于 Hg—Te 键的脆弱及其与 Cd—Te 键之间的巨大差别, 导致这种材料较高的本征缺陷

密度和较高温度下或辐射作用下的不稳定性。这些重要问题长期困扰着碲镉汞的研究者们。近年来的大量研究已经对最终认识这种本征缺陷态成份和结构以及电子态等提供了大量的信息, 并对降低这类缺陷密度的途径提供了多种可能性和尝试机会。

近年来对碲镉汞混晶的表面态与界面态、无序引起的三维电子局域现象、三维电子气和空穴气行为、二维和一维情况下的量子尺寸效应、纳米尺寸情况下的量子相干现象, 以及其他介观物理问题也有众多研究。由于碲镉汞混晶有可调的窄禁带宽度、很小的电子有效质量和很高的迁移率, 许多量子现象在碲镉汞材料及其微结构中更容易实现, 即实验上在并非十分苛刻的条件下就有可能观察到这些量子现象, 因而为研究这类问题提供了一种重要的并可调节的标本材料。另一方面这些研究又更加深了人们对这一重要红外材料物理问题的认识, 促进了这一材料更广泛、更高水平的应用。

半导体超晶格和量子阱结构的红外光电性质及其他相关物理现象的研究, 是近年来红外物理和量子阱物理研究的一个共同热点。这些研究正促使半导体超晶格和量子阱结构成为新一类重要的红外光电子材料。尽管超晶格、量子阱的研究兴起已有约 20 年的历史, 但直到 80 年代中期, 人们才在实验中证实量子阱子带间电子跃迁可以和红外辐射有强的耦合, 因而有可能用于红外辐射探测。这里调节超晶格、量子阱结构的周期和势垒高度等能带工程手段起着碲镉汞混晶中调节组份相似的作用, 即实现不同波段红外辐射的探测。这样, 从 80 年代中期以来, 尽管只有 6~7 年时间, 有关的物理研究和应用研究接连取得新结果, 以至在若干重要应用领域中, 多量子阱材料已与碲镉汞材料相匹敌。除了带间跃迁外, 人们还积极研究不同超晶格结构和不同跃迁过程与红外辐射的耦合相互作用及相关物理问题。例如调制掺杂超晶格结构, 含镉窄禁带超晶格和量子阱结构, 以及某些应变超晶格

中带间跃迁过程和红外辐射的相互作用,空穴子带间跃迁用于红外辐射探测的可能性,以至尝试用超晶格结构和能带工程方法形成稳定的灰锡结构,或锡/锗超晶格结构,并使其零禁带扩展成窄禁带,而使这类材料和结构成为新的高性能的红外光电子材料。所有这些研究都可能导致量子阱结构和能带工程方法在红外辐射探测应用方面的重大突破。此外超导材料用于红外辐射探测的研究也引人注目。

除以发现和寻找新型红外光电子材料为应用背景的红外辐射与物质相互作用物理问题研究外,红外辐射与不同维度凝聚态物质中各种低能元激发,如自由电子及电子气、局域电子、声子,各种激子、孤子、自旋波量子以及极化激元等之间的相互作用研究一直是凝聚态物理和红外物理研究的重要内容。尤其是各种不同激元态,或同一激元的不同状态之间的杂化耦合及其与红外辐射间的相互作用的研究可以使人们对凝聚态物体中某些微观过程的认识提高到新的阶段和开辟新的研究领域。早年关于红外光子和极性结晶固体中纵光学声子耦合形成的杂化的极化激元曾引起人们极大的兴趣和深刻揭示了固体中准粒子间相互作用过程以及介电性质的真实物理过程。对半导体中的杂质电子态,近年来利用强磁场下的红外光热电离光谱方法已有可能测量相同宇称的不同激发态的波函数间的杂化混合,从而更直接地证实了固体中激元状态的杂化和波函数混合是确会发生的微观物理过程,而非主观臆测。

焦平面列阵的相关物理问题

——当代红外光电子物理的一个热点

迄今的红外探测系统基本上是将单个的红外探测器放置在红外光学系统的焦点位置上,从而被动地接收、探测来自目标(人、物、地球表面……)的红外辐射信号。如果要获得目标的红外图象,则必须用光机方法或其他方法扫描目标,这导致探测灵敏度的严重蜕化。不难设想,如果在光学系统焦点位置上放置的不是单个探测器,而是探测元的列阵,情况将根本改观。这种放置在红外光学系统焦点平面位置上、可直接获得目标红外图象的探测器列阵常被称作红外焦平面列阵。不难看出,这种焦平面列阵的使用将极大地提高红外系统的灵敏度和分辨率,从而开创红外光电子技术应用的新局面。这样红外焦平面列阵的研制成了当前红外电子研究的一个热点和核心问题,而与此相关的物理问题研究也成了当今红外物理的一个重要课题。目前用于红外焦平面列阵研制的红外材料主要有CdHgTe、InSb、PtSi、GaAs/GaAlAs多量子阱等,它们有可能用于制作不同红外波段的列阵,但又都有

不令人满意之处。材料均匀性、界面态、深缺陷中心、量子效率、与红外辐射耦合行为等方面的问题困扰着从事应用研究和基础研究两方面的研究工作者。从红外物理角度来说,一方面是要弄清现有材料的有关物理问题和补救办法,另一方面是寻找新的更令人满意的材料或结构,并研究这些材料和结构的物理特性,尤其是红外光电子物理性质。

物体的红外辐射和发射

——红外物理的另一个重要领域

任何物质,只要不是处于绝对零度,都无时无刻不在进行着红外辐射,例如人体就是一个不停地发射着红外辐射的辐射源,并且其辐射的中心波长约10微米左右,这就是本世纪初普朗克借以发现和提出量子论的热辐射现象。除热辐射外,物体还可以以电子跃迁(包括自发发射、激光发射、自旋反转喇曼散射和运动电子辐射等)方式发射光辐射,其中包括红外辐射。物质这种辐射行为(尤其是红外辐射行为)的研究构成了红外物理的另一个重要领域。

物体热辐射行为的研究是一个古老的课题,但今天有其新的内容和含义。这种新含义之一是人工地改变和合成有特定辐射行为的材料和结构。其中简单的例子是,人工合成的高红外辐射材料构成了今天各种红外加热应用装置的辐射元,而低辐射材料或结构则构成红外隐身材料或装置的基本组元而在国防建设中应用。

至于以电子跃迁为基本微观过程的红外辐射现象研究,则无论是红外激光、运动电子辐射或其他形式的红外发光现象都有深刻而丰富的物理内容和重大的潜在应用价值。在过去20年中,无论是远红外气体激光的发现、研究和应用,还是Ⅳ—Ⅵ族半导体混晶红外激光发射的发现、研究和应用,都是红外物理研究的重要内容,并促进了红外物理其他领域的发展。近年来,自由电子激光和同步辐射的红外辐射源的实现对红外物理,尤其是红外光谱学有十分重要的意义。自红外光谱学产生和广泛应用以来,人们一直在寻求更强的红外光源和更灵敏的红外探测器,以提高红外光谱测量的灵敏度和分辨率。但在过去几十年中,尽管红外探测器的灵敏度有了几个数量级的提高,并且迄今已近乎达到可能的极限状态,但连续波谱的红外辐射光源却一直停留在通常的热辐射源状态,而无实质性进展。不难看到,自由电子激光和同步辐射红外辐射光源的实现会使红外光谱学的红外辐射光源根本改观,强度将有数量级的提高,因而可以研究更微弱的红外跃迁过程或介观尺寸范围内的红外跃迁过程,并可能促进红外波段非线性光学研究,从而使红外

光谱学发展到一个新阶段,并使红外物理其他领域和凝聚态物理研究得益匪浅。

红外物理与其他学科的交叉 ——新学科的孕育和产生

近代自然科学发展史表明,不同学科的交叉结合常常是富有成效和充满创造机遇的,红外物理与其他学科的交叉结合也是这样。红外物理实验方法在天文学中的应用,红外物理和天文学的交叉结合就是一个生动的例子。早在红外傅里叶变换光谱学方法创立之初,人们就将之与天文望远系统相结合,用来观察和测量宇宙星体和天际分子云的红外辐射及红外光谱,从而发现和证实了恒星的衰老过程和天体的形成过程。随后,60年代以来,人们对宇宙背景的热辐射行为进行了深入的实验测量和研究,揭示宇宙背景也有热辐射发射,即远非绝对零度背景,并且其热辐射行为,若不考虑光谱细节的话,和一定温度(3K左右)的黑体相差不远。从而为大爆炸宇宙学提供了坚实的实验证据,或者说,使大爆炸宇宙学从科学假说变成科学学说,而最早测得宇宙背景辐射行为的两位科学家也因此获得诺贝尔物理学奖。关于红外物理与天文学交叉结合的重大成就,还可以举出很多,在此不一一列举,但可以指出,这一交叉结合已形成了一个活跃的新学科——红外天文学。

红外物理与地球科学以及生命科学交叉结合的成就也是十分深刻的。利用凝聚态物质红外辐射、反射特性和其内在组份、结构、温度以及微观过程关系的普遍结论,不仅可以在实验室内鉴别各种天然矿石和分析其有用含量,而且有可能在野外自

然环境中探测某些重要矿产资源、能源及其他自然资源的存在,从而使红外物理成为这一领域应用研究的重要物理基础。此外利用红外探测和成像方法获得大气云图及其随时间的实时变化,测量大气层温度分布变化及相关数据等已成为当代世界各国气象预报最主要的依据。红外物理与生命科学的交叉结合或许是最诱人的边缘学科,除各种红外物理实验方法在生命科学研究中的应用外,有人猜测,有新陈代谢功能的生物学大分子与通常有机分子的根本区别之一可能是前者有特征性的振动模式和跃迁过程,并进一步推测,这种振动模式或跃迁过程对应的能量子和远红外光子相近。这一推测曾促使不少人用红外物理方法寻找这种振动模式和跃迁过程。虽然这种尝试至今尚不能证实有肯定结果,但已促使人们发现了非氢键相互作用在生物学分子结构中的重要作用。

红 外 物 理 ——有广深应用背景的物理学分支

红外辐射,首先是在军事和国防方面有重要应用,它的发展也确曾是和军事、国防紧密相联系的。但发展至今,红外物理和以红外物理为基础的红外光电子学、红外高新技术在国民经济和人民生活各方面的应用日益发展扩大。它们今天的应用已主要是国民经济和人民生活方面的,不论上面提到的天文、气象、地球资源探测还是未提到的灾害预报、通信、工业自动控制等方面,以及人们日常生活中如防盗、报警、家庭自动控制、节水节能等方面都有它的应用。红外高新技术应用正在成为国民经济的一个重要产业。

(责任编辑 宋义荣)

科技动态

1993 年全国科学基金申请已达 17373 项

[本刊讯]本刊从国家自然科学基金委员会获悉:1993 年国家自然科学基金委员会共收到来自全国 30 个省、区、市 1183 个单位的科学基金项目申请 17373 项,申请总金额超过 13 亿元,比 1992 年增长 94.8%。其中:自由申请项目 13548 项、106438 万元,高技术探索项目 549 项、5478 万元,青年科学基金项目 2679 项、18216 万元,地区基金 597 项、3774 万元;其中,基础研究占 26.5%,应用基础研究占 73.5%。

全国申请科学基金的科技人员达 10 万多人次,73.9%的项目负责人为高级科技人员,年龄在 51~60 岁的人员占 43.2%,35 岁以下的占 25.6%。在申请项目中高等院校占 74.1%,科研单位占 25%,其它单位占 0.9%。属于科学前沿的项目和应用前景明确的项目都有显著增长。

今年,通过《1993 年国家自然科学基金项目指南》公

布了“八五”期间的第三批定向申请重点项目 82 项,其中数理科学 25 项,化学 3 项,生命科学 24 项,地球科学 7 项,材料与工程科学 16 项,信息科学 5 项,管理科学 2 项。这些项目受到全国各科研单位和科技人员的极大关注,现已收到申请 268 份。

《国家自然科学基金“八五”重大项目指南(四)》于今年二月初公布,并受理申请,目前受理工作正在进行。

今年对科学基金各类申请项目的评审坚持“控制规模、提高强度、拉开档次、支持创新”的方针。计划资助面上项目 3354 项,其中,自由申请项目 2525 项,青年科学基金项目 560 项,高技术探索项目 130 项,地区科学基金 139 项。平均资助强度可由 1992 年的每项 5.04 万元提高到约 6 万元左右,并将保证一部分可望有较大突破的最优秀的研究项目获得较充足的经费支持。

(责任编辑 刘先曙)