

激光与新材料

研究员、博士生导师 魏志义

(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

摘要: 激光技术的发展在很大程度上得益于相关新材料的问世和应用。本文就激光研究中几个最主要参数指标的进展, 综述介绍了材料科学所起的关键作用, 从一个方面说明了学科交叉与合作对于科学技术进步所起的重要作用。

关键词: 激光 材料 啁啾脉冲放大 超快 光谱

New Materials in Laser Science

Professor WEI Zhiyi

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

Abstract: *The discovery and application of new optical material play the very important role in the history of laser science. In many case the remarkable progresses of laser science benefit from the invention of new laser media. In this paper I will review the contribution of new materials in laser science based on the recent revolutionary progress on laser power, pulse duration and the tunable wavelength range. These examples well shown the cross among different disciplines can greatly speed the development of science and technology.*

Key words: *laser, material, femtosecond, ultrafast, spectroscopy*

太阳及地球上形形色色的光源为我们的世界提供着光明, 科学家的研究表明, 这些普通光源的发光机理是发光物质中粒子由高能级向低能级的跃迁所致, 在通常情况下, 处于高能级的粒子数总是远远少于低能级的粒子数, 因此普通光源发出的光是一种随机的非相干光, 其单色性、强度很有限。但是, 如果人为地设法使高能级上的粒子数多于低能级, 即实现粒子数的反转, 并使反转后的粒子同步跃迁到低能级的话, 将会得到强度极高的相干光, 这种过程也叫做受激辐射光放大。实际上, 早在三十年代爱因斯坦就提出了这一想法和理论, 但人们一直未能从实验上找到可实现粒子数反转的材料。直到

1960年, 美国科学家梅曼才首次发现掺铬的红宝石晶体具有这种特性, 并由此研制成功世界上第一台激光器^[1]。

激光的问世可以说是20世纪最伟大的发明之一, 短短四十年, 激光的飞速发展创造了不胜枚举的辉煌成就, 其应用范围覆盖了医疗、科研、军事、通讯、工业、农业、家电、娱乐等众多领域, 成为现代科技的重要标志。目前, 激光的峰值功率已超过 1PW (10^{15}W)^[2], 聚焦后的功率密度达 $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$, 相当于数百万倍太阳的亮度; 利用锁模技术获得的脉冲时间宽度突破了 4fs (10^{-15}秒)^[3], 在这样短的时间内光所走过的距离也仅是普通人头发丝的五十分之

一左右,还不到两个光波长的长度,这些挑战极限的结果为众多前沿学科的发展提供了前所未有的创新机遇和实用工具,此外,通过波长调谐及非线性频率变换技术,人们不仅可以在可见光波段直接感受到激光五彩缤纷、赏心悦目的视觉效果,而且也实现了波长延伸到中红外至X射线区域的相干辐射^[4]。在结构方面,激光器也变得越来越紧凑实用,特别是随着半导体激光、光纤激光的快速发展,不仅使激光器出现在了普通商店的柜台上和家电产品中,而且也使一些多年来庞大复杂的激光器成为“便携”便携的工具。回顾激光技术发展的历史,人们不难发现,激光研究的多次重大突破都得益于新材料的出现和改进,可以说材料的发展对激光技术的进步起着重要的促进作用。

1 材料在强激光研究的发展中起着关键作用

激光器中用于实现粒子数反转的材料称作激光增益介质,是用来实现激光输出⁵的核心元件。增益材料的性质不仅决定着可产生激光的波长(颜色)、最短脉宽能力,而且也限定了可获得的最大功率。在目前众多的激光增益介质中,钕玻璃(Nd: glass)由于具有较大的储能密度及成熟的大尺寸生长工艺,因此一直是高能量激光的首选材料。

全世界曾经最大的Nova激光装置为典型的钕玻璃激光器^[5],这套建于美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)、占地面积相当于一个体育馆的巨型系统共由10路钕玻璃激光组成,其中最后一级放大介质为直径31.5厘米的盘片钕玻璃材料。两年前通过改用所谓的“啁啾脉冲放大技术”,人们从该装置中产生了峰值功率高达1.5PW的超强激光,相当于数百万倍太阳的亮度。

另一套全新的NIF(国立点火装置)激光目前正在美国LLNL建设之中^[6],该系统采用全新的设计,共由192束钕玻璃激光组成,每路光中包含有16根40×80厘米的大尺寸钕玻璃平板,整体工程计划于2006年完成,届时通过大口径KD*P晶体三倍频后,将产生总能量大于1.8MJ(百万焦耳)、峰值功率大于750TW(10^{12} W)、内部温度大于核聚变点火温度的紫外激光,从而实现激光受控核聚变的历史使命。这项投资数10亿美元的世纪工程,不仅能为科学家在无需真实试验的情况下,提供确保核武器性能可靠的数据,而且也向人类实现“惯性约束聚变能量工厂”迈进了一大步。

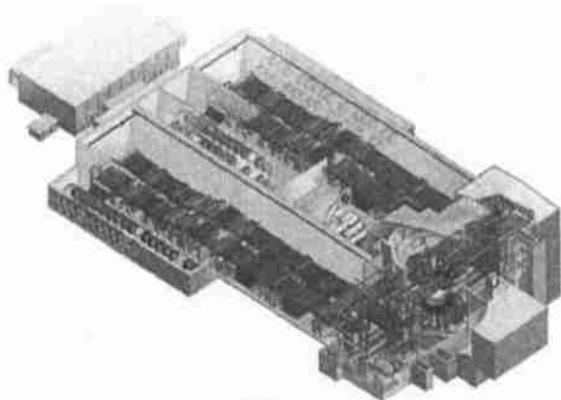


图1 位于美国利弗莫尔实验室(LLNL)的国家点火装置的建筑效果图

尽管钕玻璃材料在巨型激光系统中承担着至关重要的作用,但除了可大尺寸生长外,其综合性能在现有的固体激光介质中并不太好,而最新出现的新材料掺钕氟磷酸钙(Yb:FAP)^[7]、钕钆镱石榴石(Nd:GGG)^[8]等材料由于较高的饱和荧光通量、长的上能级寿命等优良的综合性能,其单位体积内可产生明显优于其它材料的激光能量,随着其大尺寸生长技术的日益成熟,无疑将是未来大功率强激光系统中取代钕玻璃的新一代激光材料。

2 新材料带动了超快激光技术的发展

超快激光也称超短脉冲激光,一直是激光技术的热门研究内容。在我们所处的自然界中,有许许多多未知的科学现象:如半导体中载流子的电子跃迁,植物光合作用中能量的转移,化学反应中的动力学过程等都发生在飞秒量级的时间范围内^[9],要揭示其中尚未认识的新现象,就必须采用时间尺度更短的脉冲去记录所发生的内容。目前这种超短脉冲的产生通常是采用特殊的锁模技术而实现的,借助这种技术追求所能得到的最短脉宽,是最具挑战性的研究目标之一。

理论分析表明,激光器所能产生的最短脉宽反比于增益材料的光谱宽度,这是由材料的性质所决定的。九十年代以前,以Rh6G(若丹明6G)为代表的染料物质一直是所有增益介质中增益带宽最宽的激光材料,因此其始终是研究超短脉冲激光产生技术的首选对象,并于1987年由美国科学家结合压缩技术产生了6飞秒的标志性结果,但是染料激光具有储能特性差、有毒却易挥发的缺点,不仅输出功率低,技术难度大,也很不容易稳定,使其在实用化发展和应用研究方面受到较大限制。

1991年,英国科学家通过采用固体掺钛蓝宝石激光而发现的自锁模现象翻开了超短脉冲激光研究的全新篇章^[10],这种由美国材料科学家于1986年首次生长出的新晶体不仅取代染料介质而一跃成为目前增益带宽最宽的激光材料(其带宽支持3飞秒的光脉冲)^[11],而且由于固体介质所特有的克尔效应使得传统复杂的超短脉冲产生技术变得十分简单,除输出功率有了数量级的提高外,稳定性也大大改善,并已成为高技术产品在化学、生物等学科的前沿研究中发挥着重要的作用,短短几年中,以钛宝石晶体为核心的自锁模激光迅速成为激光技术领域的研究热点,其标志性的结果——脉宽不断被刷新。1997年,笔者与荷兰的同事通过采用新型压缩技术,成功突破了由染料激光保持十年之久的世界纪录,得到了4.6fs结果^[12],一年后这一纪录又被奥地利科学家产生的4fs所取代^[13],人们前后两年里能接连突破飞秒纪录维持多年的“极限”,正是得益于激光新材料的优良性能。

掺态蓝宝石晶体出现后,人们又相继生长出Cr:LiSAF、Cr:Mg₂SiO₄、Cr:YAG等一系列宽调谐固体激光材料,并都实现了自锁模飞秒脉冲激光输出。这些晶体虽然在输出功率、脉冲宽度、技术难度等方面逊色于钛宝石激光,但其不同的波长填补了钛宝石激光所不能覆盖的一些范围,这在一定程度上对于拓宽飞秒激光的应用范围具有重要的意义。

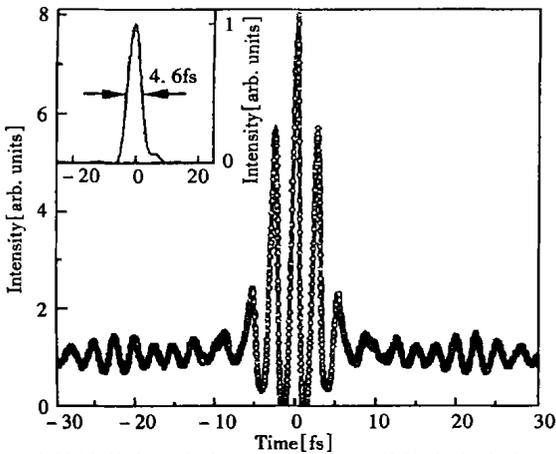


图2 由掺钛蓝宝石激光产生的4.6飞秒的激光脉冲干涉相关曲线,其持续时间仅相当于1.7个光周期

3 新材料丰富了激光光谱的内容

激光的优点之一是单色性好,根据选择吸收的原理,不同的应用及研究对象对激光波长有着不同的要求,面对丰富多彩的自然世界,人们总是希望能得到尽可能多的激光谱线以满足各种不同的研究和

应用需要。在激光问世最初的几年里,由于材料数量所限,人们所能得到的谱线仅屈指可数而已,经过科学家近四十年孜孜不懈的努力,目前可产生激光的材料中仅固体就有近百种之多,新材料的相继问世虽然不同程度地丰富了激光波长的覆盖范围,但迄今实用可行的也仅二三十种而已,而且所能产生的波长大多比较单一。尽管人们很早就知道通过频率变换的方法而扩展激光波长的原理,然而由于非线性晶体特性的限制,多年来一直未能得到稳定、可靠、实用的波长可调谐激光,直到八十年代中后期,随着KTP、BBO、LBO等一系列高性能晶体材料的问世,这一情况才发生了根本性的转变。

KTP最先由美国杜邦公司发明,这种晶体由于具有极高的非线性光学系数,因此问世不久就引起了近红外激光倍频的研究热潮,并在倍频脉冲Nd:YAG激光中取得了高于70%的效率,值得一提的是在准连续泵浦的研究中,我国天津大学姚建铨院士等人于1986年获得了倍频绿光功率大于30W的结果,从而将一研究的国际水平向前推进了一大步。目前采用KTP倍频的连续Nd:YAG激光的绿光最高功率已达超过了100W,并作为关键元件带动了市场广泛的全国化中小功率绿光激光产业的形成和发展,此外其优良的非线性光学性能也使得它是产生参量激光的理想选择,全世界第一台飞秒参量激光的问世正是通过采用这种晶体实现的^[14],由此开始的飞秒参量产生的研究已成为飞秒激光科学的重要内容之一。目前通过改性KTP而相继问世的KTA、RTA、CTA等晶体进一步将飞秒参量激光的信号光波长扩展到了1.5 μ m以上。正是KTP晶体的优良特性,人们一度曾将其称之为“全能晶体”。

然而这种晶体并非完全全能,随着倍频功率的提高,由于破坏阈值而导致的晶体损伤和不稳定将严重制约着其实用化发展,此外由于透过区域的限制,KTP也不能用于紫外激光的产生。相比之下,由我国科学家陈创天等人发明的BBO、LBO晶体除了较高的非线性系数外,同时也弥补了上述两方面的不足,其优良的综合性能不仅改变了连续及脉冲光学参量激光研究长期徘徊不前的局面,而且通过倍频及和频后可产生的紫外光脉冲扩展到了173nm^[15]。目前采用LBO倍频的绿光Nd:YAG激光的实验室结果已大于100W,近年来由美国有关公司推出的以其作倍频的5W及10W全固态绿光激光器由于出色的稳定性,已成为全球最走红的激光产品。通过BBO进一步四倍频Nd:YAG激光,数年前就已有了连续功率大于1W的266nm紫外

激光报导,最近又有报道通过采用非线性晶体 CLBO 作四倍频,所得 266nm 紫外激光平均功率大于 20W 的研究结果^[16]。在参量激光研究方面,无论是采用 Nd:YAG 激光二倍频(532nm)、三倍频(355nm)、四倍频(266nm)泵浦的纳秒(10^{-9} 秒)和皮秒(10^{-12} 秒)参量光,还是由钛宝石激光泵浦的飞秒参量光,由于 BBO、LBO 和 KTP 等晶体的使用,从而使得可调谐激光在连续工作方式及上述各量级的脉冲工作方式上都取得了成功。这些重要结果的取得,正是得益于 LBO、BBO 晶体极高的抗损伤能力和紫外透光性,作为具有划时代意义的晶体,其先后在美国被评为十大光电产品之一。到目前为止,结合倍频、和频及参量等非线性频率变换过程,人们已能获得可调谐范围从紫外到中红外波长的皮秒及飞秒激光辐射,正如美国科学家 K. Wilson 所讲,这些丰富的波长织就了激光绚丽的“彩虹”^[17]。

激光的发展,材料往往起着先导作用,激光技术今天的成就,很大程度上是在激光材料(包括非线性



图3 飞秒掺钛蓝宝石激光泵的光学参量振荡器所输出的多波长可调谐飞秒激光

材料)研究生长的基础上取得的,虽然许许多多激光材料由于目前不再常用而提及不多,但在激光技术的发展中也曾起过承先启后的作用。近年来,新的激光材料正以前所未有的问世速度向我们走来,如 Ce:LiSAF、Ce:LiF 紫外可调谐晶体、超晶格非线性光学晶体、KBBF 深紫外非线性光学晶体等。相信随着新型优质激光材料及非线性光学材料的不断发明,结合日益成熟普及的半导体激光泵浦技术,激光技术的各项研究不仅会取得新的重大突破,而且未来的激光器也将变得更加小巧、实用、可靠。

参考文献

- [1] T. H. Maiman, Nature 1960, 187: 493~494
- [2] M. D. Perry et al., Opt Lett., 1999, 24: 160
- [3] G. Steinmeyer et al., Science., 1999, 286: 1507~1512
- [4] M. H. Dunn and M. Ebrahimzadeh, Science 1999, 286: 1513~1517
- [5] M. D. Perry and G. Mourou., Science 1994, 264: 917
- [6] T. Ditmire, in CLEO, OSA Technical Digest, CWB1, 2002
- [7] H. Yang, Z. Wei et al. Chin Phys. 2001, 10: 1136
- [8] G. F. Albrecht et al., SPIE, 1998, 3343: 661~666
- [9] C. V. Shank, Science 1986, 233: 1276~1280
- [10] D. E. Spence et al., Opt Lett, 1991, 16: 42~44
- [11] P. F. Moulton, J. Opt. Soc. Amer. B, 1986, 3: 125~133
- [12] A. Baltuška, Z. Wei, Appl Phys B, 1997, 65: 115~129
- [13] Z. Cheng et al; in Ultrafast Phenomena XI (Springer-Verlag, Berlin, 1998), pp8~10
- [14] D. C. Edelstein et al., Appl. Phys. Lett., 1989, 54: 1728
- [15] F. Seifert et al., SPIE, 1995, 2380: 73~79
- [16] T. Kojima et al. in CLEO, OSA Technical Digest, CThC5, 2001
- [17] K. R. Wilson and V. V. Yakovlev, J. Opt. Soc. Am. B 1997, 14: 444~447

作者简介

魏志义(WEI Zhiyi, 1963~),男,1984年合肥工业大学应用物理系毕业,1991年中科院西安光机所博士毕业后,现为中国科学院物理研究所研究员、博士生导师。首次提出并实现完全不同固体飞秒激光的被动同步技术,进行了飞秒激光包络及载波间相位(CEP)的测量和控制,开拓出相干合成单周期脉冲的一种可行途径;研制成功 1.4TW/25fs 的小型化超强超短掺钛蓝宝石激光装置;利用新的压缩原理与国外同行创造了 4.6fs 的超短脉冲世界纪录。设计开发成功综合性性能优良的若干激光器件产品。近年来在国内外著名杂志发表论文 30 余篇,被引用 100 余次,申请专利 10 余项。1998 年获中国科学院物理研究所优秀科技青年和饶毓泰光学奖。1997 年及 2000 年先后获科学院科技进步二等奖。2001 年获中国科学院优秀青年科学家奖。

(责任编辑:房俊民)