

激光与物质相互作用的研究

叶佩弦 张道中

(物理研究所)

一、引言

六十年代初激光的出现不仅从根本上改变了光学的面貌,而且对整个物理学、化学、生物学及许多工业部门的发展也产生了深远影响。如果说,在激光出现的最初二十年中,人们的注意力还集中在激光本身的特性,那末到八十年代,人们已经更多地关心激光和其它学科领域的交叉。大家都在考虑,利用激光的固有特性,把激光作为一种工具或手段,我们能够做些什么?这样做反过来对激光的发展又会有什么影响?事实证明,这种想法会给其它领域的研究注入新的活力,带来深刻的变化。激光与物质以及材料科学的交叉正是其中的一个重要方面。

激光与物质相互作用的研究主要包括:探索激光与物质相互作用出现的各种效应及其机理;开拓激光在物性研究中的应用,逐步将激光发展成为研究和探测物性的重要手段;探索激光在改变物质的性质,状态等方面的作用;探索产生激光的新物质和新机制。无疑,这是一个激光与物理学、材料科学、化学、生物学等学科交叉并相互渗透的十分重要的研究领域。它在材料,信息和能源等方面都有很强的应用前景。由于不断采用新技术,新设备,强调综合利用极端条件,因此,各种新现象,新效应,新方法不断涌现。当前世界各国均很重视这些研究。美国的许多重要实验室及著名的大学都有这方面的工作,法国、西德、苏联及东欧各国也为此投入了大量的人力、物力。

二、激光与物质相互作用研究的学科基础

激光与物质相互作用研究的发展主要是基于以下几门学科:非线性光学,激光光谱学以及激光化学。非线性光学阐明激光与物质相互作用的过程和特点,预测可能出现的新效应。激光光谱学提供应用激光研究物质微观结构和动力学过程的方法。激光化学则是用激光改变物质的性质和状态的依据和手段。这些学科近 10 多年来都有了飞速的进展。

(一) 非线性光学

非线性光学是激光出现后才蓬勃发展起来的新学科。它的任务是探讨、观测、研究和阐明激光这种强相干光作用于物质所出现的各种特有的光学效应——非线性光学效应,并利用这些效应去研究物质本身的性质。

从 Franken 在石英晶体中观测到红宝石激光的二次谐波算起,非线性光学已有二十多年的历史了。目前,它的研究对象已扩展到气体、蒸气、固体、液体、液晶、等离子体等几乎所有的

物质。出现的效应也是花样繁多的,既有稳定的效应,也有瞬态的效应;既有二阶的效应,也有三阶以至更高阶的效应。与这些效应相联系的微观过程也是多种多样的,既与原子、分子的能级结构及它们之间的碰撞和弛豫过程有关,又与光和固体中的载流子、激子、声子及各种电磁极化耦合子的相互作用有关。

近年来,非线性光学发展总的趋势一方面是继续致力于对各种非线性光学效应的深入探讨,不时发现一些新的效应。例如,对表面非线性光学的研究及对光子回波的研究都有所进展,出现了光学双稳态这个看来是很有应用前景的效应,它和光学位相共轭效应一起成为近年来的主要研究课题。另一方面是陆续将比较成熟的效应转移到应用领域。例如,将光学倍频、混频、参量振荡及受激光散射等用来开拓相干光的新波段,发展可调谐激光技术。同时,发展各种基于非线性光学的光谱技术,使非线性光学与物质研究日益紧密结合。

特别值得指出的是以下几方面的进展:

1. 表面和界面的非线性光学。随着表面物理和化学研究的日益重要,表面波和表面的光学探测研究也活跃起来。人们观测了表面波的倍频、混频及相干反斯托克斯喇曼效应。在研究喇曼散射表面增强现象的同时,也开展了非线性光学效应表面增强的研究。十多年前观察到的表面二次谐波反射效应,最近又被重新加以探讨并用来研究表面和界面的性质及表面吸附的物理和化学特征。随着超晶格结构的用途日益为人们注意,有关超晶格的非线性光学也正在迅速发展。

2. 光学双稳与非稳的研究。正如非线性电子器件的出现在电子学发展中起过重要作用一样,光学双稳态的出现正在使光电子学的发展迈出决定性的一步。以此为基础的光学限幅器、光学微分放大器、光开关、光学逻辑和存贮元件等已经或即将问世。这对于光通讯及光计算机的发展无疑将会有重要影响。一些光学非稳现象,如自脉动和混沌的出现,不仅引起了物理学家的兴趣,也正在开辟新的应用途径。

3. 光学位相共轭的研究。简并四波混频的发现使光学位相共轭的研究有了突破性的进展。目前,它和布里渊效应一起被认为是获得位相共轭波的最好方法。由于在消除位相畸变及改善光束质量方面的特殊能力,光学位相共轭在自适应光学、光通讯、改进大能量激光器光束质量等方面都有重大的应用前景,已引起国外许多实验室的密切关注。

4. 非线性光谱技术的研究。多频共振四波混频的理论和实验研究,压力感生的四波混频中额外共振现象,各种光子四波现象的相继出现,非相干光光子回波的理论和实验都大大地丰富了光谱学中的非线性光学方法。在光谱的高分辨探测和物质的超快动力学过程的探测方面都将发挥重要的作用。

5. 扩展相干光波段的研究。除了利用传统的倍频、混频及参量振荡方法之外,近年来大力开展了用四波混频,反斯托克斯激光等方法产生紫外,真空紫外和红外区域的激光及其调谐技术的研究,并获得了实用性的成果。

(二) 激光光谱学

激光光谱学的任务是充分利用激光的高光强、高单色性、相干性和方向性,解决传统光谱学难以解决或有待解决的一系列问题。

近二十年来,激光光谱学发展的总趋势,一是光谱分辨率愈来愈高。以气体为例,从消除多普勒加宽开始,继而消除压力加宽,原子渡越时间造成的加宽及二级多普勒加宽,取得了惊人

的进展。目前,已在向超越自然线宽的超高分辨光谱发展。二是时间分辨率越来越高。随着激光锁模技术和其它超短激光脉冲技术的发展,开展了超短脉冲的光谱学研究。目前,已可在 $\sim 10^{-14}$ 秒的时间分辨能力下探测各种微观动力学中的超快过程和各种不稳定物质的快速变化过程。三是光谱测量的灵敏度愈来愈高。目前,在激光光束作用区内可测到的原子数已小至 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。

激光光谱学的成就为广泛开展激光与物质相互作用的研究,特别是应用激光探测物性,提供了重要的、高灵敏和高分辨的手段。

二十年来发展了形形色色的激光光谱方法。例如,用激光作光源的消多普勒加宽光谱方法;饱和光谱和偏振光谱法;双光子光谱法;光学 Ramsey 方法;陷阱原子光谱法;喇曼增益与逆喇曼光谱法;瞬态相干光谱法;多光子电离光谱法,光电流光谱法等。这些方法都以各自的特点在不同的范围,不同的情况下发挥作用。

在利用激光光谱法研究物质的结构和物性方面也取得显著进展。

(三) 激光化学

激光化学是激光出现后产生的一门重要学科,它主要研究如何用激光选择性引发和控制化学反应的进程。众所周知,激光具有高度的单色性,激光的能量可以有选择地输入到原子分子中去。如果对混合物中不同分子类型具有选择性,那么就能非常有效地引发和控制化学反应,这已为实验所证实。例如,在激光分离同位素和激光分离稀土元素的实验中,化学活性完全相似的分子,当其中某一种受激,另一种不受激,两者将具有不同的化学反应活性,因而出现不同的反应过程。如果选择性是对复杂分子内不同化学键的运动模式有效,则人们几乎可以自由地剪裁分子,制造出定向生长的分子化合物,这无疑更具有吸引力。当然,由于分子内不同模式之间的相互耦合,能量保持在特定模式上的时间极短,要真正实现能量的这种选择性输入还有许多理论和实验上的困难。但无论如何,激光化学在它的最初阶段已显示出强大的生命力和巨大的应用前景。

近年来,利用激光诱导化学反应,在同位素分离、纯化材料、化学合成、激光敏化热解、激光诱导链式反应及激光催化活化等方面都已取得重大进展。在化学反应过程的激光诊断和监控方面也做了不少尝试,发展了多种方法。特别应该指出的是近来半导体材料的激光处理发展很快,诸如激光退火、激光沉积、激光蚀刻及激光重结晶等均取得了进展。很有可能在超大规模集成电路,多层体积集成电路和薄膜太阳能电池等制造工艺上取得突破。

三、激光与物质相互作用研究的主要内容

激光与物质相互作用研究的内容是相当广的。根据当前国际上发展的趋势和中国科学院的情况,我们认为应注意以下几个方面。

(一) 激光与等离子体相互作用的研究

这方面的研究将提供激光核聚变研究中最重要科学依据,是当前强光与物质作用的前沿领域。由于处在超高光强,超快时间及超小空间这种极端条件下,这个作用过程具有强烈的非线性特性,是产生 X 射线激光及实现新型激光粒子加速器的重要学科基础。

(二) 激光与新型材料的相互作用

新型材料及材料的新状态(非晶态、准晶态等)的研究和发展,直接服务于国民经济。对工业,尤其是高技术工业的发展有着极其重要的意义。它一直是中国科学院的一个重要发展方向。而用激光的高强度、高相干性的特点去探测材料的性质,状态,并进一步使之发生变化,无疑是材料科学研究中的一个相当值得注意的方面。具体研究内容有:1. 新型激光晶体和非线性光学晶体的探索及性能研究。这对发展实用的激光器件有重要意义。2. 激光与单晶、单晶光纤、微晶、液晶、准晶,非晶态物质以及各种半导体材料作用的研究。除在通常条件下的作用外,应特别注意在各种极端物理及化学条件下的作用机理,并发展相应的理论模型。3. 激光与界面、薄膜的作用,激光在表面及界面研究中的应用。研究激光在表面和界面产生的各种非线性光学效应,如谐波发生,喇曼增强效应等,并用以探测表面的状态;表面分子的吸附,蒸发;表面扩散及分子团的形成情况等。发展灵敏度高而设备又简单,既可作位置分辨又可作时间分辨的表面测量方法。研究激光与超晶格相互作用所产生的各种效应。4. 激光对材料的改性及破坏机理的研究。例如,晶体、玻璃、薄膜及金属材料的激光损伤机理;金属包层与基底金属结合带形成的原因;半导体材料的激光退火及熔化等。

(三) 激光与原子分子的相互作用研究

激光已发展成为原子、分子物理的主要研究手段之一,反过来,激光与原子分子作用的研究又是探索新的激光物质,新的激光谱线和新的激光机制的基础。

(四) 激光化学及激光生物学研究

这是一个激光物理与化学、生物学交叉的领域。它的兴起和发展已经对化学和生物学产生了巨大影响。进一步深入研究将对使化学和生物学科从唯象或半唯象的状况转变成精密科学起重要推动作用。具体研究内容有:1. 选择性激光化学。利用激光的单色性进行选态光化学研究;激光引发链式化学反应的机理及其在新化合物合成上的应用;激光增强催化过程的研究。2. 产生粒子数反转的化学反应。用激光光谱方法研究化学反应中粒子在各能级上的分布及转移过程,以获得在可见波段或更短波长的高功率化学激光器。3. 用激光进行化学动力学及化学反应中弛豫过程的研究。通过激光与化学反应的反应物或生成物的相互作用,了解化学反应的详细过程,特别是能量在产物中的分配和态-态反应速率及它们的弛豫情况。4. 激光化学沉积、蚀刻、渗杂及超微粉合成。通过激光与气相化合物的作用产生特殊用途的各种薄膜,颗粒均匀的各类超微粉,特别是各种耐高温的陶瓷超微粉;在半导体表面进行用于大规模集成电路的极其细微的花样的刻蚀或修补;对各类材料进行渗杂以提高其性能。5. 生物大分子快速瞬态过程及其机理研究。利用激光超高分辨和超快速作用的特点,研究生物大分子的结构,弄清生命体系生物学活力和其它生物学特征的起源及其与组成分子的基本物理性质的关系。与医学有关的重要问题,如血卟啉光化学反应治疗癌症的机理等。

(五) 激光用于某些极端条件下基本物理过程的研究

这是一个物理学各分支学科相互交叉的前沿领域。它的兴起不仅对诸如激光物理,原子分子物理和凝聚态物理等已有的学科有巨大影响,而且对形成新的物理学研究领域,新的学科分支起促进作用。具体研究内容有:1. 低温、高压、强磁场、强电场及强激发下物质与激光的相互作用;研究在这些极端条件下物质特性的改变及其规律;发现各种可能出现的新的光学效应。2. 高度非线性效应的研究。例如,系统从稳定状态向混沌状态的变化条件及规律;激光与介质作用时,光谱宽度的超加宽现象;强共振光作用下,原子分子荧光发射的特性。3. 相干瞬

态效应。超荧光、光学孤立子等的研究。4. 有重要应用背景的非线性光学效应。如,用四波混频等方法获得无畸变光束的相位共轭效应;具有作为光计算机高速元件和逻辑元件潜在可能性的光学双稳现象及相应的工作介质的研究等。

四、小 结

激光与物质相互作用的研究不仅在促进学科的发展,特别是促进各个交叉领域的发展有重大意义,而且能给应用和发展研究提供广阔的前景和大量的新项目,直接为工农业及国防的现代化服务。

可以预料,光学双稳态现象及其工作介质的研究将为下一代计算机奠定基础;新型晶态及非晶态光纤材料的研究将为光纤通讯的广泛应用创造条件;激光化学沉积和蚀刻的完善和推广应用将使微电子学和集成光学的工业生产发生深刻的变化;用激光化学合成超微粉技术制备的各种耐高温精密陶瓷将在航天及汽车工业的应用中获得巨大的成功;激光催化及激光诱发的连锁反应的研究成功将极大地推动石化工业的现代化;激光在生物系统及医学上的应用研究将对生物工程的发展具有重要的意义。我们相信,今后的十至二十年将是激光与物质相互作用这个领域里基础及应用基础研究十分活跃的时期,同时也是逐步把研究成果向国民经济各个部门推广并真正取得效益的时期。