

略谈我国光物理研究进展*

杨国桢

(中国科学院物理研究所 光物理开放实验室 北京 100080)

摘要 简要地回顾了光物理学科的发展历史,以及我国在这领域的主要进展,并展望了 21 世纪该学科可能得到重大发展的一些研究领域.

关键词 激光科学,光物理

PROSPECTS FOR OPTICAL PHYSICS RESEARCH IN CHINA

Yang Guozhen

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The historical of development, progress and areas of possible important advances in the 21st century are briefly reviewed for optical physics in China.

Key words laser science, optical physics

1 简要回顾

1958 年,美国物理学家肖洛(A. L. Schawlow)和汤斯(C. H. Townes)在《物理评论》杂志上发表了一篇题为“红外与光学激光器”的论文,提出了研制以受激发射为主的光源.此后,各国科学家对此纷纷提出各种实验方案,其中美国休斯顿实验室的物理学家梅曼(T. H. Maiman)捷足先登,他采用掺铬的红宝石作为发光材料,应用发光强度很高的脉冲氙灯泵浦,经过两年时间的探索,终于在 1960 年 5 月正式宣布制成了这种新光源——红宝石激光器,开创了激光技术的新纪元.

随后,我国第一台红宝石激光器于 1961 年夏天由中国科学院长春光学精密机械研究所研制成功,但在结构上与梅曼的有些不同,其中最明显的是,泵浦灯不是螺旋氙灯,而是直管式氙灯,且灯和红宝石棒并排地放在球形聚光器球心附近.接着于 1963 年又在该所研制成功国内

首台 He - Ne 气体激光器.

可以看到,我国第一台激光器与世界上第一台激光器问世的时间相差仅一年.这项新技术能够迅速赶上世界行列,在我国近代科学发展史上也是不常见的,这引起了我国科学家的极大兴趣和关注,同时得到了当时科技管理部门的高度重视,促使我国激光技术研究获得迅速发展.其中起步很快的有中国科学院电子学研究所、物理研究所和清华大学等科研单位、高等学校.与此同时,我国第一所激光技术专业研究所——中国科学院上海光学精密机械研究所应运而生.

无疑,激光器的诞生促使人们的学术思想更加活跃,通过向更深层次的探求,导致一系列新概念、新方法和新技术的形成与发展.特别是近 30 年来,光学的面貌发生了革命性的变化,光物理领域的新现象、新效应不断涌现,光物理已成为近代物理学的重要学科之一.该学科就

* 1999 - 08 - 11 收到

我国发展的情况来说,与国际上有着基本相似的一面,即在激光最初出现的20年中,科技工作者的注意力还较多地集中在激光及其本身特性的研究上;到80年代以后,则更多地关注激光与其他学科的交叉和应用,包括与激光发展密切相关的光学新材料的研究.现就其分支学科作简要回顾,主要包括:

(1) 激光光谱学.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,它在众多科技领域中的应用同样使人们超出预料.国内许多研究所和大学开展了激光光谱学方面的研究,其特点是分布广,并逐步地建立了几个国家重点实验室和部委级开放实验室,其研究内容包括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光谱、高灵敏光谱以及激光光谱学的应用等.它是我国近10余年来发展较快、具有较好研究基础的分支学科之一.可以预见,随着激光和激光光谱技术的进一步发展和完善,在以上这些领域内会得到新的重要应用.

(2) 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效应及产生机制与应用途径,它是激光出现后迅速发展起来的学科.80年代以来,国内非线性光学过程的研究有了很大发展,已在一些国际前沿领域中不同程度地开展了自己的工作,有些还颇具特色,例如光学双稳与混沌研究、光波混频与光学位相共轭研究、表面界面和多量子阱中非线性光学特性研究、光折变效应及弱光场中的非线性光学、原子蒸气的非线性光学效应及碰撞感生相干性研究、四波混频光谱学研究等方面.

(3) 短脉冲强激光及强场激光物理.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、原子分子团簇、等离子体以及固体的相互作用研究进入到一个全新的高度非线性的强场范围,并将光与物质的相互作用研究深入到原子核层次甚至于研究真空性质,形成了强场激光这样一个全新的光物理学分支.我国发展短脉冲强激光是充分利用现有的激光技术基础和条件,为进行脉宽 ≤ 1 ps、

功率密度约为 10^{16} W/cm²范围(其电场强度相当于氢原子第一玻尔轨道处的场强)内的短脉冲强激光物理研究提供实验手段.

多年来,我国开展了强激光与等离子体的相互作用过程的研究,它是激光核聚变、X射线激光,以及激光驱动粒子加速器等重大应用的学科基础.在短脉冲强激光与原子、分子、团簇和固体相互作用的研究方面,虽然刚起步不久,但我国科学家也做了具有较高水平的研究工作.

(4) 超短脉冲激光与超快现象.超短脉冲激光是指脉宽接近或小于皮秒量级的激光.超快现象是指用超短脉冲激光与物质相互作用所产生的瞬态现象,或者应用超短脉冲激光作为探针所观察到物质本身发生的瞬态现象.超短脉冲激光与超快现象研究,是20余年来十分活跃的前沿领域.我国自70年代开始,进行了较多的皮秒激光脉冲的产生和测量研究;进入80年代后,开始进行超短激光脉冲应用于染料分子瞬态发光的吸收特性、半导体载流子动力学、介质的瞬态光学非线性现象、超快速光电子学,以及飞秒产生和压缩的理论研究.目前,国内已有不少科研单位和高等学校涉足于上述领域,并建立了超快激光光谱学国家重点实验室.由于近10年来自己研制加上从国外引进了产生皮秒和飞秒脉冲的激光器和相应的测量设备,对我国的超快过程的研究起了很大的推动作用.

(5) 量子光学.量子光学是现代物理学中重要的基础学科之一.它是现代光学、激光科学和激光技术的基础,属于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.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,其中理论研究的范围较广,大致与国际状况相同,而实验工作显得狭窄,仅有少数几个实验室的设备基本完备,可以开展光的统计性质和激光冷却原子和离子的实验研究.可以说,国内已有一支可以跟踪国际先进水平的研究队伍,在该领域的一些点上已做出了与国际水平或国际领先水平相当的研究工作.

(6) 新型光源、激光器等机制中的基本物理

问题.光物理学自身的发展与激光在各个方面尤其是高科技领域中的应用开拓,都对激光器的性能提出了新的要求,新型光源和新型激光器的发展趋势主要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、固体化等等.而各种新型光源和激光器发展中所涉及到的基本物理问题显然是光物理学的重要研究内容.我国在70年代就十分注重新型激光器的研制,诸如准分子激光器、可调谐激光器、半导体激光及其抽运的固体激光、X射线激光器、自由电子激光器,以及其他新光源的开拓等.尽管目前已发现数以千计的不同激光的谱线,但是实际上仅有很小一部分性能优越或独特的激光器可以得到发展.而国内以往研制的激光器多数是性能不够稳定和可靠性差,只有少数产品能达到科学研究及其技术应用的要求.但在近10余年来,我国对于上述的某些新型激光器的研制工作已取得了可喜的进展.

(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.激光晶体和非线性光学晶体是研究光与物质相互作用的微观过程机制及其应用的重要对象,它是光物理研究和光电子技术的物质基础.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,因为一种新型材料的出现往往会在应用技术方面形成新的突破,同时也推动了光物理研究的深入.由于激光和非线性光学材料无论是对基础研究还是对高新技术应用都是十分重要的,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,在国际上仍有相当优势,但在激光晶体的研究上,与国外相比还存在较大的差距.

(8) 光物理学与其他学科的交叉及光物理学的应用.激光的问世及发展推动着光物理广泛地渗透到相邻学科领域而形成代表着新生长点的交叉学科.光物理还为许多学科提供新技术和新方法.光物理的应用及其与其他学科的交叉研究是高新技术的研究与开发的重要基础之一.我国与光物理有关的交叉学科的发展已

较早引起注意,有的学科,如激光化学,已具有一定的研究基础,但发展尚不平衡.此外,国内激光医学的研究和应用起步也是较早的,有些方面还颇有特色.但激光生物学的基础研究比较薄弱,与国外差距较大,特别是在应用超快技术研究生物基本过程方面,国内还刚刚起步,目前有些单位已具备进行此项研究的条件,可选择合适的研究课题逐步开展工作.

2 重要成果

应该指出,自激光器由梅曼发明以来的近40年内,我国激光技术和光物理在基础研究、实验探索和应用开发等方面取得了上千项研究成果,推广了成百项实用技术,并培养了一大批科技人才.据不完全统计,目前国内开展光物理研究的单位达近80个,光学及光学材料方面的国家重点实验室10个,部委级开放实验室5个.尤其是近几年来,我国在光物理的一些领域,如短波长激光器的研制、超强激光与等离子体的相互作用、非线性光学、激光化学、激光核聚变研究装置、无机非线性光学晶体生长等方面,已形成了较强的群体学术力量,做出了成果,在国际上具有一定的影响,其中有的已进入国际前列,并在一些著名的国际学术会议上作了邀请报告和在国际一流的学术刊物上发表论文.现仅列举若干有代表性的研究成果,作为以上第一部分内容的补充.

近30年来,高功率激光伴随着激光聚变研究的兴起而迅速发展,在其发展过程中又不断开拓出新的物理应用,其中最活跃的领域有惯性约束聚变、X光激光和强场物理等.我国规模最大的高功率钕玻璃激光装置,即称为“神光”装置的建成和成功运行,使高功率激光研究进入了一个新阶段,其装置的综合总体技术性能达到了国际同类装置的先进水平,使我国成为在高功率激光领域中具有这种综合研制能力的少数几个国家之一.

在激光晶体方面,除红宝石外,我国在 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器单棒方面也达到了输出

物理

700 W的水平, Nd: YAG板条激光器输出已达数百瓦. 1980年, 我国首次发表关于 MgO 的 LN 的耐光性能显著提高后, 以 Nd: Mg: LN 作为激光工作物质, 并同时利用其线性电光效应和非线性光学效应的多功能微小型激光器的研究便获得了迅速发展, 现已实现了自倍频、自锁模受激发射. 还有一种掺稀土离子的钽酸钷激光晶体已达到连续绿光输出 8 W 的水平. 在非线性光学晶体方面, 我国用水热法和助熔剂法已生长出光学质量优良的 KTiOPO_4 晶体, 其中助熔剂法生长的最大尺寸达 $60 \times 51 \times 25 \text{ mm}$, 并实现了稳定的批量生产, 从而使我国成为 KTP 晶体的主要生长国家之一, 晶体也出口美、日等国. 特别是, 我国对非线性光学晶体进行了长期系统的探索和研究, 80 年代研制成功被誉为中国牌的偏硼酸钡 (BBO) 和三硼酸锂 (LBO), 在国际上被公认为是优良的新型紫外倍频晶体. 其中, BBO 已实现 Nd: YAG $1.06 \mu\text{m}$ 激光的有效五次谐波. 上述两种晶体以助熔剂籽晶法生长, 现已能生长直径 $120 \times 28 \text{ mm}$, 重 1 kg 的 BBO 单晶和 $27 \times 25 \times 12 \text{ mm}$ 的 LBO 单晶. 在光折变晶体方面, 我国采用顶部下种高温溶液法已生长出 $24 \times 24 \times 10 \text{ mm}$ 宏观完整的 BaTiO_3 晶体, 室温下自泵浦相位共轭反射率 $> 70\%$, 后又首先在世界上发现了掺铈钛酸钡单晶, 系当前最好的可见波段光折变材料.

利用新型非线性光学晶体开发高效率宽调谐激光器件, 这是将我国的新型非线性晶体 BBO 和 LBO 研制出具有世界领先水平的 3 种实用宽调谐的激光器件——光学参量振荡器、光学参量放大器和紫外频率扩展系统. 特别是近几年来, 我国科技工作者发现了上述非线性光学晶体的相位匹配的折返现象, 为发展多波长激光器提供了新机理, 并在世界上首次证明了相位匹配折返现象存在的普遍性, 为应用相位匹配折返现象发展多波长激光器奠定了理论基础. 由此发明的这种多波长光参量激光器具有多波长、宽调谐、高功率、超快脉冲和全自动操作等特点.

我国在新一代超短脉冲高功率激光研究、

发展与应用方面做出了系统的重要结果, 提供了一批具有自主知识产权的首创技术, 成功地建造了总体性能达到国际一流水平的新一代小型化超短脉冲高功率激光系统, 有力地推动了我国强激光物理研究工作的开展, 也促进了国家激光高技术尤其是超短脉冲高功率激光技术的持续深入发展.

X 射线波段激光的开拓是激光科学发展中的重大前沿领域之一, 我国以类锂离子和具有类似电子结构的类钠离子三体复合泵浦方案为主攻方向, 多次在国际首次获得短波长的 X 射线激光跃迁. 这不仅在激光与等离子体相互作用和 X 射线光谱研究方面积累了丰富的经验, 而且在软 X 射线激光增益实验研究方面也取得了重要数据.

此外, 低阈值和高速超短光脉冲量子阱激光器的研制成功, 使我国光电子器件研究取得突破性进展; 采用脉冲碰撞锁模技术和四棱镜群速补偿技术, 直接获得了 21 fs 的超短光脉冲, 居国际领先.

四波混频是一种重要的、含义非常广泛的非线性光学效应, 也是研究光谱和弛豫过程的重要手段. 我国通过多年来系统的理论和实验研究, 发展了多种四波混频光谱术, 其中首次建立了非相干光时延四波混频的多能级理论, 并建立了在时域中研究谱线碰撞变窄的方法等, 为发展非线性光谱学作出了贡献.

在激光冷却和原子光学方面, 80 年代末得到了钠原子一维冷却温度 $60 \mu\text{K}$ 的好结果. 近年来, 除激光冷却外, 还实现了磁光阱和光学粘团, 得到了 $10 \mu\text{K}$ 的铯冷原子团. 在原子干涉的实验研究和量子光学的理论研究中也取得了好成绩.

我国在激光应用的其他重要方面, 也作出了重要的工作. 例如, 利用激光法制备薄膜具有的特有优点, 生产了具有国际水平的高温超导材料大面积 YBCO 薄膜和双面 YBCO 薄膜; 长脉冲激光破坏机理实验系统的研制及其应用, 对发展我国强激光武器具有重要意义; 激光分子束外延设备的研制成功, 使我国成为继日、美

之后第三个拥有该设备与技术的国家,已用于生长人工合成材料中以原子层次为单位的新材料;采用激光技术解决在线连续无接触测量冷轧钢板的延伸率,属国内外首创;在我国的计量领域内,运用激光及其技术作出了多项技术创新的光电器件及其检测系统,深受国内外用户的好评。

综上所述,随着光源、光传输和探测技术的发展,人们对光与物质相互作用的认识有了进一步的深刻认识,我国由对激光和光物理的基础研究也已走向应用开发,并在科技、军事、工业、农业和医疗等领域内产生了重要影响,也将为进一步推动国家 21 世纪高科技发展奠定基础。

3 前景展望

21 世纪即将来临,在新世纪到来之前,展望光物理这一门具有旺盛生命力并正在蓬勃发展的学科是有意义的。

原子激光是第一种物质波激射器,是继微波激射器(Maser)、光激射器(Laser)之后的第三类激射器。1995 年原子气体玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)实验成功,促使了原子激光于 1997 年应运而生。BEC 的实现和原子激光的诞生是本世纪末物理学的重大突破性进展,有可能对今后科学技术的发展产生重大影响。其研究成果不仅是物理学的又一大进步,为物理学的基础理论,如量子论、相对论的发展提供了进一步深入的基础;同时还对相关领域,例如精密测量、空间科学、地学、表面探测、微电子技术等也将有重大推动作用。

新型超强超短激光的出现与迅猛发展,为人类提供了前所未有的全新的实验手段与极端的物理条件。目前,在远比传统装置小型化的台式激光系统上已产生了高重频率的超短脉冲(10^{-13} s 甚至更短)、超强(10^{12} W 甚至更高)的激光输出。激光经聚焦达到的光强在过去的 10 年里已提高 5—6 个量级,达到了 10^{19} W/cm² 乃至 10^{20} W/cm²。不久,将会达到 10^{21} W/cm²。

这种量级的光强产生的局域电场将高达 10^{12} V/cm,已是氢原子中束缚基态电子处的库仑场强的 170 倍,同时可产生极高的光压,极高的能量密度与温度,非微扰性、高度非线性与相对论效应已成为主导,这种在实验室内有可能创造的极端物理条件,目前还只有在核爆中心、恒星内部或黑洞边缘才能找到。可以预计,在下个世纪超强超短激光科学研究将会得到更大更快的发展。

自从 1994 年舒尔(Shor)提出量子平行算法以来,量子通讯与量子计算发展成物理学与信息科学相结合的新兴交叉学科。近年来,量子计算和量子信息的理论和实验均取得了重大进展。已经证实,应用量子作为信息载体,在提高运算速度、确保信息安全、增大信息容量等方面可以突破现有经典信息系统的功能极限,为信息科学的发展开拓了新的原理和方法。可以预计量子信息科学和技术将在下个世纪发挥出巨大的潜力。

近年来,以半导体激光器为泵浦源的大功率的全固态激光器的研究工作得到了迅速发展,技术上已日趋成熟。在此基础上加上频率扩展技术和超短脉冲技术,各种类型的全固态激光器必将发挥越来越大的作用。由于它的高效率、性能可靠、结构稳定和小型化等优点,必将逐步取代传统的气体激光器和其他固态激光器,成为激光制导、光存储和大屏幕激光电视等重要应用首选的激光器系统。

人们知道,光学成像系统的理论分辨率约为光波波长的一半,这就是瑞利分辨率极限。与扫描隧道显微镜(STM)类似,目前发展了一系列近场光学扫描显微镜技术,分辨率已达到光波波长的数十分之一。与此同时,形成了一门光学、扫描探针显微学和光谱学结合的新型交叉学科——近场光学。近场光学必须用光的电磁理论——麦克斯韦方程组来处理近场区域的光学现象。另一方面,用光的电磁理论也可以用来处理光在小于光波波长微小尺度物体上的散射、衍射和干涉等现象,在此基础上发展了光的矢量理论,它是小尺度衍射光学元件设计和微

光机电系统设计的基础.近场光学和光的矢量理论把传统的光的传播的标量理论扩展到了一个全新的境地,可以预料未来会有很大发展.

光子晶体是一种周期的介电(包括金属)结构,它的周期相应于光波波长.在光子晶体中,光的传播特性以及光子与原子、分子的相互作用都发生了本质的改变,从而可以控制光子的运动,这是一类全新的光子器件的物理基础.同时,与传统的电子器件比较,光子作为信息载体有着明显的优点:以光速传播、信息量大且相互间没有作用.这使它的应用领域可能会很广泛,如高性能发射天线、光开关、无阈值激光及新型光学材料等.值得注意的是,在光通讯方面作为无损耗的光波导,可能会在信息传输上产生重要影响,可以预料,下个世纪初期,在光子晶体的基础及应用研究上都会有新的突破.

数十年来,激光和光物理与光学材料总是彼此推动相互促进地发展.寻找性能优异的紫外和红外激光晶体,以及非线性光学晶体一直是一个重要目标.同时,利用激光制备性能优异的薄膜,例如,用激光分子束外延方法实现原子尺度控制,以制备铁电薄膜、氧化物超导薄膜等,可望得到进一步迅速发展.

此外,微腔光学、光纤放大器、塑料激光器、纳米材料激光器以及光物理在其他学科中的应用,特别是在生命科学中的应用也可望得到重大进展.

总之,激光和光物理作为一门活跃的正在蓬勃发展的学科,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,在未来的知识经济时代和高技术产业革命的潮流中,新效益、新技术的应用将首先在那些对于基

础科学有深入了解和深入研究的领域有竞争优势.

参 考 文 献

- [1] Schawlow A L. Rev. Mod. Phys., 1982, 54: 697—707
- [2] Letokhov V S. Nonlinear Laser Chemistry. New York: Springer-Verlag, 1983
- [3] Radziemski L J, Solarz R W, Paisner J A eds. Laser Spectroscopy and Its Applications. Marcel Dekker, 1985
- [4] 熊夏幸,李世方,沈一菁等.光学学报,1990,1: 593—597
- [5] Ducloy M, Giacobino E, Caamy G eds. Tenth International Conference on Laser Spectroscopy, Singapore: World Scientific, 1991
- [6] Hutchinson M H R. Contemporary Physics, 1989, 30(5): 355—365
- [7] Mourou G, Umstadter D. Phys. Fluids B, 1992, 4(7): 2315—2325
- [8] Gavril Med. Atoms in Intense Laser Fields. New York, 1992
- [9] Kulander K C, Huillier A L. J. Opt. Soc. Am. B, 1990, 7(4): 502—508
- [10] 徐至展,姚关华,陈荣清等.中国科学 A辑,1992(1): 101—107
- [11] Chen Rongqing et al. Phys. Rev. A, 1991, 44(1): 558—562
- [12] Ultrafast Phenomena VII, Springer Verlag, 1990
- [13] Picosecond Electronics and Optoelectronics II, Springer Verlag, 1987
- [14] Carnal O, Mlynek J. Phys. Rev. Lett., 1991, 66: 2689—2692
- [15] Keith W K et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66: 2693—2696
- [16] Akulin V M et al. Phys. Rev. A, 1991, 44: R1462—R1465
- [17] Narducci L M et al. Opt. Commun., 1991, 81: 379—384
- [18] 王育竹.物理,1993,22: 16—22
- [19] Chen J et al. Phys. Rev. Lett., 1992, 69: 1344—1347
- [20] Ducloy M, Giacobino E, Caamy G eds. Laser Spectroscopy X. Singapore: World Scientific, 1991. 65, 246