

自然科学学科发展战略研究报告之六: 光学和光电子学(上)

Strategic Research on Natural Science Disciplines: Optics and optoelectronics (First Part)

国家自然科学基金委员会

编者按: 由于篇幅较长,自然科学学科发展战略研究报告之六:光学与光电学将分两次刊登。

光学是物理学的一个分支。经典光学以电磁辐射本身为研究对象,近代的发展使光与物质的相互作用成为光学更重要的研究内容。今天的光学已渗透到各个科学技术与应用领域,成为一门蓬勃发展的新兴技术,不少分支已形成相当规模的新兴产业。

光电子学是光学与电子学相结合的产物。它将电子学使用的电磁波频率提到光频,产生了电子学不能实现的许多新的功能,成为信息科学的一个重要方面。

一二百年以来,以几何光学和物理光学为基础,形成了各种光学仪器和设备,对人类认识世界产生了重大影响。在现代,技术光学仍然是一切光学和光电子学的重要基础。

光探测器的发展对光学技术也产生了很大影响,使不可见光的观测成为可能,是光电子学的基础之一。

激光的某些卓越特性,推进了物理学、化学、生物学的研究,加深了对物质及其运动规律的认识,已经和正在形成一些新的学科分支,如量子光学、激光光谱学、非线性光学、激光化学、激光生物学等。

电磁辐射本身还有许多方面尚待深入认识。如相干态和光子统计、压缩态、集体辐射和吸收过程、量子干涉现象、激光偏转和激光冷却等,都是近年来量子光学领域广受人们注意的问题。

基于激光的单色性将过去的光谱分辨率提高数千倍以上,不单使我们能够对原子和分子的能态有更精确的了解,而且能够对决定能态的物理

理论的正确性作出判断。

由于激光具有很高的单色亮度,从而产生种种非线性光学现象和非线性光谱方法。和频、差频、四波混频和参量过程以及光学双稳等非线性光学现象可以与电子学类比成为光频电子学的基础。

激光诱导荧光和光致电离的检测灵敏度可测到单原子(分子)存在,并且可确定其能态,从而有利于化学反应动力学的研究及催化过程的研究。

激光生物学十分不成熟,虽然已经有很多激光诱变的现象,但机理还很不清楚。

激光可以形成皮秒—飞秒脉冲,超短脉冲激光可以用来研究物质中发生的超快物理、化学过程,还可能形成超快光电子器件和技术。

激光聚变的探索已进行了20多年,理论上曾多次预言用不太大的装置可实现得失相当,但都不成功。1988年美国报道用核爆X射线模拟激光聚变,认为10兆焦耳激光可以驱动聚变产生出1000兆焦耳核能,推动了国际上激光装置的升级。现在国际上最大装置是美国的Nova(0.1兆焦耳),我国的最大装置是“神光”(1千焦耳)。

用激光选择激发以产生特定化合物,已经有不少成功的例子。但除激光分离同位素外,都由于价格高,尚未成为产业。以铜蒸气激光激发染料激光为基础的分离铀、钚,一些先进国家已作为工业技术开发。

用激光进行材料加工(切割、打孔、表面热处理和改性等)或医疗手术都已是十分成功的应用。材料加工的另一个领域是集成电路工艺,在激光

辅助下进行刻蚀、掺杂、沉积、退火、整修电路、阻值微调等等。

激光若能在远距离外形成高功率密度,就可作为一种定向能武器。但在千公里处产生兆瓦/厘米²所要求的激光亮度远远超过现有激光水平,看来离目标仍然十分遥远。但用激光使仪器致盲,用脉冲激光测定远目标距离,用激光引导导弹、炸弹、炮弹等战术武器多数已很成功。

光与物质的相互作用,涉及极其广泛的基础研究和应用开发领域。光之所以能作为信息载体,也是由于物质可控制和改变光的形态,光也能改变物质的形态。光电子学同样以光与物质的相互作用为基础。由于信息对人类社会影响重大,光在信息领域的应用自然就成为重要的分支,而且有些方面已经形成大规模的产业。

光纤通信以低损耗石英光纤和半导体激光为基础,已经部分替代电缆通信成为重要产业。中继距离为70公里、数据传输率达1吉比特/秒量级的系统已实用化,已建成长达6 680公里的海底光缆。进一步的发展大致有两个方面:一是充分利用现有技术发展应用系统,如综合业务数字网(ISDN)、专用局域网(LAN)等;一是发展新器件、新技术,大幅度提高信息率,增大中继距离。

由于光通信、光纤传感等技术的迅速发展,作为其基础的纤维光学、导波光学也引起人们广泛重视。

光盘存储的基础是光记录介质和精密伺服系统。采用不可擦除记录(烧孔)介质的音象设备(CD唱机、LD电视)和文件存档系统已经形成重要产业。其中文档系统随办公自动化和档案量剧增而日益重要。由于存储密度高,而且工作时不接触,从而长寿可靠,可擦除重写的光盘将部分取代磁带和磁盘的市场。

光在信息领域的另一产业是图象显示和图象复制设备,即激光制版印刷、激光分色、激光打印、激光复印、激光传真。它们已经改变了印刷业的面貌,并改善了图象输出的速度和质量。光敏器件(CCD、光导鼓等)的改进,将进一步推进这一领域的发展。

在显示技术方面,液晶大屏幕显示将会替代阴极射线管,成为下一代电视的主流。

光在信息领域中的最重要的潜在应用也许是用光学方法处理信息。光学方法可以同时并行处理二维信息;容易以模拟计算机方法实现积分变换之类的运算;用光学方法还可演示神经网络的图象识别和复原的功能;已经提出过光学数字计算的多种结构和算法,等等。要使光信息处理的可能变为现实,首先要发展光电子器件。

人脑及视觉系统是世界上最复杂的、具有实

时处理大量空间和时间信息的智能信息处理系统。生理光学以人类的视觉作为研究对象,显然对人类的实践十分重要。对视觉的机制和结构的了解,也会有助于机器人视觉、图象识别、图象理解、神经网络等的研究。

光学与光电子学的一个特点是应用的范围非常广泛,基础理论和技术应用紧密联系。60年代激光问世后曾有人怀疑它的应用价值,以为它只是科学家手中的玩具,但是今天人们已经普遍地认识到它是极有用的工具。光学与光电子学的应用已遍及各个领域,如空间、能源、材料、微电子、生物工程、化学工程、医疗、环境保护、遥感、遥测、精密加工、计量、通信、印刷以及军事等领域。

1989年,全世界光电子技术产业规模已达450亿美元,预计1995年为700亿美元,2000年达1 030亿美元。因此人们认为光学与光电子学将成为下世纪初的一个大骨干产业。

在人类的文明史中,新效应的发现、新概念的建立、新原理的提出,往往会对一门学科、一系列技术,乃至整个社会生活带来巨大影响。光学与光电子学的发展明显地证明了这一点。一方面,它迅速地由实验室走进办公室,最后进入千家万户;另一方面,它的研究又深化了学科的知识,丰富了研究内容。本世纪初,光学的研究成果促进了相对论和量子论的形成;今天,光学与光电子学的最新成果又为基本理论的创立和验证提供了条件。

光学与光电子学是一门研究内容极其广泛的科学技术,并且正处于不断向其他科技领域渗透、扩展之中。要全面论述其发展而无所遗漏是难以做到的。本文仅讨论12个项目的发展战略,它们只属于光学与光电子学中的基础研究及部分应用基础研究。有些项目,虽属基础或应用基础研究,但需要国家专项投资的,没有列入。如激光核聚变、同步辐射等。

一、量子光学

量子光学研究光场的量子性质和光与物质相互作用中的量子现象。它的研究成果深刻地影响着光学和光电子学以及原子分子物理、量子统计物理等学科的发展。

光场的量子性质是光场的基本特征,但对它的认识近十年才逐步深入。人们已提出了一种新的光场量子态——辐射场的压缩态。研究单原子发光的统计性质,了解原子与场相互作用中发射光子的基本过程,对于认识光与物质相互作用的规律十分重要。

光与物质相互作用中光子动量传递是量子光学研究的另一方面。光与原子或离子相互作用,足

以控制原子或离子的运动。最成功的应用是激光冷却和囚禁原子和离子的研究。利用超冷原子可以进行高精密度的基本物理常数测量,验证基本物理规律。另外当原子气体冷却到 10^{-6} K时,原子的波动性明显的表现出来,从而提出了一门新的科学——原子光学。

我国量子光学研究虽然起步较晚,但已在不少重要方面取得了可喜成果。在非经典场性质方面做出了一些具有特色的工作。近几年我国建立了几个设备条件好的研究实验室,培养了一支可进行量子光学研究的科研队伍,为开展量子光学研究打下了良好的基础。

根据国际上量子光学发展的动向和我国的具体条件,应着重开展以下两方面的研究工作:

1. 非经典光场研究。最重要的研究课题是压缩态光场产生和传输规律和探测方法的研究。另一个重要内容是单原子发光研究和腔内少数原子相互作用研究。光学双稳与混沌也是值得研究的内容。

2. 光子动量传递研究(光的力学效应)。最重要的研究内容是激光冷却和囚禁气体原子和离子的研究。主要研究原子的波动性、原子物质波的衍射和干涉以及原子干涉仪等。

二、激光光谱学

激光诞生以来,尤其是调谐激光器问世后,光谱学经历了一次革命,把光谱分辨率、灵敏度、精确度以及时间分辨率推进到新的高度。10多年来,用激光光谱技术有效地消除了多普勒加宽,把分辨率提高了 10^6 量级以上;采用选择性激发、激光感应荧光技术及共振多光子电离等方法,把灵敏度推进到检测单个原子或单个分子水平;由高频率稳定激光器发展起来的新的光频计数方法,重新定义米尺,把准确度提高到 $10^{11} \sim 10^{13}$;超短脉冲激光器的发展,时间分辨率到达皮秒、飞秒量级。这一系列新光谱技术的发展,不仅进一步丰富了原有原子、分子以及固体的光谱数据,而且开拓了很多新的研究领域,成为物理学、生物学、固体材料、表面科学等研究的强有力手段。

当前激光光谱学的发展方向主要有以下方面:

1. 超精密激光光谱测量技术。这类工作的意义在于提供物理学的基本常数,验证近代物理学中的若干重要理论等。

2. 超高灵敏度光谱技术。在不同样品中大量原子存在的情况下,获得单原子、单分子的检测。此外,还有激光磁共振光谱和内腔吸收光谱技术。

3. 超高分辨率的激光光谱。激光光谱提供了

若干种方法消除一级多普勒加宽,允许观察到比自然线宽窄得多的谱线。

4. 相干拉曼光谱。主要有反斯托克斯—拉曼光谱(CARS)和受激拉曼光谱(SRS)以及四波混频光谱等。

5. 相干瞬态光学现象。气体或固体的原子系统可以被相干激发,产生一类新型的非线性光学现象,典型的有光学自感应衰减和光子回波。

6. 超快激光光谱。飞秒时间分辨的光谱技术可以在化学反应中对超快弛豫现象进行实时的直接测定,可借以研究物质结构各层次上粒子的寿命、能量的输运过程等动力学问题。

三、非线性光学

非线性光学研究相干光与物质相互作用出现的各种非线性光学效应及其产生机制与应用途径。它既是光学的重要分支,又同时渗透在原子分子物理、凝聚态物理和现代材料科学的研究中。它在激光技术、信息和图象的处理与存储、光计算、光通信等方面有着重要的应用。

近年来非线性光学研究出现了几个明显的倾向。一是弱光场中的非线性光学和巨光学非线性的研究引起人们广泛的注意。有代表性的是光折变晶体、多量子阱超晶格材料、有机和高分子材料中各种非线性光学过程及其特殊非线性作用机理的研究。二是与其他学科的交叉日益广泛深入。有代表性的是表面非线性光学研究的深入开展。由于与表面物理和化学的结合,非线性光学中的一些效应已经成为探测表面和表面分子吸附的重要手段。三是与光电子学等高新技术领域的应用研究的结合日益密切。例如,为研制合适的光学双稳器件而进行光学双稳的新机制以及双稳特性的研究,为发展实用的光学相位共轭器而进行光波耦合和相位共轭波产生的新机制的研究等。

近10年来我国非线性光学的研究有了很大的发展。我们在一些国际前沿领域,都开展了自己的工作,获得了一批成果。非线性光学已成为我国具有相当好的研究基础的学科领域之一。

根据学科发展的趋势和我国已有基础,非线性光学应优先发展具有较强应用背景的研究。包括:光学双稳、非稳和混沌的研究,光波耦合与光学相位共轭中新效应和新机制的研究,表面、界面和多量子阱中的非线性光学。

四、超短脉冲激光与超快现象

超短脉冲激光指脉宽在皮秒到飞秒范围的激光。超快现象就是用这样短的光脉冲与物质相互

作用所产生的内在瞬态现象。近几年超快激光与超快现象领域的主要进展是激光脉宽大大缩短,波长调谐范围进一步扩大,峰功率大幅度提高,并改进了许多测量技术。

飞秒脉冲激光的产生为激光在各个领域中的应用产生时域上的飞跃,它将为物理、化学、生物、材料科学各个领域的物质内部微观动力学的研究提供优异的工具,并将通过飞秒强光脉冲与物质相互作用产生新的物理现象。

近期主要发展方向是:超短脉冲产生的机制与技术研究,飞秒脉冲放大研究,超短脉冲的非线性光学,超快诊断技术,超快速光电子学,超短脉冲在光纤中传输的非线性效应、孤子激光器,超短脉冲与物质相互作用。

五、激光化学、激光生物学与激光医学

1. 激光化学

激光光谱和新的分子束技术相结合,已经能制备特定量子态的任何简单分子。激光在化学中的应用发展了化学反应动力学、光物理和光化学,并越来越多地应用于燃烧、等离子体诊断、环境检测、化学合成和裂解,以及发展新的激光体系等等。

激光与分子的相互作用研究,主要是获取分子的结构以及内部能量交换的动力学性质,从而解决很多没有被认识的各类化学现象,探索新的化学反应路径,以达到人类能够控制产物的制备的目的。

针对激光化学发展的特点,以及有重大应用背景的要求,选择下列几个方面作为发展方向:

(1)分子的电子结构和分子光谱学。

(2)分子的光离化。分子自离化动力学,分子场中的形态共振,共振多光子电离。

(3)电子—分子碰撞。

(4)分子反应动力学。

(5)原子簇(多聚物)的获得及光谱测量。

(6)激光对表面的研究。

2. 激光生物学与激光医学

激光与生物组织的相互作用研究,近年来有很大的发展。在基础科学方面,激光已深入到分子生物学、细胞学、遗传学、生物化学、生物物理学、生态学以及光合作用等研究;在应用科学方面,激光技术已在基因工程、细胞工程、基因移植等生物技术中,以及医学临床诊断与治疗、农业育种等方面发挥有效作用。

国内在激光生物学方面过去做了大量的激光育种试验;在激光医学方面,开展了大量的临床工作。但是基础研究工作却进行得很少,许多现象的

机理不清楚,因此进一步的发展受到限制。

近期内应优先开展的课题有:生物组织的激光光谱诊断及活细胞内生物分子的光谱研究,激光用于细胞生物学的研究,低功率激光与生物组织相互作用(生物刺激)的分子机理研究,激光消融生物组织的热效应(物理过程)及光化学效应研究,脉冲激光与生物组织“非线性”相互作用的时间特性研究。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第14页)

施加强管理和提高服务能力:

1. 尽快建立非常设的民办新技术企业管理协调机构,专门研究和协调解决有关无主办单位新技术企业的注册登记、日常管理和关停并转,以及破产中所涉及的重大问题。特别是应尽快就无主办单位新技术企业的资金和原材料问题,企业的组织、经营和管理问题,市场的行业和地区壁垒等问题拿出对策。

2. 加强试验区办公室的综合服务职能,推动无主办单位新技术企业的健康发展。

建议尽快设立试验区办公室技术评价委员会和试验区办公室经济综合评价委员会,聘请有关领域的权威专家参与项目和企业的技术经济评价工作,通过评价奠定提供服务的科学基础。在评价的基础上,试验区办公室可以沟通与有关行业和地区主管机关的关系,提高新技术企业的社会资信程度。

为提高综合服务能力,建议组织成立:人力资源管理办公室,协助企业解决用人方面遇到的困难;试验区新技术企业财务公司,协助企业解决资金问题;试验区特种物资资源办公室,协助企业解决原材料问题;新技术企业综合评价和管理顾问中心,协助企业完善企业的组织和经营管理。

3. 尽快建立试验区办公室与民办新技术企业之间的联系制度,密切政企关系,做到国家政策能及时传达到企业、企业的困难和问题能及时反映到政府。可以由民办新技术管理协调机构出面,定期召开民办新技术企业负责人座谈会,听取企业的意见和情况反映。

4. 建议在新注册登记的无主办单位新技术企业中率先明确企业产权归属关系,加强知识产权和专利工作,鼓励技术入股和无形投资。

(责任编辑 肖庆山)