

文章编号 1004-924X(2016)12-2889-07

惯性约束聚变激光驱动装置 用光学元器件的研究进展

邵建达^{1*}, 戴亚平², 许 乔³

1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800;
2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621000;
3. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610000

摘要:介绍了为提高惯性约束聚变(ICF)激光驱动装置的光束质量和输出功率,我国在神光系列激光装置的建设、运行和性能提升方面开展的工作。综述了我国近年来 ICF 激光装置用光学元器件的重要研究进展。文中涉及了高纯金属铪和磷酸二氢钾(KDP)等原材料的制备和四大主材(钕玻璃、高纯度 KDP、熔石英和 KDP/高掺氘 KDP(KDP/DKDP 晶体)的熔炼、加工和生长。描述了元器件的冷加工(针对钕玻璃、白玻璃、KDP 晶体)技术和镀膜技术(针对介质膜和化学膜)。最后,给出了针对大口径光学元件工序检及终检开展的多项关键检测技术。文中介绍的关键技术与工艺满足了绝大部分光学元器件的需求,显著提升了光学元器件的研发和生产能力。

关键词:惯性约束核聚变(ICF)激光装置;光学元器件;材料制备;光学检测;综述

中图分类号:TL632; TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.2889

Progress on optical components for ICF laser facility

SHAO Jian-da^{1*}, DAI Ya-ping², XU Qiao³

1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
3. Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610000, China)

* Corresponding author, E-mail: jdshao@siom.ac.cn

Abstract: To improve the beam quality and output powers of driving optical components for Inertial Confinement Fusion (ICF) laser facilities, this paper introduces the construction, operation and performance enhancement of SG series laser facilities in China. It reviews the research working and developments of optical components for the ICF laser facilities in recent years. These workings involve the preparation of raw materials, such as high purity metal hafnium(Hf) and Potassium Dihydrogen Phosphate(KDP), and the melting, processing and growing of four kinds main materials, including neodymium glass, high purity KDP, fused quartz and KDP/DKDP (doped deuterium KDP). For fabrication of the optical components, it describes the cold machining technology for neodymium glass, white glass, KDP crystals and the coating technology for dielectric films and chemical films. Finally, the pa-

收稿日期:2016-10-26;修订日期:2016-11-17.

基金项目:国家科技专项资助项目

per also focuses on some key test technologies of the large diameter optical components in process inspection and final inspection. These key technologies and machining processing proposed in this paper meet the most requirements of the optical components in whole machining process and improve the development and production capacities of optical components in ICF laser facilities.

Key words: Inertial Confinement Fusion (ICF) laser facility; optical component; material preparation; optical test; review

1 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement, ICF)激光驱动装置是一项庞大、复杂且系统性极强的超大型光学工程,这个大型光学系统中包含片状玻璃放大器、反射镜、透镜、偏振元件、晶体、窗口以及衍射光学元件等各种性能的光学元器件。以当前世界上规模最大、能量最强的激光器——美国国家点火装置(NIF)为例,它包含了大约 7 500 块大尺寸光学元件(直径在 600~1 000 mm)和 30 000 块小尺寸光学元件^[1]。对于 ICF 驱动的高功率激光装置而言,获得更高输出能量和功率的激光束一直是研究人员追求的目标。在激光工作者努力向此目标迈进的同时,光学元器件的发展也面临着巨大的机遇与挑战^[2]。

对于 ICF 激光驱动装置用光学元器件而言,最为关键的挑战可以归结为抗激光损伤能力和面形精度这两个方面^[3]。过去的数十年中,大量的研究工作致力于提升光学元器件的抗激光损伤能力,以及稳定控制光学元器件的面形。围绕我国神光系列激光装置的建设、运行和性能的提升,科研工作者针对不同类型的光学元器件进行了关键技术突破和持久攻关,取得了显著进展。主要成果包括:完成了大口径光学元件检测体系的建设;具备了自主提供金属铪、磷酸盐等重要原材料,以及激光钽玻璃、白玻璃、熔石英和晶体 4 大主材的能力;光学冷加工设备的自主研发与工艺进步,加上薄膜沉积工艺的进步,使得各类元器件的性能得以迅速提升;成功制备了连熔钽玻璃、400 mm 口径高掺氘 DKDP 晶体,解决了大口径连续位相板(CPP)以及大口径偏振片等元器件的材料问题;突破了绝大部分光学元器件全流程工艺定型所需的关键技术与工艺,全面完成了试验流程线的建设。

本文综述了我国在 ICF 的原材料、四大主材、光学元器件以及检测平台建设等方面的研究进展。

2 原材料

高纯金属铪和磷酸二氢钾材料分别是制备高功率激光介质膜和高性能 KDP/DKDP 晶体的重要原材料。其生产料技术的突破可为介质膜和晶体的制备提供强有力的保障。

2.1 高纯金属铪

在高纯金属铪方面,我国建立了一条包括电子束熔炼设备、铪铪分离装置、真空还原装置、碘化提纯装置、电解提纯装置、超声波清洗仪和高压釜在内的高纯金属铪生产流程线^[4]。在金属铪提纯流程中,碘化是一个非常重要的环节,目前我国已经完成碘化提纯的控制系统、真空系统、碘化反应罐等设备的制造,成功开发了碘化母丝 K 值自动控制的软硬件,实现了母丝的相对恒温,这是碘化设备的一项创新。

迄今为止,我国已攻克 4N(99.99%)高纯铪制备的技术难题,具备年产百公斤级高纯铪的生产能力。金属铪材料的主要技术指标已经满足高阈值激光薄膜对高纯金属铪的需求,可彻底取代进口材料。

2.2 高纯度磷酸二氢钾

在高纯度磷酸二氢钾原料方面,我国建立了 ICP-MS 痕量元素检测技术,通过建设流程线规范、改进全流程杂质元素控制的提纯工艺,以及强化环境控制,实现了金属杂质离子含量低于 0.1×10^{-6} 的高纯度磷酸二氢钾的生产^[5]。目前,高纯度磷酸二氢钾的生产能力高达百公斤级,其相关设备具有长周期稳定运行的能力,并且全套工艺流程和工艺文件已经固化。

3 四大主材

3.1 钽玻璃

磷酸盐激光钽玻璃在我国神光系列装置中承

担着激光产生和能量放大的重要作用。相比于一般的光学玻璃,应用于大型高功率激光装置的钹玻璃具有极其特殊的性能。钹玻璃的制备工艺包括配料、熔制、成型、粗退火、光学和光谱性能检测、精密退火、应力检测、包边和精密抛光加工等诸多环节。钹玻璃必须同时满足光学均匀性、气泡、荧光寿命、光吸收损耗、铂金颗粒、应力均匀性和包边等一系列指标要求。在过去的几十年中,随着 ICF 激光驱动装置输出功率的不断提高,对钹玻璃的质量和数量的要求也不断提高。钹玻璃的制备工艺技术取得了突飞猛进的发展,从单坩埚熔炼、半连续熔炼发展到了连续熔炼^[6]。

钹玻璃连熔技术被誉为支撑美国 NIF 装置建设的七大奇迹之一。基于钹玻璃半连熔工艺和连熔实验线工艺的研究积累,我国建设了 400 mm 口径 N31 钹玻璃连熔线,实现了 N31 钹玻璃连熔技术的全面突破。通过改进池炉材料和优化熔制工艺参数,钹玻璃在 1 053 nm 的吸收系数由 0.15% 逐步下降,并稳定达到 0.13%。钹玻璃连熔除水工艺的稳定性得到了进一步提高,荧光寿命可以达到 310 μs ,部分可以达到 315 μs 。通过改进池炉结构和除铂金工艺,N31 连熔钹玻璃中的包裹物得到有效控制,并通过了 ITB 装置的高通量在线考核。通过精密退火工艺实验和玻璃装夹方式的改进,钹玻璃在通光口径范围的应力平均值降至 5 nm/cm 以内。目前,我国研制的 N31 钹玻璃的各项技术指标已达到当前 ICF 激光驱动装置的要求,并已实现工艺定型。

同时,我国完成了 N31 钹玻璃包边机械化装置的建设和包边机械化工艺的验证。包边机械化保证了批量化生产的一致性和稳定性,提高了包边性能的稳定性和包边效率,规避了手工操作带来的性能不稳定等难以完全满足工程要求的问题。钹玻璃包边综合测试平台对机械化包边产品耐氙灯辐照考核的结果表明:包边后的钹玻璃元件在经过 2 000 发次(发次间隔为 5 min)的辐照后,未出现喷胶、脱胶、炸裂等现象^[7]。

此外,还建立了一套专用于 N41 新型钹玻璃工艺研究的半连续熔炼设备,并利用该设备开展了 N41 钹玻璃半连熔工艺研究,研制出 400 mm 口径的 N41 钹玻璃。目前,除 400 nm 处吸收系数和荧光寿命等个别指标外,N41 钹玻璃的其他性能均能满足当前 ICF 激光驱动装置的指标要求。

3.2 高纯度磷酸二氢钾

K9 玻璃是基频类薄膜元器件的基底材料,稳定、可控的玻璃材料是获得高质量薄膜元器件的基础。近年来,研究人员通过“恒温均热腔”改善玻璃体的温度分布,有效控制了玻璃垂直方向上的温度梯度,改善了玻璃内部温度分布的均匀性和对称性,并在一定程度上降低了玻璃的边角应力;通过优化成型和退火工艺,降低了玻璃材料的应力双折射,400 mm 口径 K9 玻璃坯片的应力双折射小于 5 nm/cm。目前,400 mm 口径 K9 玻璃坯片的工艺路线已经定型。

3.3 熔石英

光学均匀性和抗激光损伤性能是熔石英玻璃的两大关键技术指标。为了提升熔石英玻璃的光学均匀性,研究人员针对燃烧器的材质、燃烧能力、火焰状态、火焰焦距和火焰温度进行了数值模拟和系统的研究实验;通过改进槽沉处理过程中的发热体结构与排布、优化成型模具来提升炉内温度,使玻璃砣各点的羟基分布均匀化,进而提升熔石英玻璃的光学均匀性。目前,基于沉积、槽沉、退火的主工艺技术路线已经定型。430 mm \times 430 mm 口径熔石英的光学均匀性突破 2×10^{-6} (P-V),在 400 mm \times 400 mm 的通光口径内可稳定达到 $(2\sim 4)\times 10^{-6}$ (P-V),体材料的激光损伤阈值优于 18 J/cm² (3 ω , 5 ns)。

3.4 晶体

KDP/DKDP 晶体具有优良的电光性质和非线性光学性质,是 ICF 激光驱动系统中不可替代的非线性光学材料。晶体坯片的生长技术主要包括传统生长技术和快速生长技术,其中 KDP 晶体的快速生长技术被誉为美国 NIF 装置建设的七大奇迹之一。

3.4.1 KDP 晶体生长技术

2013 年,朱胜军等采用传统生长技术在国内首次制备了尺寸达 410 mm \times 410 mm 的 KDP 晶体坯片。目前,KDP 晶体传统生长技术已经定型^[8]。为了降低成本、缩短生长周期,通过改变 KDP 晶体的生长条件和利用添加剂生长大尺寸高光学质量的 KDP 晶体的“快速生长”法成为研究重点。研究人员从晶体生长设备、原料、工艺等诸多环节开展实验工作,完成了籽晶定向和整形、注种、溶液过热、溶液过冷、二级微孔过滤、生长温度控制等各道工序试验,提高了溶液的稳定性。

基于温度场和浓度场分析,通过改进载晶架和转动系统、增加内搅拌装置和温度自动控制,克服了快速生长中存在的 10 cm 快长瓶颈,实现了点籽晶快速生长的技术突破,生长成功率可达 30%。目前,利用该技术已成功生长出多块口径在 500~650 mm 的 KDP 单晶,提供了 330~430 mm 口径的 I 类器件,且快速生长晶体的质量与常规生长晶体的质量基本相当。

3.4.2 DKDP 晶体生长技术

在大尺寸 KDP 晶体传统生长技术的基础上,我国探索了在亚稳相、高温区生长大尺寸、高质量 DKDP 晶体的工艺条件,解决了在高温区、大容量培养缸中生长 DKDP 晶体工艺稳定性的问题,排除了单斜相对四方相晶体的干扰,提高了 DKDP 晶体的成功率。2012 年 7 月,生长得到了当时国内最大的一块 510 mm × 390 mm × 520 mm DKDP 大单晶,切割出国内首片 70% 氙化率 430 mm II 类 DKDP 坯片。2015 年,研究人员取得了一块晶体坯片加工出 10 片 74% 氙化率的 430 mm II 类 DKDP 的重大进展。在 ITB 装置上共考核 50 余发次,其中三倍频光的最大能量输出为 8.0 kJ(5 ns),最大平均通量达到 6.7 J/cm²(5 ns)^[9]。

同时,科研人员根据 DKDP 晶体的生长特点,改进了现有的快长 KDP 生长槽,优化了转动和降温参数,并于 2014 年底探索出适合 DKDP 晶体快速生长的工艺和设备。2015 年 5 月,我国首次制备出大尺寸 90% 氙化率的开关 DKDP 晶体,证明了快长技术用于研制 430 mm DKDP 开关晶体坯件的可行性。

3.4.3 提升晶体抗激光损伤性能的后处理技术

为了提升晶体的抗激光损伤性能,研究了热退火和激光预处理工艺。研究表明:热退火可以有效地提高晶体的损伤阈值,并且对晶体透射率、e 光折射率的非均匀性没有大的影响。在相同的退火温度下,晶体后期生长的部分具有较高的损伤阈值。

在激光预处理方面,我国完成了 I 类 KDP 晶体和 II 类 70% DKDP 晶体激光预处理的工艺优化方案,以及 sol-gel 涂膜后的 DKDP 晶体激光预处理技术方案。针对损伤阈值目标,初步理清了各工序制约晶体抗激光损伤性能的关键因素,明确了晶体生长、加工与激光预处理优化的工序

关系。然后研究了新型高效激光预处理技术, I 类快长 KDP 晶体经处理后的损伤阈值能够达到当前 ICF 激光驱动装置的指标要求,并且建立了亚纳秒激光预处理技术的原理性实验验证平台。离线测试结果表明:经处理的 II 类 DKDP 晶体初步具有负载 8 J/cm² 通量的能力。

4 元器件

4.1 光学冷加工

4.1.1 钹玻璃加工

针对钹玻璃元件的波面质量要求,项目组开展了钹玻璃加工面形确定性控制技术的研究。针对 4.4 m 环抛机的分系统进行了重点研究,包括:校正板自动加压卸荷系统、蜡板自动开槽刮盘系统、校正板和工件环速度分别驱动与联动系统、加工工艺参数实时监控系統、多工位加工系统及上下盘系统、多种工件环交互协作联调系统以及环境温湿度监控系统。

通过热集聚效应研究提升钹玻璃的面形控制精度,研究表明工件加工过程的热集聚效应会严重影响面形收敛规律。因此,需要通过热扩散实验快速传播产生的热量;通过热屏蔽实验阻断热传导,以保持钹玻璃元件内部均匀的温度梯度,从而大幅提升钹玻璃加工全频谱面形指标的合格率。

加工中采取交叉修复的工艺技术路线,即:基于蜡盘面形检测技术,实时掌握每台环抛机蜡盘形状的变化情况,通过批次内工件的交叉,充分利用每台环抛机的“保形”区间,达到交叉修复的目的。同时,引入新的修形手段,形成一套蜡盘面形诊断方法,大幅提高单面面形的控制精度,进而提升 N31 钹玻璃的加工效率和产能^[7]。

4.1.2 白玻璃加工

针对 K9 玻璃的应力稳定性问题,提出基于热循环模拟的应力稳定性控制技术。对基片热模拟后的稳定时间,以及粗抛、精抛和热循环等工序对 K9 玻璃面形的影响进行了研究,以指导基片加工工序的热循环工艺参数。针对全频谱的波面质量要求,将主动匹配式环形抛光技术、光顺束匀滑技术,以及分步匀滑式数控抛光技术相结合,大幅提高了元件抛光过程中的确定性、均匀性及稳定性,有效抑制并在很大程度上消除了小尺度加

工波纹的产生,突破了大口径平面反射类元件小工具数控抛光中频误差控制的技术瓶颈,实现了低频面形 PV、波前梯度 GRMS 及中频 PSD、高频 RMS 指标的同时收敛加工。

在诸多使用白玻璃作为基板的元件中,大口径偏振片基板具有尺寸大、超长宽比、重量接近校正盘等特点。项目组利用在古典光学加工方面的经验,采用磁流变、小磨头等先进加工技术,结合保形光顺技术,实现了偏振片基板全频段面形的高精度控制,特别是在中频功率谱密度(PSD)和均方根误差(RMS)等关键指标的控制方面实现了较大的工艺创新和技术突破。

4.1.3 熔石英加工

针对平面熔石英元件开展了中频控制技术的研究工作。通过优化抛光与数控工艺,突破中频波纹抑制技术,使透射窗口元件满足 ICF 激光驱动装置的指标要求。

自主研发了高精度磨削机床,建立了大口径高精度非球面磨削计算机辅助制造系统。采用超精密机床固着磨粒的磨削手段,直接用磨削的方法获得了面形精度在 $5\ \mu\text{m}$ 以内的非球面,实现了非球面的高效高精度直接成形,大大减少了后序抛光的加工余量。优化非球面磨削纹理,使元件的加工时间缩短近 20 h。邵平等针对楔形透镜的中频误差问题,开展了楔形透镜中频误差抑制方法的研究,显著提升了楔形透镜的中频误差指标^[10]。

4.1.4 晶体加工

针对 KDP 晶体加工的全频段指标,对全流程技术指标进行了分解,围绕低、中、高频段的加工误差,明确了刀具、机床、环境等多方面的影响因素。在逐步明确了元件加工指标要求和检测方法的基础上,使用基准面抛光的方法提高了晶体的波面质量。然后基于透射波前测量结果,对元件加工过程中的不同误差进行溯源分析,通过控制机床和环境热源的影响、气源和液压的波动,机床动态性能的分析 and 改善,实现了透射波前 GRMS 和 PSD1 指标的控制。刀具参数的改变提高了 PSD2 和粗糙度加工水平,并在此基础上确定了 KDP 晶体加工的主要工艺路线。

4.2 镀膜

我国神光系列装置中使用的光学薄膜元件主要包括反射元件、透射元件、偏振分光元件和波长

分离元件 4 类。除了三倍频的增透元件和晶体元件采用 Sol-Gel 膜之外,神光系列装置使用的绝大部分光学薄膜元件都采用电子束沉积技术制备而成,包括基频增透薄膜元件。

4.2.1 介质膜

神光系列装置对光学薄膜元件的性能要求有三个方面的:高的反射率或透射率,以降低传输损耗;高的抗激光损伤能力,以最小化光束尺寸;低的膜层应力和良好的均匀性,以最小化波前畸变。针对这些要求,项目组重点开展了以下几个方面的工作:

(1)良好的膜系设计和高精度的膜厚控制是获得理想光谱性能的关键。在膜系设计方面,针对光谱性能要求,结合膜层应力和抗激光损伤性能的要求,对高性能高损伤阈值介质激光薄膜开展了综合设计。在膜厚控制技术方面,提出了一种光控-晶控综合膜厚监控方法和一种基于多个控制片的高精度膜厚监控方法,实现了膜层厚度的精确控制,能够获得与理论设计接近的光谱性能^[11]。

(2)各种类型的缺陷是薄膜激光损伤的主要诱因,研究人员以系统工程的思路出发,从镀膜前、镀膜中和镀膜后对产生薄膜缺陷的关键技术进行了分解,通过对基片清洗、材料喷溅抑制、沉积参数和后处理技术等方面的技术攻关以及工艺集成,实现了低缺陷薄膜的制备。此外,研究了薄膜元件的激光预处理技术,通过逐步抬升辐照节瘤缺陷的能量,对节瘤缺陷实现一个“不可见”的稳定过程,进而提升薄膜元件的功能性损伤阈值^[12]。

基底应力稳定是薄膜元件应力稳定的前提条件。针对这一问题,提出了一种基于热循环处理的基底面形稳定性检验方法。此外,结合薄膜应力匹配和应力补偿技术,实现介质膜元件的面形稳定控制,并攻克了大口径偏振膜膜层龟裂的重大技术问题,实现了国内大口径偏振片从无到有的突破。研制的偏振膜元件在 2012 年和 2013 年的全球性激光损伤阈值竞赛中均获得 p 分量和平均损伤阈值最佳的成绩^[13]。

4.2.2 化学膜

KDP/DKDP 晶体元件化学涂膜突破了批量溶胶制备工艺稳定性、折射率调控技术,实现了晶体化学膜光谱性能的优化和膜层损伤阈值的有效提升。基于溶胶复合配方、固化处理工艺抑制膜

间渗透,实现了旋涂工艺的突破,以及 DKDP 晶体化学膜“三波长”透过率的最大化^[14]。研制的三倍频减反膜在 2010 年全球性激光损伤阈值竞赛中取得最佳结果。

5 氙 灯

我国的神光系列装置采用大量脉冲氙灯作为激光泵浦源。一支高功率脉冲氙灯需要在几纳秒内输入超过一万焦耳的能量,并高效辐射出足够的能源以使钼玻璃放大器的增益系数足够大。大型高功率激光系统往往需要大量的高功率脉冲氙灯,任何一支脉冲氙灯的失效都会直接影响到整个高功率激光装置的工作性能。

针对脉冲氙灯的性能和可靠性要求,项目组重点开展了高温金属封接技术的相关工艺研究,通过引进“二次金属化”工艺、优化金属化工艺参数、改进金属化膜层与焊料的润湿性能,以及优化钎焊结构等手段,实现了石英玻璃基体与金属化膜层的结合力和应力控制,解决了封接区的漏气问题,提高了金属封接组合体的机械强度和气密性,并经过多批次的考核和工艺优化来实现工艺定型。

最后,针对脉冲氙灯的制灯关键工序(氙灯熔封成型、激光焊接、耐高压灯头制备等)开展机械化研究,建成了一条机械化的脉冲氙灯批量制造流程线。

6 检 测

针对大口径光学元件工序检及终检的检测需求,采用的多项关键检测技术如下:

(1)基于光学轮廓仪实现了大视场、高精度、

高稳定性的平面类元件中频波前误差(PSD2)的检测^[15]。大口径高平行度光学元件透/反射波前检测实现技术突破,避免了大口径高平行度光学元件自干涉条纹对检测结果的影响,解决了大口径平面元件带角度检测时受限于检测平台尺寸及干涉条纹对比度的技术难题。建立了米级元件加工和镀膜面形拼接检测方法,实现了米级元件加工和镀膜全口径的面形检测。

(2)研制了 BSG 综合诊断平台,长焦距透镜焦距检测、光学元件表面疵病定量检测、晶体光吸收系数检测系统,连续位相板分辨率波前、钼玻璃包边剩余反射率以及氙灯可靠性考核平台等工程性样机。

(3)初步构建了 ICF 激光驱动装置用光学元器件参数检测的全覆盖体系,形成了 37 项检测标准(国军标 GJB 中物标/ZWB 惯约标/GYB),涵盖四大主材(钼玻璃、UBK7/K9、晶体和熔石英)、五大类光学元件(钼玻璃片、介质膜元件、熔石英元件、晶体元件和位相元件)的五大特性(几何参量、波面质量、光谱特性、损伤特性和表面质量)以及氙灯主要特性的全流程参数。

7 总 结

经过数十年的努力,我国已经初步完成了大口径光学元件工序检及终检全流程检测体系和检测设备的建设,具备了自主提供金属钎、磷酸盐等重要原材料,以及激光钼玻璃、K9 玻璃、熔石英和晶体四大主材的能力。ICF 激光驱动装置用的绝大部分光学元器件全流程工艺定型所需的关键技术实现了突破,其研发和生产能力得到了显著提升,能够实现小批量生产。这些成果为我国未来 ICF 激光驱动装置的建设打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] CAMPBELL J H, HAWLEY-FEDDER R A, STOLZ C J, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[C]. *Lasers and Applications in Science and Engineering, International Society for Optics and Photonics*, 2004: 84-101.
- [2] STOLZ C J, RUNKEL M J, MCBURNEY M S, *et al.*. Metrology of mirrors for the National Ignition Facility[C]. *Lasers and Applications in Science and*

Engineering, International Society for Optics and Photonics, 2004: 114-120.

- [3] STOLZ C J, ADAMS J, SHIRK M D, *et al.*. Engineering meter-scale laser resistant coatings for the near IR[C]. *Optical Systems Design 2005, International Society for Optics and Photonics*, 2005: 59630Y-59630Y-9.
- [4] 田丽森,尹延西,胡志方,等.高纯金属钎制备技术研究进展[J].*矿冶*,2014,39(2):49-54,58.
- TIAN L S, YI Y X, HU ZH F, *et al.*. Research

- progress of high purity metal hafnium preparation [J]. *Mining & Metallurgy*, 2014, 39(2): 49-54, 58. (in Chinese)
- [5] 刘征宙, 曹丽丽, 陈浩云, 等. 电感耦合等离子体质谱法-碰撞反应池技术测定高纯度磷酸二氢钾中痕量金属元素[J]. *化学试剂*, 2015, 37(9): 809-811.
LIU ZH ZH, CAO L L, CHEN H Y, *et al.*. Detection of trace metal elements in potassium dihydrophate with ICP-MS(CCT) method[J]. *Huaxue Shiji*, 2015, 37(9):809-811. (in Chinese)
- [6] 唐景平, 胡丽丽, 陈树彬, 等. 大尺寸连熔 N31 型掺钕磷酸盐激光玻璃的性能研究[J]. *中国激光*, 2015 (2): 184-190.
TANG J P, HU L L, CHEN SH B, *et al.*. Properties of large size N31 Nd : Phosphate laser glass prepared by continuous melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015 (2): 184-190. (in Chinese)
- [7] 胡俊江, 孟涛, 温磊, 等. 激光钕玻璃包边残余应力实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2):172-178.
HU J J, MEN T, WEN L, *et al.*. Experiment investigation on residual stress of Nd : Glass edge cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (2):172-178. (in Chinese)
- [8] 朱胜军, 王圣来, 刘光霞, 等. KDP 晶体快速生长溶液的稳定性研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42 (3): 388-391.
ZHU SH J, WANG SH L, LIU G X, *et al.*. Study on the solution stability of KDP crystal at fast crystal growth rate[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(3): 388-391. (in Chinese)
- [9] 孙绍涛, 季来林, 王正平, 等. 不同方法 DKDP 晶体生长和损伤阈值[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22 (2): 331-334.
SUN SH T, JI L L, WANG ZH P, *et al.*. Growth and laser damage threshold of DKDP crystal grown by different methods[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 331-334. (in Chinese)
- [10] 邵平, 夏兰, 居玲洁, 等. 楔形透镜的检测及校正方法:中国, CN103630073A [P]. 2014.
SHAO P, XIA L, JU L J, *et al.*. Detection and correction method of the wedge lens: CN103630073A [P]. 2014. (in Chinese)
- [11] SHAO J, YI K, ZHU M. Thin-film polarizer for high power laser system in China[C]. *Pacific Rim Laser Damage 2016: Optical Materials for High Power Lasers, International Society for Optics and Photonics*, 2016: 998308-998308-5.
- [12] 刘晓凤. 小光斑扫描激光预处理系统集成控制与工艺优化[M]. 上海:上海光学精密机械研究所, 2011.
LIU X F. *Integration Control of the Small-beam Conditioning System and Process Raster-scan Laser Optimization*[M]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, 2011. (in Chinese)
- [13] GRUZDEV V E. Summary of meeting: SPIE laser damage 44th annual symposium on optical materials for high power laser 23-26 September 2012[C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8530.
- [14] 陈宁, 张清华, 王世健. KDP 晶体 Sol-Gel 膜技术 [C]. *中国工程物理研究院科技年报*, 2005:415-415.
CHEN N, ZHANG Q H, WANG SH J. KDP crystal Sol-Gel coating technology[C]. *China Academy of Engineering Physics Scientific Annals*, 2005:415-415. (in Chinese)
- [15] 钟波, 陈贤华, 王健, 等. 400 mm 口径平面窗口元件中频误差控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3287-3291.
ZHONG B, CHEN X H, WANG J, *et al.*. Controlling mid-spatial frequency error on 400 mm aperture window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3287-3291. (in Chinese)

作者简介:



邵建达(1964—),男,浙江宁海人,研究员,博士生导师,主要从事 ICF 激光驱动器用光学元器件的相关研究工作。
E-mail: jdshao@siom.ac.cn