

激光发明 50 周年的几点启示

杜祥琬[†]

(中国工程院 北京 100088)

摘要 2010 年是激光发明 50 周年. 文章首先回顾了 50 年前激光的发明, 说明基础科学创新的重大引领作用. 接着概述了 50 年来激光领域的重大进展, 包括激光器技术及其应用研究的进展; 举例说明了激光应用对基础科学的反馈和推动作用; 归纳了高能激光器的几个发展趋势; 分析了激光的军事应用及其科学技术支撑. 最后给出了激光 50 年发展史的 4 点启示和今后的 3 类发展方向.

关键词 激光, 50 年, 启示

Some enlightenment from fifty years of laser development

DU Xiang-Wan

(Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract The discovery and development of the laser is one of the most important scientific and technological advances of the twentieth century. An overview is presented of the main achievements of laser device technology and applications in a wide range of areas over the past fifty years, with emphasis on the development of high power lasers. The paper presents four points of enlightenment from fifty years of laser science and technology, and three directions for its future development.

Keywords laser, fifty years, enlightenment

2010 年是激光发明 50 周年. 激光是 20 世纪最重要的科学技术成就之一.

在人类历史上, 原始技术的出现先于科学. 到了近代, 科学逐渐有了较为完整的体系, 科学(首先是物理学)的新发现, 深化着人类对客观世界的认识, 并引领了技术的创新和革命, 而工程技术的发展在改造客观世界的同时, 也不断提出新问题, 创造新手段, 推动科学的深入. 基础科学、应用科学、工程技术和生产活动相互促进, 并且与哲学、社会科学相互作用, 深刻地改变着人类文明的进程. 激光的发明和发展就是一个生动的范例.

1 历史性的发现^[1]

19 世纪的科学家们进行了关于电磁波的卓越的研究(包括理论和实验), 引入了黑体的概念来解释热辐射的能谱, 然而这一解释却与经典理论发生矛盾. 1905 年, 爱因斯坦在《关于光的产生与转化的一个启

发性观点》一文中, 把 1900 年普朗克引入的能量量子的概念推广到辐射的发射和吸收, 提出了光量子 and 光电效应的概念, 揭示了辐射的波粒二象性. 1916 年, 爱因斯坦在解释黑体辐射定律时, 又提出了受激辐射的概念. 随着微波波谱学的进展, 1954 年研制成第一台微波激光器, 1958 年, 美国的汤斯(C·Townes)和肖洛(A·Schawlow), 苏联的巴索夫(N·G·Basov)和普罗霍洛夫(A·Prokhorov)等人提出了激光的概念和理论设计. 在竞相研制世界上第一台激光器的努力中, 美国加利福尼亚休斯飞机公司实验室的梅曼(T·Maiman)首先成功, 于 1960 年研制成功第一台红宝石激光器. 同年末, 贾万等人研制成氦氖激光器. 我国的第一台激光器也于 1961 年在中国科学院长春光学精密机械研究所研制成功. 从此, 人们认识并掌握了一种新型的光辐射——受激辐射. 它具有方向性、高亮度、单色性和高相干性, 使自发辐射力所不及

2010-05-26 收到

[†] 研究员, 中国工程院院士. Email: .duxw@cae. cn

的许多事情开始成为现实,其中也包括使古代就产生的关于光武器的幻想有了科学的基础.激光从物理学的基础性、探索性研究大踏步地走向了一批新技术的开发和工程应用.

激光发现的这段历史启发我们:第一,要高度重视基础科学的研究,基础研究的新突破、新发现,打开新应用、新技术的大门,引领新的领域和方向.正是微波激射放大(maser)和激光(laser)的发现,开启了定向能技术这个崭新的方向;第二,实验与理论的矛盾,实验中出现的难以理解的现象,常常是新概念的生长点,抓住这个“难以理解”,深入研究,得到新的认识,就是原始性的创新.

2 50 年的巨大进展

2.1 激光器技术和应用迅速取得巨大进展

50 年来,激光器技术和应用迅速取得巨大进展,这主要表现在以下几个方面:

- (1) 激光器的品种迅速增加;
- (2) 激光器的输出功率水平不断提高,小、中、大功率一应俱全;
- (3) 激光器的输出体制多种多样:连续、高重频、单脉冲;
- (4) 激光脉宽从纳秒、皮秒短到飞秒甚至阿秒;
- (5) 激光功率密度可高达 10^{20} W/cm^2 以上;
- (6) 激光器输出的波长已达全光谱,长至亚毫米,短至 X 射线;
- (7) 分立的激光谱线达几千条,激光频率可调谐;
- (8) 激光器输出的光束质量,好的可达近衍射极限.

激光技术的应用和发展带动了多方面科学技术的进展^[2],如光学加工、材料、光电子技术、光学测量、自适应光学、衍射光学、大气光学、强场物理、瞬态光学等.同时,激光的应用范围不断拓宽.在科学研究、工业加工、通信、医疗、农业、信息、军事及精密测量、计量基准、文化娱乐等领域,完成了并正在发展着大量过去无能为力的工作.激光应用的开创性表现在:(1) 激光光谱技术比传统光谱技术分辨率提高了百万倍,灵敏度提高了百亿倍,把人类认识物质世界的历史翻开了新的一页;(2) 激光为信息技术的发展作出了新贡献,它开拓了丰富的频率资源,布满全球的光纤网,加上卫星通信网,形成了人类信息高速公路的基础.光存储、激光全息、激光照排、打印及条码扫描技术等,提供了全新的多样化的信息

服务;(3) 激光可在很小的区域上聚焦很高的功率密度,因而在工业制造中可进行精确的切削和表面改性,做精密的医疗手术;(4) 激光技术开辟了崭新的军事应用;(5) 多束激光作用于微型靶,可以产生激光核聚变,产生太阳内部或氢弹爆炸那样极高的温度和密度;利用激光又可以实现激光冷却,达到比液氮还冷得多的极低的温度,创造出另一种新的物质形态.几十年来,有多项诺贝尔奖颁发给了激光研究领域的科学家.

激光技术和相关技术的集成已形成了若干新兴的产业和重大的激光工程,其中有代表性的如:全球规模的光通信;用于研究核聚变物理的激光聚变点火工程;作为定向能武器代表的强激光武器等.

2.2 激光应用提出的问题及其提供的研究手段又促进了基础科学的发展

随着高功率激光技术的发展,非线性光学已成为一个重要研究领域,人们逐渐认识了激光与介质(包括大气)相互作用时产生各种非线性效应的物理本质和规律,它们产生的条件、特性、机理,如受激拉曼散射、自聚焦、热晕、光学和频与倍频、相干瞬态光学效应等;相应地发展了各种非线性光学材料及非线性光学效应的各种应用,如扩展激光的波长范围,发展非线性光学相位共轭技术.光学双稳则为研究自然界普遍存在的、包括混沌在内的非线性系统中的动力学行为提供了实用手段;超短、超强激光将对强场超快科学、相对论非线性物理、天体物理及宇宙学的研究提供新的手段和极端条件,为高能量密度物理学的研究创造了新环境;激光光谱学的高灵敏度和高分辨率使其可用于对物质的结构、能谱、瞬态的变化和微观动力学进行深入研究,进一步认识原子和分子的超精细结构,更精确地确定基本物理常数的数值.也正是借助激光,1995 年,人们利用激光冷却的方法,在实验室实现了爱因斯坦 1926 年预言的 Bose-Einstein 凝聚,并因此获得诺贝尔物理学奖;激光还在物理学与其他基础科学的交叉学科研究中,发挥了巨大的推动作用,如化学物理学、生物物理学(以激光为手段的分子雷达成为生命活细胞研究的工具就是一例)等.

2.3 高能激光器的几个发展趋势

2.3.1 气体—化学激光

在激光武器的发展史上,最先受到重视的是 CO_2 激光器,在经过一系列研究、试验之后,它已转向以工业加工应用为主.这一角色转变的根本原因来自光的波动性,它决定了激光的最小发散

角——衍射极限角与波长成正比。因而,高能激光系统的主激光器迄今的发展走过了如下的轨迹:

$\text{CO}_2 \rightarrow$ 化学激光(DF) \rightarrow 短波长化学激光(COIL), 相应的波长为: $10.6\mu\text{m} \rightarrow 3.8\mu\text{m} \rightarrow 1.315\mu\text{m}$. 这样就从物理原理上为使远场激光能量具有更好的集中度提供可能. 在用于定向能的高能激光领域,高能化学激光至今仍然是领跑者.

2.3.2 固体激光

用半导体激光器(DL)抽运取代氙灯抽运,使激光介质的热效应大为降低,为提高平均功率,降低能耗,改善光束质量和提高系统的可靠性开辟了新路,使高能固体激光起死回生.

尽管如此,热效应问题仍然存在,越是走向高平均功率,问题就越突出. 于是,不同的热管理思路,不同的冷却方式,不同的抽运方式,不同的激光介质材料和构形,导致不同类型激光二极管抽运固体激光(DPL)的创新发展(包括光纤激光器),甚至突破了全固态的概念范畴. 各种技术途径竞相克服各自的困难,逐步向高平均功率和高光束质量推进. 哪些技术途径能脱颖而出,尚有不不确定性. 除热管理外,能源效率、可靠性、寿命、降低造价等,也呼唤着新的创新. DPL 将首先推动各种脉冲体制强激光的应用,并对激光系统的紧凑和小型化作出重要贡献.

2.3.3 自由电子激光(FEL)

从太赫兹到硬 X 射线全面开花. 其中最引人注目的高平均功率 FEL, 仍是美国 Jefferson 实验室的红外 FEL 装置, 2006 年 10 月已达到 14.6kW 的高平均功率, 该装置包含了直流光阴极高亮度注入器技术、超导加速器技术、电子能量回收技术等多项新技术.

太赫兹是光谱区的长波段,有多种科学研究和军事应用价值. 俄罗斯新西伯利亚核物理研究所的 FEL 装置,除实现了长波红外 FEL 出光外,正在开展太赫兹的研究,其特点是同时具有数百瓦的高平均功率和兆瓦的脉冲功率,建设了生物学、计量学、分子光谱学、化学等 4 个太赫兹应用站. 中国工程物理研究院应用电子学研究所也实现了自由电子激光太赫兹波段的辐射.

2.3.4 硬 X 射线 FEL

美国斯坦福大学 SLAC 国家加速器实验室的 LCLS(linac coherent light source),于 2009 年 4 月得到了世界上首束硬 X 射线 FEL. 主要参数:波长 λ 为 0.15—15nm (1.5—150Å, 1.5 Å 相应 8keV 能量),脉宽为 80fs,重复频率为 10—120Hz,脉冲内光

子数为 10^{12} 个(mJ/Pulse),峰值功率为 10GW.

这是光源科学史上的一个重要里程碑. 短脉冲和短波长的结合,使得人们可以对单原子和单分子成像,且时间分辨可实现观测化学反应过程,为用户提供高亮度的硬 X 射线激光光源,打开了新的科学探索应用领域,同时也展现了自由电子激光的独到能力.

硬 X 射线 FEL 是光波段最短波长的激光,它对电子束的能量和质量都要求很高, LCLS 将电子加速到 4.3—13.6GeV,波荡器的磁铁周期为 3cm,总长 112m,保持电子束的群聚,使受激辐射是相干的,这是一种以自放大的自发辐射(SASE)方式为主的短波长 X 射线 FEL. 欧洲多国、日本、韩国等也有 FEXL 的研究计划. 似应看到, FEL 将成为激光领域一个新的战略制高点.

2.4 军用激光及其支撑

在激光器发展的基础上,军用激光技术成了一个重要的领域;反过来也可以说,从激光发现之初,人们就一直在努力将其用于军事目的,并以此牵引着激光器和相关科学技术的发展.

一般军用激光包括激光瞄准、激光测距、激光制导、激光雷达、激光陀螺、激光引信等,它们与激光武器的不同在于,并非用激光本身的能量(或功率)去毁伤靶目标,而是作为武器的部件或武器系统的部件,增强或提高武器的性能.

激光武器是军用激光的一大类,是定向能武器的代表,是直接利用激光的能量(或功率)去毁伤(包括干扰)靶目标的武器. 目前,国际上激光武器已成了一个家族,既包括高能(高平均功率)激光、高功率脉冲激光,也包括一些中、低功率的激光武器. 正在走向实用的应用目标包括:反导防空(反导弹、反飞机、反无人机等目标),空间信息对抗激光武器,飞机自防护和空对地精确打击,以及用于公安、反恐的致盲激光枪等. 这些应用既有战术性的,也有战略性的.

激光武器的布基方式有多种,目前有关国家以发展地基和机载系统为主,也在发展舰载、天基和近空间平台的应用. 美国海军在支持自由电子激光的研究,美国陆军在支持地面防空高能激光武器研究,美国空军于 2010 年 2 月试验了用机载化学氧碘激光“击落了两枚测试用导弹”^[3]. 美国三军正在联合推进 100kW 固体激光计划.

激光武器是一个系统,由若干个子系统构成. 除适当的激光器外,其效能取决于一系列科学技术的支撑. 从国际激光武器发展的情况看,它不仅带动着

强激光器的发展,还带动着一系列科学技术的进步.例如,高性能的目标捕获、跟踪与瞄准系统,自适应光学技术,信标与照明技术,光学部件加工技术,激光探测与传感器技术,模拟与仿真技术,武器平台及其隔振制稳技术,指挥、控制、通讯系统,作战效果的评估技术.这些技术的接口、匹配和集成,是以产生一个高质量、高效能的实用系统为目的.支撑激光武器的两大科学问题是:激光与靶目标相互作用的物理机理与毁伤阈值的研究;激光在传输介质(如大气)中传输的研究.

3 启示和展望

激光 50 年的进展可给人多方面的启示,这里只提几点:

第一,科学无国界,反映客观真理的科学规律,终将成为各国科学界的共识,成为“所见略同”.激光的概念就是由美国和前苏联科学家在同一年提出的;激光核聚变的概念则是中国和前苏联科学家于 1964 年分别独立提出的;激光发展的技术路线图,各国都有异曲同工之处(尽管由于需求的不同会有产品上的差异).广泛的基础学科研究方面的交流合作,会促进水涨船高.

第二,新概念、新思路和新技术是战略制高点.原始创新有大有小,谁成为新概念、新思路、新技术的原创者,谁就会引领新的发展方向,走在最前列.一个国家、一个单位想要走在前头,不能靠保守,只能靠不断的创新,成为创新驱动型.

第三,成就一件对社会(经济或国防)有重大意义的事,需要基础研究和工程技术研究的结合和互动.基础科学的引领,要通过工程技术的实践变成实际的生产力;同时,工程技术会造就一些新的环境条件、研究对象、研究手段并提出新的研究课题,推动基础科学的深入和发展.激光 50 年的进展深刻体现

了这一点.

第四,需求牵引和技术推动可以成为正反馈链条.当需求合理而迫切,但技术能力不能满足需求时,人们会深入研究差距之所在,挖掘思路和技术的潜力,解决造成差距的障碍,尝试各种方案,力求满足需求,这是一个催生新技术的过程.

如果说,理论和实验的矛盾是新概念的生长点,那么,需求与能力的差距则是新技术的生长点,激光技术的发展正是经历这样一个新技术的生长点而逐步发展起来的.

展望新的 50 年,激光技术将在 3 个方向走出更宽阔的大道:

(1)普及:即普及更多、更广的激光技术应用.从硬 X 射线到太赫兹的整个光波段,随着各种激光器及相关技术研发的成熟和商品化,激光在科学研究、人民生活、国民经济、国防装备等各方面都会做出新的成就.

(2)提高:激光科学技术和工程将发展到更新更高的水平.在各种激光技术追求更好的光束质量的同时,高功率激光将达到更高的脉冲功率;高能激光将达到更高的能量;激光武器将持续发展,不同类型的激光武器将先后走向实用,其系统性能将不断改进提高;将出现更短的激光脉冲、更高的激光场强……;还会出现新的激光器,出现一系列新型的激光仪器和技术手段.激光科学技术和应用前景光明.

(3)交叉:激光技术将在物理、化学、材料、生物、医疗、农业、信息技术等领域得到广泛的交叉学科应用,成为科技前沿发展的锐器.

参考文献

- [1] 李佩珊,许良英.20 世纪科学技术简史.北京:科学出版社,1999
- [2] 高技术要览——激光卷.北京:中国科学技术出版社,2003
- [3] 美国《防务新闻》周刊网站 2010 年 3 月 29 日报道