

自然科学学科发展战略研究报告之十二:光物理学

Strategic Research on Natural Science Disciplines: Photophysics

国家自然科学基金委员会

一、战略地位

光物理是研究光辐射的基本性质及其与物质相互作用特性的基础学科。它相对于应用光学、工程光学而言,是属于基础光学的范畴。其主要研究领域包括光的产生、传输,光与原子、分子、凝聚态物质、等离子体相互作用的线性和非线性光学过程及光谱学特征。

光物理研究在科学发展史上的重要性可追溯到本世纪初物理学的巨大变革。划时代的量子理论的建立就起源于人们对黑体辐射“紫外灾难”的光物理研究。早期光物理的研究曾在本世纪五六十年代导致了在机制上完全不同的新光源,即激光的问世。这一划时代的成就带来了科学、技术、工业诸方面的革命性变化。由此形成的激光物理这一分支学科也显示出了强大的生命力。在激光出现的最初20年中,人们的注意力还较多地集中在激光及其本身特性的研究;到80年代以后,人们已经更多地关注激光与其它学科的交叉和应用。与激光发展密切有关的光学新材料的研究也已成为光物理研究的基本内容之一。

凝聚态领域中光物理的研究导致发现了许多崭新的光学效应,如光学变频、光学双稳、相位共轭、光学烧孔等非线性光学效应。正是这些新效应的出现,才使人们有可能形成光电子学、光盘存贮、光计算机等方面的若干新概念,并为其在未来高技术中的地位描绘出了宏伟的蓝图。

光物理与化学、生物学等学科的交叉研究,深刻地影响了这些学科的发展,并产生了巨大的效果。光物理与新兴的生命科学的交叉无疑也将导致新的生命机理的不断发现。

光物理研究不仅对促进现代物理学的发展有重大的意义,而且为应用发展研究提供了广阔的前景和大量的高科技项目。毫无疑问,在未来的高技术

产业革命竞争的潮流中,新效应、新技术的应用将首先在那些对基础科学有深刻了解和深入研究的领域占有竞争优势。

二、光物理学的主要分支学科及其发展重点

1. 激光光谱学

光谱学在研究物质结构、物化特性和物理化学定律等方面发挥了无可估量的作用。激光的发明和激光光谱学的建立使光谱学发生了重大变革,从而使人们对物质世界的认识达到了前所未有的高度。一系列新的光谱技术的建立,大量有关物质结构新信息的获得,以及激光光谱学在众多科学技术领域中的应用都超出了人们的预料。

经过二十多年的积极发展,激光光谱学已成为与激光相关的最重要和最有成就的学科之一。至今,在高分辨率激光光谱学(包括频率高分辨和时间高分辨)、高灵敏激光光谱学以及原子分子的高激发态光谱学等研究领域取得了引人注目的成就。当前,频率范畴高分辨率谱已向谱线的自然和亚自然宽度进军;时间范畴高分辨率谱已向飞秒和亚飞秒进军。高灵敏谱进入了单原子和单分子的检测阶段。高激发态谱则进入了高里德堡态和自电离态的研究阶段。可以预计,随着激光和激光光谱技术的进一步完善和发展,在这些领域内也会得到新的重要应用。

在国内,十余年来,许多研究所和大学纷纷开展了激光光谱学方面的研究,并取得了不少成绩。其特点是分布面较广,引进国外商售仪器较多,并逐步建立了几个重点和开放实验室。在无多普勒加宽高分辨光谱、高时间分辨光谱、原子分子的高激发态、高灵敏光谱以及激光光谱学的应用等方面都展开了工作,可以说,激光光谱学是我国具有较好研究基础的学科之一。然而,除少数单位在基础研究和有关应用方面取得了水平较高的成绩外,大多

数的工作仍处于一般水平,在光谱技术基础和应用研究等方面尚缺少创新性的成果,因而需要进一步明确方向,组织力量,瞄准最先进的水平迎头赶上。根据当前发展的动向和我国的现状,激光光谱学近、中期主要研究方向为:

(1)原子、离子和分子高激发态光谱的研究,其中应侧重原子、离子的自电离态里德堡谱区的研究,以及分子的高激发态、里德堡态和自电离态的研究;

(2)高分辨率激光光谱学的研究,着重进行高频率分辨、高时间分辨和高灵敏探测的物理机制和方法研究;

(3)有重要应用背景的激光光谱学研究,例如激光光谱学在同位素分离、地质资源、环境科学等领域中的应用。

2. 非线性光学过程的研究

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效应及其产生机制与应用途径,是激光出现后迅速发展起来的学科。它既是光物理的重要分支,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。随着各种基本非线性光学效应的相继发现,非线性光学已越过纯粹基础研究阶段,而迈入应用基础研究阶段。

就总体而言,近年来非线性光学研究在国际上出现了几个明显倾向。一是弱光场中的非线性光学过程和巨光学非线性研究引起人们广泛注意,代表性的如光折变晶体、多量子阱结构材料、有机高分子材料中各种非线性过程及其特殊机制的研究。二是与其它学科的交叉日益广泛深入,有代表性的如表面非线性光学研究的深入开展。三是与光电子学等高新技术领域的应用研究日益密切结合。四是材料、效应和器件的研究日益结合。

非线性光学过程的研究在激光技术、光通讯、信息和图像处理与存贮、光计算等方面均有重要应用,是应予优先发展的学科。

近3~5年内优先资助的课题是:光波混频与光学位相共轭的研究,光学双稳、非稳和混沌的研究,皮秒、飞秒相干瞬态光学过程的研究及物质超快动力学的探测,受激光散射研究,表面、界面和多量子阱非线性光学过程的研究,光纤和光波导中非线性光学过程的研究。

3. 短脉冲高功率激光及强场激光物理

近年来,短脉冲强激光技术得到迅猛发展。根据最新进展,今后几年可望在远较传统方案小型化的全固化激光系统上获得千焦耳级的皮秒短脉冲,或在KrF准分子激光系统中获得100焦耳、100飞秒的激光输出。这种量级的高功率激光经过适当聚焦后,可以产生出甚至高达 10^{12} 伏/厘米的高强度局域电场,这相当于氢原子第一玻尔半径处场强的

170倍。短脉冲强激光系统的建立和发展使得激光与原子、分子、离子、自由电子、团簇(Cluster)以及等离子体的相互作用的研究进入一个全新的、高度非线性的强场范围,并将光与物质相互作用的研究深入到原子核层次,甚至用于研究真空性质,形成了强场激光物理这样一个全新的光物理学科分支。

我国研究发展短脉冲强激光应是充分利用现有激光技术基础和设备条件,建立研究实体,为进行 $10^{12} \sim 10^{16}$ 瓦/厘米²范围内的短脉冲强激光物理提供实验手段。并分阶段发展高水平的超短脉冲强激光系统,带动激光技术的提高,同时为进行脉宽 ≤ 1 皮秒、强度 $> 10^{16}$ 瓦/厘米²的强激光物理研究提供实验手段。

短脉冲强激光的应用,直接推动了很多学科的发展,开辟了许多全新的物理领域。其中最为引人注目的,就是近几年来强激光原子物理这一新兴前沿学科的兴起。国内这一领域远远落后,实验研究基本空白,理论工作则仅有个别研究组刚起步不久。根据强激光原子物理的发展现状,国内近期目标应是:建立和改进已有诊断设备,特别是改进电子谱仪,建立合格的气体靶室,利用国内已有的强激光装置,进行多光子电离的基础性实验研究。理论则应以简化模型和数值模拟为主,研究强激光原子物理中的一些基本物理问题,并为国内的实验提供理论上的依据。

强激光等离子体物理的重点是研究强激光与等离子体的相互作用过程,它是激光核聚变物理、X射线激光,以及激光驱动粒子加速器等重大应用项目的学科基础。该学科研究的前沿主要包括三个方面:超短脉冲强激光与等离子体的相互作用,激光与大尺度等离子体的相互作用,激光驱动粒子加速器的基础物理研究。近3~5年内,国内在强激光等离子体物理研究方面应优先资助发展的基础课题有:皮秒和飞秒强激光辐照固体表面产生的瞬态高密度等离子体层的动力学行为,亚皮秒强激光打靶产生的超短X射线脉冲研究,超快X射线光谱研究,以及以此产生的小尺度等离子体为介质的X射线激光研究等。

4. 超短光脉冲与超快现象

超短脉冲激光与超快现象的研究近20年来一直是十分活跃的前沿领域,在激光脉冲的脉宽、功率和波段等三个方面的研究取得了重大进展。脉冲激光的宽度已由皮秒进入飞秒,其最小的脉宽已达6飞秒,激光的可调谐范围已扩大到紫外至中红外波段,在探测器方面也得到了相应的发展。

超短脉冲激光由于脉宽短、峰值功率高和波长可调的范围大,已广泛应用于物理、化学、生物和超快速光电子等学科的研究,对揭示在皮秒—飞秒时域内物质内部的运动规律有重大意义。

由于激光脉宽大大缩短,波长可调谐范围进一步扩大,输出功率大幅度提高,探测技术不断完善,它的研究领域日益扩大,包括:

(1)超短脉冲激光在介质中传播的非线性光学效应研究,感应飞秒电磁脉冲产生的各种机理和辐射特性,以及远红外飞秒脉冲的应用研究。

(2)半导体材料及其超晶格、多量子阱结构中的超快速现象研究。由于近年来半导体材料的超晶格、多量子阱结构的迅速发展,此项课题不仅对其光学、电学性质进行基础性研究,而且可为制备这类材料及其应用提供理论和实验依据。

(3)超短光脉冲与金属相互作用过程中的瞬态现象研究。通过测量反射率的变化探测电子态费米能级的变化,这方面的研究最终有可能揭示光与金属相互作用的非平衡态动力学。

(4)超快速光电子学研究。用超短光脉冲研究快速光电子器件材料的传输特性。在光电子器件材料方面,已经开发了一种绝缘体—氧化物—半导体器件,制成的光开关响应时间达100飞秒。在传输特性的研究方面,开展用超导材料作传输线,并在液氮和液氦的条件下进行了试验,传输速度比光纤传输速度快100多倍。

(5)强激光与原子相互作用研究。研究原子的高价电离光谱及其电离机制,研究激光与金属靶的相互作用所产生的高价电离气体的形成和复合过程,以及X射线和真空紫外辐射光谱。

(6)原子与分子物理中超快速现象的研究。用飞秒光脉冲实时测定了化学反应过程中态—态反应之间的时间特性,反应物分子(包括自由基分子)的时间演变,研究了化学反应动力学、分子光解离的动力学过程。

近、中期主要研究方向应注意下列几个方面:

(1)超短脉冲激光的倍频、混频、参量过程和受激喇曼散射频移的研究;

(2)超短激光脉冲与半导体材料及其超晶格和多量子阱相互作用的动力学过程研究,揭示其内在的微观运动规律;

(3)超短脉冲激光与固体表面作用的研究,研究相变、电磁辐射、光电子和离子发射的机理;

(4)超短激光脉冲与原子、分子相互作用的研究,研究原子、离子自电离,分子激发态弛豫过程和光解离的过程;

(5)超短激光脉冲在光纤中传播及其产生的非线性效应的研究,研究孤子的产生、传播和碰撞机理。

5. 量子光学

量子光学是研究光场的量子统计性质及光与物质相互作用的量子特征的学科,研究的主要范围是:各种光场量子统计性质的研究,原子(物质)与

真空相互作用的研究,压缩态光场研究,光子动量传递规律研究。

量子光学自从1956年有名的Hanbury—Brown和Twist的光子相关实验发表以后发展就十分迅速。经典的Young氏干涉实验测量只给出电磁场的一次相关性,而二次相关给出的是不同光子间的干涉,提供了一个观测纯粹量子效应的手段,展示了光子反聚束效应的存在,这就促使人们渴望了解光场的纯粹量子力学性质。激光出现后光压偏转原子束实验的成功,重新引发了人们对光子动量传递规律的兴趣,极大地丰富了量子光学研究的内容,因此量子光学研究就成了发展十分迅速的学科。近几年国际上最活跃的研究领域有:腔内量子电动力学效应、压缩态和Fock态研究,光子动量传递研究,激光冷却和囚禁气体原子研究等。

我国量子光学研究工作起步较晚,但已在不少方面取得了可喜成果,但仍缺乏统一的组织和重点支持。因此,须集中研究力量在几个方面重点突破。目前,根据我国的条件,可选择如下一些课题:腔内量子电动力学研究,压缩态光场研究,激光冷却气体原子与“光学粘胶”研究。

6. 新型光源、激光器等机制中的基本物理问题

新型光源和新型激光器的发展趋势是波长的扩展与可调谐、光脉冲宽度的压缩,以及器件的小型化、固体化等。X射线激光器是强激光技术研究的一个重点发展方向。软X射线波段的辐射放大增益实验研究是当前研究的核心,通过对特定泵浦物理机制的实验,演示其技术上的可行性。

目前X射线激光研究的一个主要努力方向是获得波长更短的激光,在适合于生物学的“水窗”(23.3~43.8埃)波长范围得到饱和放大激光输出,为具有重大价值的应用提供现实可能。另一个研究方向是试图在更小规模的泵浦系统中,利用新的泵浦物理机制,提高X射线激光器的效率,而得到同样的激光增益。

自由电子激光器是利用相对论电子束通过横向周期磁场产生电磁辐射的新型强相干辐射源,具有高效率、可调谐、高亮度等特点。其发展方向,一是短波长,现已获得6300埃的可见光输出;二是高功率,已经获得100兆瓦以上的峰值输出。

准分子激光器具有峰值功率高、平均功率高和输出波段在紫外区等特点。其近、中期主要研究方向:一是研究高功率准分子激光的技术难点,提高转换效率,提高预电离均匀性;二是发展皮秒太瓦级高亮度系统,用于X射线激光研究;三是研究长脉冲放电条件下,激光等离子体介质的电学和光学特性。

自60年代第一台可调谐激光—有机染料激光器问世以来,能产生可调谐激光输出的手段有几十

种,包括固体、液体染料、高压气体、半导体和自由电子激光器。其发展趋势可归纳为两大方面:一是继续提高功率和光谱亮度,发展超短脉冲可调谐激光,解决应用中要求的稳定性、可靠性及寿命等问题;二是探索新的调谐激光原理和途径,特别是研制新材料和新器件。80年代这方面的重大突破是固体可调谐激光。

半导体激光抽运的固体激光器是一种高效、小型、全固体化的相干辐射光源。我国在半导体激光泵浦固体激光器方面的近、中期研究方向是:大力加强高功率半导体激光器及其列阵研究,研制出输出功率为瓦量级的列阵半导体激光器件。

近年来国际上开拓的新光源品种很多,就其应用前景来看,面发光半导体激光和光纤激光源值得我国跟踪和发展。

7. 非线性光学材料和激光材料

非线性光学材料和激光材料的主体是晶体材料,以下将以激光晶体和非线性光学晶体为主进行评述。

激光晶体泛指能产生光受激发射的晶体,非线性光学晶体则是指在激光作用下能产生各种非线性效应的晶体,当前的主要问题是缺乏为发展各种激光器件所需要的性能更为理想和实用的材料。激光和非线性光学材料无论是对基础研究还是对高技术应用都十分重要,国际上发展很快,竞争激烈。我国在非线性光学材料,特别是无机非线性光学晶体方面有一定优势,但激光晶体的研究与国外相比还存在较大的差距。

激光和非线性光学晶体主要研究范围如下:基于结构和性能的研究,要加强材料设计工作,探索和制备新的非线性光学材料;激光晶体(包括半导体激光器)扩展波段和多功能化的研究;晶体中各种非线性光学过程的研究,研究新效应,发展新应用,特别注意发展多量子阱材料非线性光学过程的研究;相应生长理论研究。

近、中期的主要研究方向:

在无机非线性光学晶体方面:继续探索新的紫外非线性光学晶体;不断提高具有我国特色的重要非线性光学晶体的质量,如熔剂法生长的改性KTP晶体和 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体,使之在国际市场上有持久的竞争力;开展相应的、系统的非线性光学性质的研究;开展相应光波导薄膜的研究,如 LiNbO_3 、KTP光波导、聚片多畴和亚微米光学超晶格等;以铁电类材料(如 BaTiO_3 、 KNbO_3 、KNSBN等)为重点,系统进行光折变性能和应用的研究,特别应深入研究光折变的微观过程,搞清各种因素对光折变特性的影响,提高现有重要光折变晶体的质量,使其性能最佳化,为实用化作好准备,并在此基础上探索具有我国特色的新型光折变晶体。

在有机非线性光学晶体方面:深入研究有机晶体结构和性能的关系,特别要加强对有机晶体中电子过程的研究,开展相应材料的二阶($\chi^{(2)}$)和三阶($\chi^{(3)}$)非线性光学效应的研究,探索具有我国特色的新的有机非线性光学材料,特别是可在弱光非线性中应用的晶体,力求在有机晶体实用化方面有所突破;加强推拉型具有高 β 值分子组装技术的研究;研究高 $\chi^{(3)}$ 值有机晶体的生长过程,解决厘米级光学均匀的有机晶体的生长难点。

在半导体非线性材料方面:加强超晶格结构和多量子阱结构的非线性光学效应和新现象的研究,发展其在光电集成、光通讯等方面的应用。

在激光晶体方面:加强激光光谱的研究,以可调谐激光晶体和自倍频晶体为重点,推出1~2种有我国特色的新晶体,探索蓝绿波段的新的激光晶体。

8. 光物理学与其它学科的交叉及光物理学的应用

光物理与化学和生物学的交叉在80年代所取得的进展引人注目,且前景诱人。

激光问世以来光物理的进展深刻地促进了化学的发展,使之进入一个崭新的阶段。两门学科的相互渗透使化学反应动力学、光物理和光化学等领域得到巨大发展,从而形成一门十分活跃的交叉学科——激光化学。利用光物理不断发展的技术和方法研究化学及化学物理中的一些基本问题以深化对化学反应微观规律的认识,在此基础上更有效地控制化学反应并探索化学反应新途径是本交叉学科的主要内容。激光和激光光谱技术的应用使态分辨、时间分辨和空间取向的分子反应动力学前沿研究取得突破性进展。现在对少数基元反应已能做到完全的态-态碰撞研究,对反应中矢量相关的研究也达到新的水平。最近飞秒激光技术的发展使化学家长期向往的对化学反应过渡态的直接实验观察有了突破,对个别化学反应细微过程的实时探测取得了令人鼓舞的成功。飞秒动态学已激起化学界的很大兴趣。分子激发态及特殊分子的结构和动力学,以及分子内及分子间的能量转移是分子反应动力学研究的另一个重要方面,因与激光化学中深受关注的选键反应可能性也即“分子剪裁”密切相关而特别受到重视。激光在化学中的应用十分广泛,除上述基础研究外,在激光同位素分离、基于激光的化学分析、激光诱导的化学制备、应用激光的材料化学处理、大气光学及环境监测等方面都有广阔的应用前景。

激光与物质相互作用的研究扩展到生物大分子和生物组织,使生物学取得了用传统方法难以想象的新进展,从而开创了生物学的新纪元,也为医学提供了新的诊治方法。在光物理与生物医学的交

叉点上形成活跃的新学科——激光生物学和激光医学。本交叉学科的主要研究内容为：

(1)采用激光和激光光谱技术从结构及动态方面研究生物体内的基本物理和化学过程。皮秒和飞秒时间分辨激光光谱技术使视觉、光合作用、光能转换等许多重要的生物快速过程的研究呈现崭新的面貌。超快技术还为研究如蛋白质等生物分子在体内的结构和构象变化提供有效手段。

(2)研究激光与生物分子及组织的相互作用，即激光的生物效应及其机理。这里有激光在活组织中的传输、激光作用产生的热效应、光化反应、非线性

过程导致的光击穿及声波、冲击波作用等大量光物理问题。激光生物效应的研究是正确进行激光医疗、激光防护并进一步发展激光诊断技术的基础。

(3)用光物理提供的新技术对生物物质进行细胞水平和分子水平的研究，例如光学囚禁技术用于活细胞研究，与激光微切割技术相结合用于探索疾病的分子基础，等等。这类工作既是探索和揭示生命世界奥秘的重要基础研究，又与造福人类的实际应用密切相关。

(责任编辑 刘先曙)

(本文为自然科学学科发展战略研究报告的摘要，全文将由科学出版社出版)

科技动态

水利水电工程建设中“复杂地基问题”研究取得重要进展

[本刊讯] 为解决水利水电工程建设中的关键科技难题——复杂的地基基础建设问题，国家自然科学基金委员会于1989年资助的基础性重大项目“岩土与土工建筑物相互作用研究”，在水利水电科学研究院汪闻韶学部委员、天津大学陈环教授主持下，联合从事水利水电工程建设基础性研究的有关高等院校和科研单位的150多位科技工作者，经过4年的艰苦努力，终于完成了预定的研究任务。日前通过了以中科院学部委员卢肇钧为首的专家组验收。其取得的主要成果有：

1. 在裂隙岩体力学特性及洞室群施工力学研究中，从有序分布节理及随机分布节理两方面研究了节理岩体的力学特性，进行了模拟试验及数值分析，并应用于实际工程。在岩桥的破坏机制及解析方法和节理爬坡角对岩体变形的影响等方面取得突破性进展，并应用动态规划原理进行了洞室群分部开挖顺序的优化分析，发展了洞室群施工的新型人工智能系统，在实际工程应用中收效良好。

2. 在加固处理后裂隙岩体的力学特性及建基面准则研究中提出了节理岩体加固处理后的断裂损伤力学模型，并将分形几何理论成功地用于节理岩体裂隙扩展分析。经过试验证明，节理岩体经灌浆处理后，不仅弹模有提高，而且力学强度也有提高。所建立的完整的大坝建基面分析系统及整体稳定分析系统在实际工程应用中效益显著。

3. 在裂隙岩体中水的运动与土工建筑物相互作用研究中，建立了裂隙岩体渗流——应力耦合分析方法，进行了复杂岩体渗透张量反分析，解决了渗流参数选择问题，提出了隧洞外水压力分项系数的新概念。

在应用初流量法进行三维规则裂隙网络在自由水面的渗流分析以及应用于结构法模拟排水孔幕的效应及考虑混凝土坝与地基联合作用进行大型工程全过程仿真分析等方面都取得了突破性进展。

4. 在散粒体地基上土石坝混凝土防渗墙研究中，通过大量分析研究，为防渗墙渗流控制设计提出了一些有价值的建议，为改进防渗墙设计和施工提供了科学依据，改善了静、动力分析方法，丰富深化了程序功能；研究了混凝土与砂土接触面的相互作用，并提出了可以用刚塑性本构模型的新建议，研究证实了塑性混凝土的力学性能有助于改善防渗墙的受力条件，可减小墙内应力并具有足够强度和抗渗性。在国内首次用冻结法获得了深层原状砂样内的剪切波速与其动力特性良好相关的结论。

5. 在渤海油田新型平台基础与土的相互作用研究中，通过不同几何比尺的模型试验及有限元分析的相互关系，估算新型平台的受力状态和承载能力，为新型平台设计提供了重要的依据，在静力有限元分析中采用了双屈服面模型和引入比奥固结理论，并发展了有限层法。在海冰—平台结构—地基的相互作用和冰载作用下结构的振动研究中，提出一种冰力作用模式及表达式，将调整液体阻力减振方法用于平台减振，经济效益显著。所提出土的软化P—Y曲线，为海洋平台设计创出新路，并发展了动态有限元法。在地震动分析方面也有所开拓和创新。

6. 在桩基结构与土坡相互作用研究中，对一些高桩码头的工程实例进行了分析研究；通过砂槽模型试验、离心模型试验和有限元分析，论证了已有高桩码头发生变形破坏的原因，并提出码头结构设计的改进意见。

验收专家们审议了该研究项目所取得的以上重要成果后认为：本项研究在总体上达到了国际先进水平，部分成果处于国际领先地位。其研究工作密切结合我国水利水电建设的实际，并积极开展国际合作与交流，推动了我国水利水电建设事业的进步，促进了水利水电学科的发展，培养了一批中青年科研骨干力量，具有显著的社会和经济效益。(柯水成供稿，责任编辑 刘先曙)