

新型掺钕磷酸盐激光玻璃的耐抽运热破坏性质

李韦韦^{1,2} 李顺光¹ 陈辉宇¹ 何冬兵¹ 陈伟¹ 胡丽丽¹ 韦辉³ 范薇³

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元研发中心, 上海 201800
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 研究了新型掺钕磷酸盐激光玻璃在高能量闪光灯抽运条件下的热破坏性质。激光输出实验表明这种为重复频率激光工作设计的钕玻璃, 具有与高峰值功率应用类型的钕玻璃基本相近的激光输出能力, 高于早期设计的高能量应用类型的钕玻璃。分析了新型重频工作钕玻璃的热膨胀性质, 比较了酸蚀和离子交换前后激光输出性质, 测定了重复频率高能量抽运下的极限抽运阈值, 并讨论了它们对于耐抽运破坏极限的影响。

关键词 材料; 磷酸盐; 钕玻璃; 激光; 重复频率; 耐抽运阈值

中图分类号 TN244 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0906003

Pumping Thermal Damage Resistance Properties of a New Nd-Doped Phosphate Laser Glass

Li Weiwei^{1,2} Li Shunguang¹ Chen Huiyu¹ He Dongbing¹ Chen Wei¹
Hu Lili¹ Wei Hui³ Fan Wei³

¹ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The pumping damage resistance and thermal properties of the new Nd-doped phosphate laser glass are investigated under high energy flash lamp pumping. The laser output results show that the laser output ability of the new Nd glass specially designed for repetition-rate application is similar to that of the high-peak-power application type Nd glass, and higher than that of the early designed high-energy application type Nd glass. The thermal expansion property of the new Nd glasses is analyzed, as well as their laser output properties before and after acid-etching and ion exchanging. Especially, the pumping thresholds of the new Nd glass are measured under high energy and repetition rate conditions. The impact and correlation among the lasing, pumping, surface strengthening, and thermal properties are analyzed and discussed.

Key words materials; phosphate; Nd glass; laser; repetition rate; pumping threshold

OCIS codes 160.2750; 160.5690; 160.3380; 140.3530

1 引言

重复频率工作条件下的高能量激光输出, 是军

用和民用领域中很多工业应用所迫切需求的。由于激光晶体较高的热导率, 重复频率激光器件通常采

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家钕玻璃专项(1329031A00)

作者简介: 李韦韦(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事激光玻璃材料与性能关系等方面的研究。

E-mail: linbwn@163.com

导师简介: 陈伟(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光玻璃材料、光谱、缺陷、激光性质及其相互作用等方面的研究。E-mail: weichen@sion.ac.cn(通信联系人)

用晶体材料。但能量输出与激活体积是密切相关的,这是激光玻璃的一个优势,也是进入重复频率激光器件的基础条件之一。

目前正在产业化的激光冲击强化技术^[1-2],采用强激光诱导冲击波力学效应进行材料表面的强化处理,能够显著提高金属材料的屈服强度,应用领域如航空发动机和航空关键结构件、核工业、汽车和船舶制造业、石油化工等。目前仅美国将此技术应用于军用飞机和民用飞机生产线,如 F119 大推力航空发动机,但此类激光器属于禁运的先进技术和产品^[1]。

磷酸盐玻璃基质是可以作为重复频率工作介质的,已有过成功先例^[3],除了玻璃性质的改进以外,还包括掺杂离子浓度的优化。实际上首次激光强化研究用激光器也是钕玻璃激光器^[4],四级放大输出 180 J,调 Q 脉冲宽带 30 ns。磷酸盐玻璃基质工作于重复频率下,可以采用板条结构,能够部分解决玻璃基质的散热问题^[5]。但这主要取决于材料性质的改进和强化,关键在于工作状态下的激光玻璃热性质^[6],不仅关系到激光输出的效率和输出的能量,更关系到玻璃介质的工作安全性和可靠性。其中,重复频率下的耐抽运极限性质,在一定程度上代表了该工作物质在此频率下的最高可能重频输出能力。

美国 LLNL 国家实验室和 LSP 公司研制的磷酸盐钕玻璃生产型激光器,在 1.25 Hz 重复频率下工作可以输出 50 J 的激光能量^[1-2]。在国内,如果采用之前开发的高峰值功率应用类型的钕玻璃,激光工作频率在 0.5 Hz 水平^[2]。因此需要发展工作于重复频率条件下的专用型激光钕玻璃。

本文系统研究了新型掺钕磷酸盐激光玻璃在重复频率工作条件下承受闪光灯高能量抽运的各种性质。该类型钕玻璃不同于高功率应用和高能量应用类型的钕玻璃,其特点在于具有与高功率类型钕玻璃相接近的激光输出能力,同时又具有与高能量类型钕玻璃相接近的化学性质。因此可以采用离子交换表面增强等措施,使其不仅能够工作于重复频率条件,而且能够承受更高的抽运极限,使得单脉冲激光输出能力在重频条件下满足激光冲击强化的要求。

2 实 验

新型掺钕磷酸盐激光钕玻璃的主要成分为^[7]: P_2O_5 (质量分数为 55%~65%), Al_2O_3 (质量分数为 6%~18%), Li_2O (质量分数为 10%~18%), MgO (质量分数为 8%~10%), BaO (质量分数为 0~5%), B_2O_3 (质量分数为 2%~3%), $La_2O_3 +$

$Y_2O_3 + Nb_2O_5 + Sb_2O_3$ (质量分数为 1%~4%), SiO_2 (质量分数为 0~10%), Nd_2O_3 (质量分数为 0.5%~4.0%)。为了判断激光输出能力,在玻璃制备过程中采用同样高纯度的 Nd_2O_3 原料和除铂、除水和除条纹工艺技术制备该新型钕玻璃,以控制其他稀土、羟基等杂质和光学均匀性对激光输出的影响。在实验中用于对比的高峰值功率应用和高能量应用的钕玻璃,工艺制备过程基本相同,成型工艺参数根据各自的特征温度有所调整。

酸蚀实验需要先将玻璃样品置入异丙醇和乙醇溶液中清洗,去除砂磨表面残留的有机物杂质,再用去离子水超声洗浴,去除残余的异丙醇。酸蚀液为 Cl_3COOH 、 Cl_3COOK 缓冲体系和 HF 、 NH_4F 缓冲体系共同组成,温度控制在 90 °C~100 °C,然后同样温度下用去离子水清洗并干燥。

离子交换采用一价碱金属和二价碱土金属的硝酸盐混合熔盐。将玻璃样品预热到离子交换的设定温度(380 °C~430 °C),然后置于熔盐中的铂金支架上进行离子交换处理。熔盐中的 K^+ 离子将与玻璃中的 Li^+ 离子进行 10~18 h 的交换。完成后将玻璃样品取出,冷却到室温。先采用去离子水清洗,再迅速用质量分数为 5% 的 HF 稀酸短时间漂洗并烘干。

激光输出实验采用单灯抽运的平平腔结构,抽运脉冲宽度为 300 μs ,充电电容和为 400 μF ,最高充电电压为 1 kV,最大单脉冲抽运能量为 200 J。所采用的样品尺寸均加工为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。

抽运能量极限测试采用双灯抽运,两路充放电模式完全相同。抽运脉冲宽度为 500 μs ,单路充电电容为 600 μF ,最高充电电压为 1.75 kV。两路最大单脉冲抽运能量为 1800 J,最大重复频率可调整到 10 Hz。所采用的样品尺寸均为 $\Phi 16 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$ 。

玻璃的显微观测采用 DMRXE 偏光显微镜,放大倍率为 200。玻璃的热膨胀测试采用 Dilatometer 402PC 型膨胀仪,测试精度为 8 nm。玻璃中 K^+ 离子深度分布测试采用 JXA-8100 电子探针仪,波谱能量分辨率为 10 eV。

3 实验结果和讨论

图 1 比较了三种掺钕磷酸盐激光玻璃,在同样的掺钕离子浓度、样品尺寸、抽运和测试条件下的激光输出能力,且激光玻璃棒经过 W14 细磨后,没有经过任何化学处理。这三种钕玻璃是为了不同的应用目标而设计的,分别为早期高能量应用类型、高功率应用类型和新型重复频率应用类型的钕玻

璃。新开发的重复频率应用掺钕磷酸盐激光玻璃的输出能力,明显高于早期高能量应用类型的钕玻璃,但低于高峰值功率应用类型的钕玻璃。在外推阈值方面,也是高峰值功率应用的钕玻璃激光阈值最低,为 40 J 左右。早期的高能量应用类型钕玻璃的阈值为 50 J 左右。而新型重频应用钕玻璃的激光阈值处于上述两种钕玻璃之间,约为 48 J。

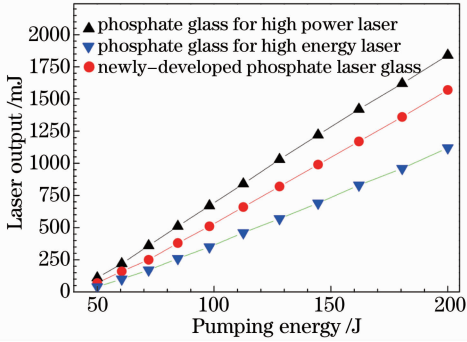


图 1 不同设计应用目标的三种掺钕磷酸盐激光玻璃的激光输入-输出曲线(其中的 Nd_2O_3 掺杂浓度是相同的)

Fig. 1 Laser input-output curves of three Nd-doped phosphate laser glasses for different applications (same doping content of Nd_2O_3 for the three laser glasses)

开发新型重复频率工作用掺钕磷酸盐激光玻璃,目的是为了在重频条件下仍然能够获得较高能量的激光输出。因此在成分调整上不能参照原有高能量应用类型的磷酸盐玻璃基质。图 1 对激光输出能力的比较表明,新型重复频率工作用钕玻璃^[7]在成分上是不同于高能量应用钕玻璃的^[8-10],而且它的激光输出能力基本接近于高峰值功率应用钕玻璃。这一点与受激发射截面的变化是基本相符的,新型重复频率应用钕玻璃的受激发射截面约为 $3.0 \times 10^{-20} \sim 3.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ^[7],高峰值功率应用型钕玻璃的受激发射截面约为 $3.8 \times 10^{-20} \sim 3.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ^[8-9],即新型重复频率工作用钕玻璃在激光工作波长上的受激发射截面下降了 10%~20%左右,与已有其他钕玻璃^[8-10]相比较,确切值与具体的成分^[7]调整有关。这就意味着,新型重复频率应用钕玻璃在单次工作条件下,具有与高峰值功率应用钕玻璃基本相近的激光能量输出性质。在重复频率工作条件下,高峰值功率钕玻璃略好的能量输出性质,由于热破坏问题,是得不到发挥的。

图 2 测试了三种不同设计应用目标的掺钕磷酸盐激光玻璃的重复频率工作极限,比较了早期高能量应用类型(a)、高峰值功率应用类型(b)和新型重

复频率应用类型(c)的钕玻璃激光棒在化学增强处理前后的耐抽运效果。图 2 中(a)、(b)箭头所示前点表示酸蚀前的,后点表示酸蚀后的;(c)箭头所示前点表示酸蚀和离子交换前的,后点表示酸蚀和离子交换后的。

一般而言,对于 1 Hz 量级的重频工作,经过几分钟后激光棒可以达到热平衡。即如果经过 5 min 左右激光棒能够维持稳定的焦耳量级激光工作,同时包括棒套内的两端均没有任何破坏,则认为激光棒可以在此频率下稳定工作。图 2 的测试结果表明,早期高能量和高峰值功率应用型的钕玻璃,当抽运重复频率被调高到 3~4 Hz,仅仅几十秒激光棒已经不能承受重频抽运;而新型重频应用型可以将钕玻璃的工作重复频率提高 50%左右,到 6 Hz 时不能承受重频抽运。这一测试结果说明,对于新型重频应用钕玻璃的成分调整,在热性质方面确实体现出在重频工作方面的优势。这一优势还应该体现在同等条件下能够承受和吸收转化更多的抽运能量方面。

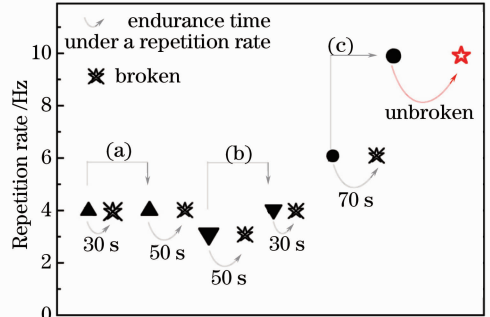


图 2 不同设计应用目标的三种掺钕磷酸盐激光玻璃的重复频率工作极限(其中的 Nd_2O_3 掺杂浓度是相同的)

Fig. 2 Repetition rate pumping thresholds of three Nd-doped phosphate laser glasses for different applications (same doping content of Nd_2O_3 for the three laser glasses)

图 3 比较了新型重复频率和高峰值功率两种应用类型的掺钕磷酸盐激光玻璃的抽运极限,包括它们与掺钕离子浓度的关系。目前已经工业化的激光冲击用器件工作于 1.25 Hz 重频下^[1-2],因此在耐抽运破坏极限测试中的重复频率被设定在 2 Hz,循环水冷。考虑到能量输出与模体积有关,将图 1 所用 $\Phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的激光棒扩展到 $\Phi 16 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$,单棒应该可以支撑 20 J 以上的输出。图 3 清楚地表明,新型重复频率应用的钕玻璃,在各个掺钕浓度下的耐抽运破坏阈值,均为高峰值功率应用钕玻璃的 1.7 倍,高出约 70%。因此,在重复频率工作条件下,由于受激辐射截面下降 10%~20%的

激光输出能力,被提高了70%左右的输入能力基本弥补,完全有可能超出高峰值功率应用的钕玻璃。

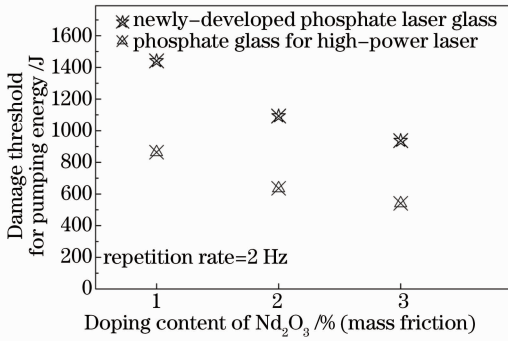


图3 新型重复频率和高峰值功率两种应用类型的掺钕磷酸盐激光玻璃抽运极限与掺钕离子浓度的关系

Fig. 3 Variation of pumping threshold energy versus the doping content of Nd₂O₃ for the Nd-doped phosphate laser glass for repetition-rate application and high-peak-power application

上述耐重复频率工作极限和耐抽运破坏极限的测试,除了图2中经过化学增强处理的三个玻璃棒样,均是针对通常W14细磨的激光玻璃棒表面,没有经过任何化学处理。高峰值功率应用类型的钕玻璃,存在表面难以增强处理的问题。其在成分方面并不是没有表面增强处理的可能,但离子交换表面增强^[11-12]不仅要求能够实现半径不同的离子之间的交换,而且需要有较强的耐侵蚀能力,尽管其环境稳定性能够满足实际工作的要求。因此难以适应较高重频条件下的激光运行。而新型重频应用的钕

玻璃,成分调整是建立在能够满足在较大范围内实现表面化学处理的基础上。因此,可以在处理方式和方法方面采用经过优化的增强措施。

图4为新型重复频率掺钕磷酸盐激光玻璃经过酸蚀前后的表面显微照片。图4(a)显示出经过W14金刚砂细磨后,在玻璃表面导致的粗糙度及凹陷层的平均深度等情况相对是比较严重的,所存在的裂纹也相对较多。尽管这种漫反射表面对于均匀抽运有一定作用,但首先引发激光棒开裂的可能也相对较大。如果采用较强的酸溶液进行表面处理,能够很快将激光棒百微米表层完全去除,但是会在新形成的表面造成较多的缺陷腐蚀坑,并进而造成新的表面微裂纹缺陷。不均匀侵蚀造成的不均匀表面缺陷将严重影响到玻璃的抗折强度^[13-14]。对于磷酸盐玻璃,少量HF在缓冲液体系中能够基本保持H⁺和F⁻浓度不变,在整个酸蚀过程中能够进行作用面均匀和反应率稳定的表面侵蚀,最终形成如图4(b)所示的基本平滑的表面,光洁度有大幅度改善。消除了W14磨料细磨所产生的裂纹,同时又没有产生严重的腐蚀坑。这两方面均使得玻璃的抗折强度有较大提高,但处理的效果主要取决于玻璃基质材料。从图2可以看出早期高能量和高峰值功率应用型的钕玻璃,在经过酸蚀后,重复频率抽运极限基本上处于4 Hz水平,较处理前没有发现有较大的改善;而新型重频应用型钕玻璃的工作重复频率至少提高了60%以上,从原来的6 Hz极限上升到在10 Hz重频工作下能够稳定输出焦耳量级激光。

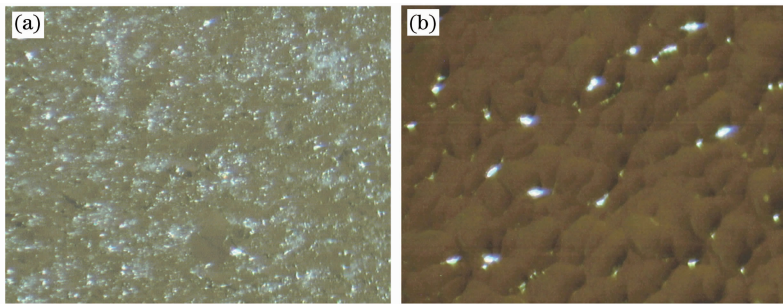


图4 新型重复频率应用掺钕磷酸盐激光玻璃在酸蚀前后的光学显微照片(200倍)。(a)酸蚀前;(b)酸蚀后

Fig. 4 Optical micrographs of the new Nd-doped phosphate laser glass for repetition-rate application before and after the acid-etching process (200 times). (a) Before acid-etching; (b) after acid-etching

为了进一步改善新型重频应用钕玻璃的输出性质,在酸蚀的基础上进行了钾-锂离子之间的表面离子交换增强处理。图5为新型重频应用掺钕磷酸盐激光玻璃在离子交换后钾离子的深度分布。离子交换属于有限源的不稳定扩散^[15],随着交换时间增加,交换深度逐渐加深,钾离子层的厚度将不断积累

起来。由于钾离子扩散系数不是很大,图5显示出钾离子进入钕玻璃表层的深度仅为15 μm左右,需要较长的时间以实现有效的钾离子层富集,也就需要严格地控制离子交换的工艺稳定性,因此需要较为良好的离子交换界面。选择在酸蚀基础上再进行离子交换的好处是一方面去除原来细磨产生的裂

纹,达到增大钕玻璃抗折强度的目的;另一方面使得离子交换能够稳定进行,在整个表面形成较为均匀的钾离子层。由于钾离子的半径达到 0.13 nm,在碱金属中属于较大的^[16]。如果它取代原来玻璃中的锂或钠离子,冷却到室温后,钾离子层将产生较为

集中的压应力。如果能够形成完整的具有一定厚度的压应力层,如图 5 所示的 25~30 μm ,则可以平衡钕玻璃在重频工作时因热效应产生的张应力,从而保持整个钕玻璃完整的工作状态。

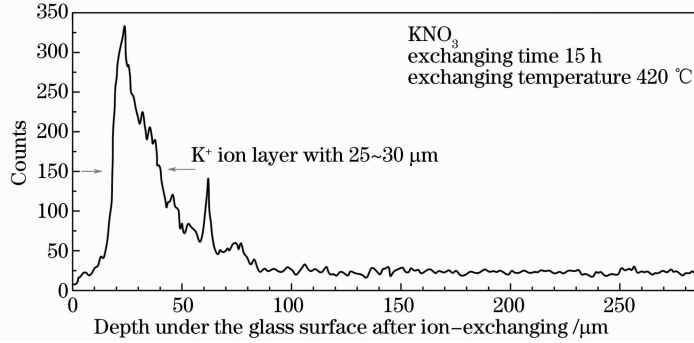


图 5 新型重复频率应用掺钕磷酸盐激光玻璃在离子交换后钾离子深度分布的分析

Fig. 5 Analysis of the depth distribution of K^+ after the ion exchanging process of the new Nd-doped phosphate laser glass for repetition-rate application

图 6 测定了新型重频应用掺钕磷酸盐激光玻璃在酸蚀和离子交换处理前后的输入-输出曲线,三条曲线分别对应未进行化学处理的、经过酸蚀处理的、经过酸蚀和离子交换处理的三个激光玻璃棒样品。熔制后没有任何化学处理的新型钕玻璃,显示出约为 48 J 的抽运阈值和 1.03% 的斜率效率。经过酸蚀处理后,抽运阈值下降到 39 J 左右,斜率效率有较大提高,为 1.42%。这是由于酸蚀降低了玻璃表面对抽运的漫反射,使得表面透射率有了成倍提高,从而吸收抽运光的能量有所增加。重要的是,经过离子交换处理后,虽然抽运阈值上升到 45 J 左右,但斜率效率进一步提高到 1.64%。不能肯定是离子交换使得吸收抽运光的能量更多,但说明了离子交换过程如果能够得到控制并稳定进行,一方面可以形成足够厚度的压应力层,以平衡玻璃内部的张

应力,从而提高钕玻璃的耐抽运极限。另一方面,所形成的具有一定厚度的交换离子层,也没有使得玻璃外表面产生严重的新裂纹,或者扩展原来腐蚀坑和微裂纹的深度。主要原因在于新型重频掺钕磷酸盐激光玻璃的热膨胀性质得到了较大的改善,相对于早期高能量和高峰值功率应用的钕玻璃,线性平均热膨胀系数降低了 15%~25%,确切数值与具体的成分调整有关。

图 7 为高低浓度钕离子掺杂的新型重频应用磷酸盐激光玻璃的热膨胀曲线。应用于强激光冲击技术的激光器件,多工作于水冷条件。在 50 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 温度区间,新型磷酸盐玻璃的平均线膨胀系数为 $8.8 \times 10^{-6} \sim 9.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。所表现出来的膨胀性质基本上是钠-铝磷酸盐玻璃的 1/2 左右^[17],说明在新型重频掺钕磷酸盐玻璃中的铝离子配位是比较合适的。原因是它的结构不仅受到含量的影响,很大程度上受到磷酸盐玻璃其他基质成分的影响,其中氧磷比也是很重要的一个方面^[18-19]。因此降低热膨胀系数主要在于调整磷酸盐基质的网络结构。有的铁磷酸盐玻璃的膨胀系数仅为 $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 左右^[20],而温度平方项的系数为 3.47×10^{-7} 。如图 7 所示,新型钕玻璃温度平方项的系数为 $3.2 \times 10^{-7} \sim 4.2 \times 10^{-7}$,反映出玻璃网络结构的分布是比较均匀的,其中的点缺陷相对较少。随着钕离子浓度的提高,线性膨胀系数有所提高,而转变温度也从 486 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 491 $^{\circ}\text{C}$ 。如果确实如此,则反映出钕离子在这个磷酸盐体系中的置换可能在高

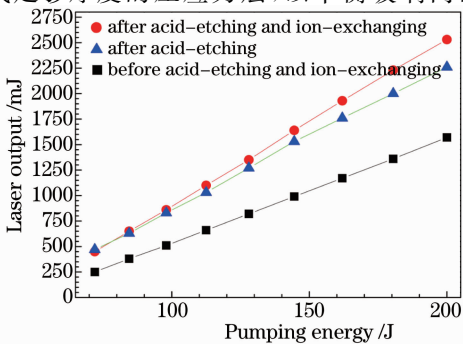


图 6 新型重复频率应用掺钕磷酸盐激光玻璃的激光输入-输出曲线

Fig. 6 Laser input-output curves of the new Nd-doped phosphate laser glass for repetition rate application

低浓度情况下并不完全相同,需要进一步研究。通常情况下,磷酸盐玻璃基质的特点是具有较高的热膨胀系数和较低的转变温度^[21],而两者关系大致相反。总之,在成分方面,如果降低热膨胀系数,则玻

璃的转变温度将升高,需要考虑制备工艺的调整。在结构方面,如果减少非桥氧的数目,则可以降低热膨胀系数,需要考虑光谱参数之间的平衡。

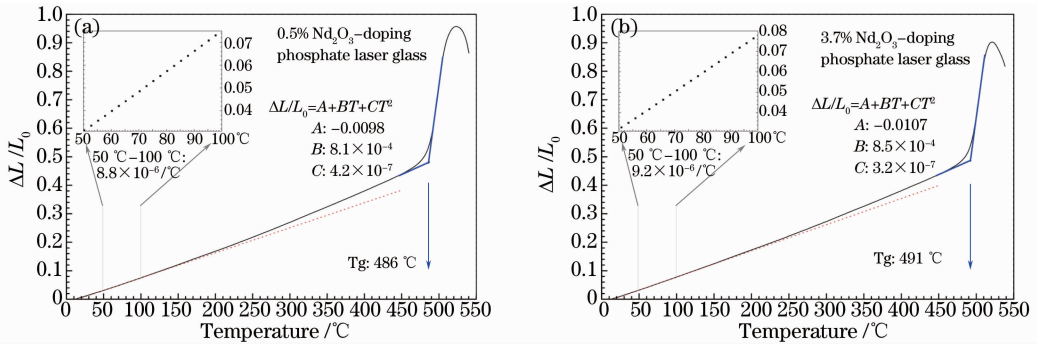


图 7 新型重复频率应用掺钕磷酸盐激光玻璃的热膨胀曲线。(a) 0.5%氧化钕掺杂(质量分数); (b) 3.7%氧化钕掺杂(质量分数)

Fig. 7 Thermal expansion curves of the new Nd-doped phosphate laser glass for repetition-rate application.

(a) 0.5% (mass fraction) Nd₂O₃; (b) 3.7% (mass fraction) Nd₂O₃

图 7 所示较低的热膨胀,在对光束质量有很高要求的应用中也有很好的表现。采用新型重频应用的掺钕磷酸盐激光玻璃,在 0.1 Hz 条件下,5 ns 脉宽 400 mJ 注入时,1800 J 抽运就获得 1.2 J 的输出,运行 3 min 左右达到热平衡,波前畸变量为 0.5λ^[22]。而 N31 型钕玻璃^[23],在 3 Hz 条件下,获得的高光束质量激光输出则为 0.1 J。目前尺寸为 Φ16 mm×210 mm 的新型重频应用钕玻璃已经实现 0.1 Hz 条件下,空间近平顶分布、脉宽为 3 ns 的 3 J 单脉冲激光输出。

4 结 论

测试并比较了新型重复频率应用的掺钕磷酸盐激光玻璃与其他钕玻璃的激光输出性质,在此基础上分析了表面酸蚀和离子交换增强处理对重频高能量激光输出的作用,特别是测定并研究了这种新型钕玻璃在高能量闪光灯抽运条件下的重复频率工作极限和抽运能量承受极限,以及它们与玻璃较低热膨胀性质的关系。结果表明,新型重频应用类型的掺钕磷酸盐激光玻璃在制备和增强处理工艺、激光输出能力和热膨胀性质这三个相互关联的方面,均表现出适合于重频高能量激光运行的性能。

参 考 文 献

1 Zhang Yongkang. Key problems and prospects of laser shock processing industrialization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(3): 74-77.
张永康. 激光冲击强化产业化关键问题及应用前景[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(3): 74-77.

2 Zhang Yongkang, Ye Yunxia. Laser shock processing device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(9): 32-34.
张永康, 叶云霞. 激光冲击强化装置[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(9): 32-34.
3 A A Izyneev, P I Sadovskii. New highly efficient LGS-KhM erbium-doped glass for uncooled miniature lasers with a high pulse repetition rate[J]. Quantum Electronics, 1997, 27(9): 771-775.
4 B P Fairand, B A Wilcox, W J Gallagher, et al.. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum[J]. J Appl Phys, 1972, 43(9): 3893-3895.
5 K Yoshida, K Ochi, T Kotera, et al.. Development of array Nd: glass slab lasers operating at high repetition rate[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 1994. 78.
6 V M Martins, D N Messias, N O Dantas, et al.. Concentration dependent fluorescence quantum efficiency of neodymium doped phosphate glass matrix[J]. J Lumin, 2010, 130(12): 2491-2494.
7 He Dongbing, Chen Huiyu, Hu Lili, et al.. Ion exchange strengthened phosphate laser Nd-glass and its preparation method; China, CN101880127A[P]. 2010-11-10.
何冬兵, 陈辉宇, 胡丽丽, 等. 表面离子改性增强的磷酸盐激光钕玻璃及其制备方法; 中国, CN101880127A[P]. 2010-11-10.
8 J H Campbell, T I Suratwala. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/ high-peak-power lasers[J]. J Non-Cryst Solids, 2000, 263-264(1-2): 318-341.
9 Jiang Zhonghong, Yang Zhongmin. Progress on research and development of laser glass in China[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2198-2201.
姜中宏, 杨中民. 中国激光玻璃研究进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2198-2201.
10 Hu Lili, Jiang Zhonghong. Research progress of phosphate laser glass[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2005, (5): 125-129.
胡丽丽, 姜中宏. 磷酸盐激光玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2005, (5): 125-129.
11 F M Ernsberger. Detection of strength-impairing surface flaws in glass[J]. Proc Royal Soc London Series A: Math Phys Sci, 1960, 257(1289): 213-223.
12 H C Lee, H E Meissner. Ion-exchange strengthening of high-average-power phosphate laser glass[C]. SPIE, 1991, 1441:

- 87-103.
- 13 J A Randi, J C Lambropoulos, S D Jacobs. Subsurface damage in some single crystalline optical materials[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(12): 2241-2249.
- 14 G A C M Spierings. Wet chemical etching of silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions[J]. *J Mater Sci*, 1993, 28(23): 6261-6273.
- 15 T Findakly. Glass waveguides by Ion exchange: A review[C]. *SPIE*, 1985, 24(2): 242244.
- 16 R D Shannon, C T Prewitt. Effective ionic radii in oxides and fluorides[J]. *Acta Crystallographica Section B*, 1969, 25(5): 925-946.
- 17 B Tiwari, V Sudarsan, A Dixit, *et al.*. Effect of TiO₂ addition on the optical, thermo-physical, and structural aspects of sodium aluminophosphate glasses[J]. *J Am Ceram Soc*, 2011, 94(5): 1440-1446.
- 18 Zhao Fenggang, Wang Guonian, Hu Lili. Effect of oxygen/phosphorus molar ratio on the properties of phosphate-cladding glasses[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(5): 554-557.
- 赵凤刚, 汪国年, 胡丽丽. 不同氧磷比对磷酸盐包边玻璃性质的影响规律(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(5): 554-557.
- 19 C E Smith, R K Brow. The properties and structure of zinc magnesium phosphate glasses[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2014, 390: 51-58.
- 20 J Kitheri, R Asuvathraman, K R Venkata, *et al.*. Investigation of thermal expansion and specific heat of cesium loaded iron phosphate glasses[J]. *J Nucl Mater*, 2012, 429(1-3): 1-6.
- 21 H Takebe, T Harada, M Kuwabara. Effect of B₂O₃ addition on the thermal properties and density of barium phosphate glasses[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2006, 352(6-7): 709-713.
- 22 Yu Guohao, Fan Wei, Wei Hui, *et al.*. Thermal property analysis for repetition rate pumped Nd: glass amplifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 924-928.
- 于国浩, 范薇, 韦辉, 等. 重复频率泵浦钕玻璃放大器的热性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 924-928.
- 23 Tang Xiongxin, Fan Zhongwei, Qiu Jisi, *et al.*. Fabrication of repetition frequency 3 Hz, 100 mJ high-beam-quality Nd-glass amplifier[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(4): 620-625.
- 唐熊忻, 樊仲维, 邱基斯, 等. 重复频率 3 Hz、100 mJ 高光束质量钕玻璃放大器的研制[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(4): 620-625.

栏目编辑: 张浩佳