



·回顾与展望·

## 华北光电技术研究所固体激光技术发展历程

唐晓军, 姜东升, 李兴旺, 岳 威, 张冬燕, 陈一豪

(华北光电技术研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:** 概述了中国电子科技集团公司第十一研究所(又称华北光电技术研究所,简称中国电科十一所)自 1964 年以来在固体激光技术领域的研究工作,前三十年,助力我国“两弹一星”事业,奠定激光增益晶体自主可控基石,此后的发展,激光材料研究逐步聚焦,投身产业发展,激光器件细分领域广泛涉足,激光应用重点突破。择要介绍了中国电科十一所完成的重点工程情况,重要的技术突破,开拓过的专业方向,现在的行业地位,探讨了中国电科十一所未来激光技术发展的可能方向。

**关键词:** 固体激光技术; 需求牵引; 基础创新

**中图分类号:** TN248

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11884/HPLPB202032.200209

## Development history of solid-state laser technology of North China Research Institute of Electro-Optics

Tang Xiaojun, Jiang Dongsheng, Li Xingwang, Yue Wei, Zhang Dongyan, Chen Yihao

(Science and Technology on Solid-State Lasers Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** This paper summarizes the research work of North China Research Institute of Electro-Optics (NCRIEO) in the field of solid-state laser technology since 1964. In the first 30 years, NCRIEO had helped “two bombs and one satellite” and laid the foundation stone for independent and controllable development of laser gain crystals. Since then, the research on laser materials has gradually focused on industrial development, with extensive involvement in the subdivision of laser devices and breakthroughs in laser applications. This paper introduces NCRIEO’s completed key projects, important technological breakthroughs, developed professional directions and current industry status, discusses the development direction of laser technology at NCRIEO in the future.

**Key words:** solid-state laser technology; demand pull; blazing new trails

1960 年,美国科学家梅曼研制出了世界上第一台激光器,自此以后,激光科学与技术蓬勃发展,迅速渗透到军事、科研、医疗、工业加工等方方面面,成为 20 世纪与核能、电脑、半导体并称的最伟大发明之一。早在 1916 年,爱因斯坦就已提出有关受激辐射的概念,很长一段时间,科研工作者并未深入研究如何实现受激辐射,直到 1950 年,法国的布罗塞尔发明光泵激励技术,1953 年,汤斯实现微波激射,但是等到 1960 年梅曼实现首次激光辐射时,44 年已经过去了,在没有明确需求的情况下,技术进步并不迅速,而后随着激光技术发展逐步展示出诱人前景,人们的研究热情才被激发,各种需求应用场景被创造,激光技术进入了加速发展的快车道。

中国电子科技集团公司第十一研究所(又称华北光电技术研究所,简称中国电科十一所)自 1964 年以来,一直从事固体激光技术的研究工作,研究涵盖材料、器件、整机,涉及增益介质材料晶体生长、光学镜片加工镀膜、泵浦氙灯制备、泵浦腔加工、配套驱动电源研制、激光测距整机研制。作为面向应用,侧重工艺研究为主的工业部门研究机构,一直以需求为牵引,突破关键技术,以提供完整解决方案,交付产品为首要目标;另一方面,面对主要需求方的特点,自主可控,全产业链布局,在行业发展初期,对国内技术进步的推动是全方位的。曾几何时,中国电科十一所的增益介质晶体、镜片加工镀膜、泵浦氙灯、激光电源等撑起了国内固体激光技术研究活动甚至市场活动的半壁江山;随着国内市场经济的崛起,社会化分工的发展,尤其是民营经济的进步,中国电科十一所的核心作用才有所下

收稿日期:2020-07-20; 修订日期:2020-10-26

通信作者:唐晓军(1971—),男,硕士,正高级工程师,研究方向为固体激光技术;txj0012@vip.sina.com。

降,但依然在行业内保有举足轻重的地位,是中国光学光电子行业协会理事长单位,军委装备发展部光电子技术专业组挂靠单位,中国电子学会量子电子学与光电子学分会挂靠单位,军用固体激光技术国防科技重点实验室和国家固体激光工程技术研究中心依托单位,全国光辐射安全和激光设备标准化技术委员会秘书处挂靠单位,电子工业激光与红外专业情报网网长单位。

可以说,中国电科十一所激光技术的发展成就体现了自身定位准确,内部专业布局完善,需求牵引与技术内生发展良性循环等诸因素作用的必然结果。

## 1 中国电科十一所固体激光技术发展历程回顾

1964年,中国电科十一所成立激光研究室,按照当年计划体制的要求,以固体激光技术研究为主,随后提出以光雷达应用为牵引,主攻激光测距,首先在靶场激光测距应用上实现零的突破,在随后的“三抓”(718, G-179, 331), G-168, 三代人卫测距等工程应用需求带动下,中国电科十一所固体激光技术在材料生长、光学加工工艺、功能器件制作工艺、激光性能测试技术等方面均获得了长足发展。需求牵引,应用促进,是中国电科十一所激光技术发展的驱动力。

靶场测距技术的突破带来了应用的推广,应用遇到的问题推进了中国电科十一所激光技术的进步,固体增益介质从红宝石转到掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG),泵浦灯克服电极过热采用水冷电极技术,逐步解决高重复频率输出问题,随后的应用研发迭代,逐渐提高了固体激光器的可靠性。

在历史上的“三抓”, G-168, 人卫测距等工程中,中国电科十一所从事的均是以激光测距为主的应用工程,为我国火箭、导弹技术发展提供了基础弹道测量数据,进而助力我国“两弹一星”事业,现在看来当时的技术已经落后,逐步被淘汰,但在当时,不但满足了应用需求,而且就当时技术水平而言,横向比较,完全是国际先进水平,与世界上同类技术发展同步<sup>[1-2]</sup>。

在完成大工程的同时,中国电科十一所也在小型激光测距机工程应用中实现突破,早期的地炮指挥系统激光测距机是中国电科十一所第一个型号任务,批量装备部队;随后的长航时机载激光测距机,是国内首套采用二极管泵浦固体激光光源的激光测距机定型产品; H9 远程激光测距机是国内首次工程化应用多脉冲相关测距技术,显著提高小型激光测距机测程;近几年,不同技术路线的可机动部署的激光测距机测程突破百 km。另外,助力北斗导航事业的星载激光角反射器批量提供也是中国电科十一所激光应用领域技术突破的代表作之一。

期间中国电科十一所在固体激光技术领域的布局十分广泛,既有应用急需的脉冲调 Q 激光技术、锁模、倍频激光技术,也有基础性、前瞻性较强的板条激光技术,可调谐激光技术、二极管泵浦固体激光技术,随后的高能热容固体激光技术、光纤激光技术、中波红外固体激光技术等,但是主线基本围绕军用光电技术需求。在 2005 年以前,以激光测距、激光干扰应用为主,2005 年以后,瞄准激光武器应用,大力开展了高能激光技术研究,先后探索了热容体制、薄片体制、光纤体制、板条体制等几种技术路线。

20 世纪 90 年代,脉冲调 Q 激光器、锁模激光器已可以给兄弟单位提供实验室应用样机。从泵浦技术发展角度来看,20 世纪末灯泵浦固体激光技术已趋于成熟,二极管泵浦固体激光技术正蓬勃发展<sup>[3]</sup>。1992 年报道板条状高平均功率 Nd:YAG 激光器实现 350 W 激光输出,灯泵浦,重复频率 20 Hz<sup>[4]</sup>; 1997 年报道国内第一台 kW 级 Nd:YAG 连续激光器研制成功,谐振腔内四只晶体棒串接<sup>[5]</sup>; 1999 年报道采用国产激光二极管,实现调 Q 单纵模窄脉宽输出<sup>[6]</sup>; 2001 年报道采用 Nd:YAG 固体板条,脉冲氙灯泵浦,变反射率输出镜非稳腔,实现 kW 级激光输出,光束质量优于 3 倍衍射极限<sup>[7]</sup>, 2003 年实现 1.064  $\mu\text{m}$ , 10.59 J ns 级脉冲输出,采用了单纵模种子源,多级圆棒放大, SBS 相位共轭控制光束质量,最后通过管状放大器实现大能量输出<sup>[8]</sup>; 2005 年报道采用 Nd:YAG 圆棒增益介质,二极管泵浦、声光调 Q, 内腔倍频实现高功率绿光输出功率 120 W<sup>[9]</sup>。21 世纪初的开始五年,二极管泵浦固体激光技术迅速成熟,各种二极管泵浦技术方案走出实验室实现产品化; 2006 年光纤激光器实现 kW 级输出<sup>[10]</sup>, 2007 年热容固体激光器实现 8.7 kW 激光输出<sup>[11]</sup>, 2008 年二极管泵浦固体板条激光器实现万 W 级输出<sup>[12]</sup>, 受益于二极管激光器技术的迅速发展,中国电科十一所研制的固体激光器输出功率迅速提升,成为国内第一个实现固体激光器万 W 级输出的研究单位。2010 年报道采用 Nd:YAG 增益介质, 1319 nm 基波激射,声光调 Q, 内腔倍频实现百 W 级红光输出<sup>[13]</sup>, 2014 年报道全光纤窄线宽光纤激光器实现 780 W 激光输出,线宽达到 2.9 GHz<sup>[14]</sup>; 2015 年报道采用 ZGP 光参量振荡双谐振 OPO 实现中波红外 26 W 输出<sup>[15]</sup>, 2019 年报道实现百 W 级 1.94  $\mu\text{m}$  激光输出<sup>[16]</sup>; 期间二极管泵浦脉冲调 Q 固体激光器批量供应激光测距、测照应用,中波红外输出激光器实现装备应用,可见光波段输出激光器实现产品提供并实现装备应用,固体激光技术的研究范围不断扩展,输出功率更高,波长覆盖范围更广。

正是这种激光器件研发的需求背景,中国电科十一所的激光晶体生长技术,光学加工、镀膜技术,得到了极大促进,在21世纪初,激光晶体材料销售已占据了国内70%的市场份额,激光晶体生长工艺线完成了对外技术转让。

事实上,中国电科十一所激光晶体材料研究开发工作与激光器件技术同时起步,始于1964年,最早开发的是红宝石( $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )激光晶体。1965年开始全面转入到Nd:YAG晶体研发,早期探索了熔盐法、水热法和提拉法多种不同的生长技术途径,通过综合对比晶体质量和获得大尺寸晶体的工艺性,于1966年选定了感应加热熔体提拉法,此后一直沿着该技术路径,不断地提升YAG系列激光晶体的尺寸和质量。

20世纪七八十年代,是中国电科十一所激光晶体研究硕果累累的年代,一方面常规使用的Nd:YAG晶体质量得到了有效的提升,实现了产品化;另一方面,在国内率先开发出了一系列激光晶体产品,例如1969年研制出了掺钕氟磷酸钙(Nd:Ca-FAP)晶体,1971年研制出了掺钕铝酸钇(Nd:YAP)晶体,1972年研制出了掺钕硅酸氧钇钙晶体(Nd:CaY<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>O),1978年研制出了掺钕氟化铍(Nd:YLF)激光晶体,1981年研制出了掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)晶体,1982年研制出了掺钕铝酸镁镧晶体(Nd:LMA),1992年研制出了高品质2 μm波段的共掺铈铬铽钇铝石榴石(Ho:Cr:Tm:YAG)晶体,1993年发明了共掺铈铈铬钇铝石榴石(Nd:Ce:Cr:YAG)激光晶体<sup>[17-18]</sup>。在1983年,更是率先在世界上发现了Cr<sup>4+</sup>离子在Nd:YAG晶体中的被动调Q特性,研制出了Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q晶体,这一成果至今仍在固体激光器上广泛使用,该发现比美国和苏联早了5年以上时间<sup>[19]</sup>。

20世纪90年代后,中国电科十一所激光晶体材料的研发工作由20世纪七八十年代广种薄收的状态,逐步转变为重点集中研发。一方面着重于广泛使用的YAG类激光晶体材料产业化建设,另一方面重点开发高功率激光器、新波长固体激光器用的各种优质大尺寸激光晶体材料和复合激光晶体材料。20世纪90年代末,中国电科十一所先后引进了美国和俄罗斯的上称重自动控径单晶炉,用于生长激光晶体,经过消化、吸收再创新,于2000年初实现了上称重自动控径激光晶体生长炉的国产化,并迅速在YAG生产线和新晶体研发上进行了推广应用,于2008年左右,建立起了一条超过40台单晶炉、能够生长直径60 mm以上YAG自动化晶体生产线,到2018年,自动化YAG生产线规模已经超过了80台单晶炉。

在发展YAG激光晶体产业化的同时,重点开发了高功率固体激光器和新波长固体激光器用的各种掺杂YAG,GGG,YLF,YAP等激光晶体的优质大尺寸晶体生长技术和热扩散键合技术,在过去20年的时间里,晶坯尺寸不断增大,晶体的光学均匀性显著提升,静态光学指标均有飞跃式的发展。到2019年,YAG激光晶体毛坯的尺寸已经突破8英寸,最大达到220 mm,等径长超过210 mm,整根晶体重量达63.7 kg,这是迄今世界上最大尺寸YAG激光晶体<sup>[20]</sup>。在2000年,中国电科十一所率先在国内研制出了YAG键合激光晶体,并测试了键合晶体在降低激光晶体热效应方面显著的优势,此后逐步开发了一系列各向异性、异质键合激光晶体,键合晶体复合面积不断增大,到2019年,最大键合面积可达30 mm×120 mm。

相应的光学冷加工工艺、镀膜工艺也是同步发展的,中国电科十一所也是从1964年始,便努力从事精密光学元件加工技术、光学薄膜技术研究,是我国最早开展光学制造研究的单位之一,专业研究内容覆盖了大口径、非球面、衍射面、离轴等光学精密元件制造,紫外、可见至红外波段各类高端光学薄膜设计、测试与制造,各类镜头组件光学设计、仿真、研发等多个专业技术领域。1995~2005年主要研究光学平面和光学玻璃可见、近红外光功能薄膜元件<sup>[21-22]</sup>。

2005~2013年随着光学技术的迅速发展,光学元件产品的尺寸、曲率面型多变,光谱向短波紫外和长波红外拓展,光学冷加工类别精度、薄膜性能、装调过程测量控制、光学系统整体性能测试等能力也迅速提升。

2013~2019年能够针对宽光谱、多光谱、大口径连续变焦超广角光学系统的设计要求,生产大口径、非球面、衍射面、离轴元件制造、高透射、大曲率、锥角入射、宽波段增透的薄膜等一系列高精密光学产品。同时,光学组件的设计仿真、复杂面型要求的数控光学元件研发、高性能激光与红外薄膜制备、光学设备开发等得到了全方位发展。

光学薄膜专业目前共取得科研成果300余项,广泛应用于军工、医疗、教学、科研、生产等多个领域,其主要产品横跨红外与激光两大技术领域,涵盖从零部件到组件及光学设备多个门类,具有高技术产品研发及规模化生产制造能力。

## 2 未来发展方向前瞻

中国电科十一所目前激光技术研究围绕探测、干扰、硬杀伤武器所需光源以及光电探测整机技术展开,高功率表层增益板条激光技术、窄线宽光纤激光技术,激光远程探测技术,优质大尺寸激光晶体生长技术,多波段、多脉宽适应恶劣环境的小型高可靠固体激光技术构成了发展主线;未来发展的主要方向依然会围绕这些技术方向,

瞄准的都是军用光电技术需求。在产业发展方向,以及科研、医疗等领域,还看不到大力发展的苗头,对比近些年国内外激光技术产业发展的风起云涌,中国电科十一所的声音略显单薄,这些实际是跟中国电科十一所自身禀赋相适应的。拓展方向,无论是产业方向还是技术方向,都在努力尝试,但是还没有大幅度的跨越式发展;换个角度来说,延长线发展,跟随策略风险小,原创、核心技术突破则伴随着巨大的风险,作为独立核算的单位,决策中不得不权衡生存、发展、甚至人性。目前看到的技术方向还得坚持,以明确的需求牵引为主线,大抵是一种延长线式的发展,应用要非常清晰才会投入。事实上通过统计中国电科十一所近十年和上个十年发表文章情况,可以发现,关键技术突破的步伐趋缓了,既有发展路径面临动力不足的问题。

### 3 结 论

在科研工作中,需求牵引与技术推动,原创与跟随,延长线发展与基础创新,研究机构面临的风险是不同的。技术突破的枚举法、遍历法意味着大量试错,不断积累,才能够从中找到正确的方法,所谓的原创技术、基础研究,也大抵如此,广种薄收。而随着管理的规范,经济效益的精准计算,体制内单位不会轻易冒险,原创与工艺技术的突破就变得困难重重,大到半导体工艺、航空发动机、碳纤维材料等,往往看上去起步阶段大家几乎同步,差距没多大,走着走着就拉开距离了,其实起步的基础并不一样,过程中的投入更是不同,没有大量试错,快速迭代,实际上基础创新、核心技术突破很难获得,未来发展关键技术往往受制于人,同质化竞争举步维艰,取舍之间,值得深思。

#### 参考文献:

- [1] 梅遂生. 难忘的岁月——八十年回顾[M]. 北京: 北京恒生数码印务有限公司, 2011: 91-168. (Mei Suisheng. Unforgettable years — eighty-year review[M]. Beijing: Beijing Heng Sheng Digital Printing CoLtd, 2011: 91-168)
- [2] 梅遂生. 我所激光科研三十周年[J]. 激光与红外, 1994, 24(4): 10-15. (Mei Suisheng. The 30th anniversary of laser R & D at NCRIO[J]. Laser & Infrared, 1994, 24(4): 10-15)
- [3] 周寿桓. 固体激光技术研究[J]. 激光与红外, 1994, 24(4): 18-22. (Zhou Shouhuan. Solid state laser technology[J]. Laser & Infrared, 1994, 24(4): 18-22)
- [4] 张世文, 陈学峰, 张润, 等. 板条状高平均功率Nd:YAG激光器研究[J]. 激光与红外, 1992, 22(6): 33-38. (Zhang Shiwen, Chen Xuefeng, Zhang Run, et al. The study of the slab Nd:YAG laser with high average power output[J]. Laser & Infrared, 1992, 22(6): 33-38)
- [5] 杨逸民. 国内第一台千瓦级Nd:YAG连续激光器研制成功[J]. 激光与红外, 1997, 27(5): 279. (Yang Yimin. The first kilowatt-level Nd:YAG CW laser developed successfully in China[J]. Laser & Infrared, 1997, 27(5): 279)
- [6] 姜东升, 赵鸿, 周寿桓, 等. 二极管泵浦的固体激光器模式控制技术[J]. 激光与红外, 1999, 29(1): 24-26. (Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Zhou Shouhuan, et al. Mode control technology on diode pumped solid state laser[J]. Laser & Infrared, 1999, 29(1): 24-26)
- [7] 唐晓军, 张世文, 杜涛, 等. 具有二维变反射率输出镜的谐振腔设计研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(5): 309-311. (Tang Xiaojun, Zhang Shiwen, Du Tao, et al. Study of resonator with a two-dimension graded reflectivity output coupler mirror[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(5): 309-311)
- [8] 王运谦, 刘朗, 黄茂全, 等. 大口径管状Nd:YAG放大器[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 246-248. (Wang Yunqian, Liu Lang, Huang Maoquan, et al. Tubular Nd:YAG amplifier of big caliber[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(4): 246-248)
- [9] 姜东升, 赵鸿, 王建军, 等. 120 W的二极管泵浦Nd:YAG绿光激光器[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(s0): 7-10. (Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun, et al. 120 W diode pumped green Nd:YAG laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(s0): 7-10)
- [10] 赵鸿, 周寿桓, 朱辰, 等. 大功率光纤激光器输出功率超过1.2 kW[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 930. (Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, et al. High power fiber laser output over 1.2 kW[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(10): 930)
- [11] 王超, 周寿桓, 唐晓军, 等. LD泵浦8.7 kW固体热容激光器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 77-78. (Wang Chao, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, et al. Experimental investigation on 8.7 kW laser-diode pumped solid state heat capacity laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 77-78)
- [12] 王超, 唐晓军, 徐鑫婧, 等. 输出功率11 kW的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2807-2809. (Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Lijiang, et al. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2807-2809)
- [13] 王建军, 邹跃, 赵书云, 等. 二极管抽运百瓦级红光固体激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1560-1563. (Wang Jianjun, Zou Yue, Zhao Shuyun, et al. Hectowatt-level diode pumped solid-state red laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1560-1563)
- [14] 张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. 780 W全光纤窄线宽光纤激光器[J]. 物理学报, 2014, 63: 134205. (Zhang Liming, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. 780 W narrow linewidth all fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63: 134205)
- [15] 韩隆, 苑利钢, 陈国, 等. 26 W中波红外固体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42: 0302004. (Han Long, Yuan Ligang, Chen Guo, et al. 26 W mid-infrared solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42: 0302004)
- [16] 苑利钢, 周寿桓, 赵鸿, 等. 109.5 W输出1.94  $\mu\text{m}$ 波长Tm:YAP固体激光器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48: 0405006. (Yuan Ligang, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. 109.5 W output 1.94 micron Tm:YAP solid-state laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48: 0405006)
- [17] 张英侠. 我国激光晶体的研究进展[J]. 中国激光, 1984, 11(8): 460-463. (Zhang Yingxia. The research progress of laser crystals in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 1984, 11(8): 460-463)

- [18] 张英侠. 谈谈华北光电所的激光晶体研究[J]. 激光与红外, 1994, 24(4): 16-17. (Zhang Yingxia. Memory and hopes — about investigation of laser crystals of NCRIEO[J]. Laser & Infrared, 1994, 24(4): 16-17)
- [19] 桂尤喜, 冀天来, 薛志银, 等. 兼有受激辐射与可饱和吸收二重特性的激光晶体CN85108844[P]. 1985-12-14. (Gui Youxi, Ji Tianlai, Xue Zhiyin, et al. A laser crystal possessing dual properties of stimulated emission and saturable absorption CN85108844[P]. 1985-12-14)
- [20] 杨国利, 韩剑峰, 李兴旺, 等. 提拉法生长直径8 inch Yb:YAG激光晶体[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(7): 3-4. (Yang Guoli, Han Jianfeng, Li Xingwang, et al. Growth of 8-inch Yb:YAG single crystal by Czochralski method[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(7): 3-4)
- [21] 朱震. 光学薄膜——激光技术的一个重要基础[J]. 激光与红外, 1994, 24(4): 68-71. (Zhu Zhen. Optical film — an important basis for laser technology[J]. Laser & Infrared, 1994, 24(4): 68-71)
- [22] 朱震. 光学薄膜在激光与红外技术中的应用[J]. 激光与红外, 2006, 36(s1): 792-796. (Zhu Zhen. Application of optical films in laser and infrared technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(s1): 792-796)