

# 放电等离子体烧结法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的高效激光运转

杨成东<sup>1</sup> 鲁远甫<sup>2</sup> 章 健<sup>3</sup> 许长文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(深圳大学 深圳 518060)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>3</sup>(中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 201899)

**摘 要** 文章主要针对基于放电等离子体烧结方法制备的透明 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光性能展开实验研究。研究结果显示,退火后的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品激光性能远优于退火前的样品:当采用直线腔测试方法时,退火后样品获得了最大功率为 880 mW,最大斜效率为 40% 的输出;当采用 V 型腔测试方法时,退火后样品获得了最高为 1.25 W,最大斜效率为 38% 的输出,输出光谱包含了两条位于 1 076.7 nm 和 1 080.8 nm 的谱线,但功率的进一步提高受到严重的热透镜效应限制。实验结果表明,通过放电等离子体烧结方法可以制备出高光学质量的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品。

**关键词** 陶瓷;放电等离子体烧结;激光;倍半氧化物

**中图分类号** TN 2 文献标志码 A

## Efficient Laser Operation Based on Transparent Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Fabricated by Spark Plasma Sintering

YANG Chengdong<sup>1</sup> LU Yuanfu<sup>2</sup> ZHANG Jian<sup>3</sup> XU Changwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

<sup>2</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>3</sup>(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

**Abstract** High efficient laser operation based on the SPSed (spark plasma sintering) Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic was investigated in this paper. Laser performance of Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples before and after anneal were tested respectively, and results show that the samples after anneal have much better optical quality. When a linear cavity was used, the annealed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic sample can output maximum power of 880 mW with a corresponding slope efficiency of 40%. When a V-shape cavity was used, annealed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic sample can output maximum power of 1.25 W with a corresponding slope efficiency of 38%. The laser spectral lines at 1 076.7 nm and 1 080.8 nm oscillated simultaneously, but the thermal lensing effect limited the increase of output power of the Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser. Experimental results showed that the high optical quality Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic can be

收稿日期: 2017-08-11 修回日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405126); 深圳市科技计划项目(JCYJ20140828163633984); 广东省科技规划项目(2016B050501005)

作者简介: 杨成东, 硕士研究生, 研究方向为全固态激光技术; 鲁远甫, 副研究员, 研究方向为激光技术及其应用; 章健, 博士, 研究方向为新型陶瓷材料和激光陶瓷制备技术; 许长文(通讯作者), 博士, 研究方向为固态激光和超快激光技术, E-mail: chwxu@szu.edu.cn.

fabricated by the spark plasma sintering method.

**Keywords** ceramics; spark plasma sintering; laser; sesquioxides

## 1 引言

在过去的二十年, 稀土离子掺杂的透明激光陶瓷材料得到了广泛和深入的研究<sup>[1-4]</sup>。相比于单晶激光材料, 激光陶瓷拥有诸多的优点: 制作时间短、掺杂浓度高、可制作复合结构和大尺寸的样品等。到目前为止, 科学家已经开发了多种不同制备透明陶瓷的方法。其中主要的方法有: 真空烧结<sup>[5]</sup>、热等静压烧结<sup>[6]</sup>和放电烧结<sup>[7]</sup>等。利用这些方法, 可成功地制备透明激光陶瓷, 如各种稀土离子掺杂的石榴石陶瓷<sup>[5,6,8]</sup>、倍半氧化物陶瓷<sup>[9,10]</sup>和氟化物陶瓷<sup>[11]</sup>。

对高功率固态激光而言, 激光增益材料的热导率具有极其重要的意义。而具有高热导率的激光增益材料在实际应用中更受青睐。研究发现, 倍半氧化物材料具有很高的热导率, 已经超过了当前最为广泛使用的钇铝石榴石(Yttrium Aluminum Garnet, YAG)基质的热导率, 但倍半氧化物的制备却是个巨大的挑战。由于其熔点温度在 2 400℃ 左右, 比 YAG 类材料的熔点温度高出 500℃, 因此传统的晶体生长技术难以制备出高质量、大尺寸的倍半氧化物晶体<sup>[12,13]</sup>。但利用陶瓷烧结技术则可以较好地避开倍半氧化物熔点高的问题。这是因为陶瓷的烧结温度一般都远低于陶瓷材料对应的熔点。因此, 利用陶瓷烧结技术制作高品质的倍半氧化物激光陶瓷引起了研究者们极大的兴趣<sup>[9,10,14,15]</sup>。

钕离子是一种广泛使用的激光增益粒子, 其掺杂的倍半氧化物激光介质, 首先有一个引人关注的特征——拥有丰富的发射谱线<sup>[16]</sup>。因此, 基于钕离子掺杂的倍半氧化物的激光

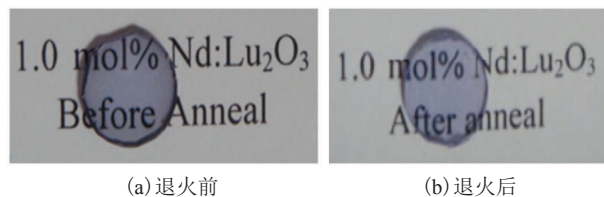
被考虑用做大气探测激光雷达的光源<sup>[17,18]</sup>。其次, 在钕离子掺杂的倍半氧化物中, 0.9 μm 和 1.08 μm 发射带的发射截面比, 较钕离子掺杂的钇铝石榴石中对应的两个发射带的发射截面比大<sup>[17,19]</sup>, 这有利于抑制放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)效应<sup>[20]</sup>。最后, 当钕离子掺杂的倍半氧化物激光的跃迁发生在 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 能级之间时, 非常容易运转在双波长模式。借助差频或光学拍频的方法, 双波长模式运转的激光在太赫兹辐射的产生方面有潜在的应用价值。

在本文中, 我们提出基于放电等离子体烧结(Spark Plasma Sintering, SPS)方法制备 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷的高效率激光运转。与其他透明激光陶瓷的制备技术相比, 放电等离子体烧结方法具有一个独特的优点: 陶瓷粉体的致密过程可以在数分钟内完成<sup>[21]</sup>。因此, 陶瓷生长速度很快, 同时陶瓷内部的晶粒尺寸和大小分布的一致性可以得到较好的保证。Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷激光由 Lu 等<sup>[22]</sup>于 2002 年率先报道。在他们的实验中, 所使用的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷是用真空烧结方法制备, 结果获得了 10 mW 输出功率。2011 年, An 等<sup>[23]</sup>利用 SPS 方法首次成功地制备出了高品质的透明 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷。随后, SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷的激光输出也得到了验证<sup>[24-26]</sup>。但在已经发表的论文中, 无论是输出功率还是输出效率都非常低。在本文中, 我们利用 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷实现了高效率的瓦级输出。其中, 利用 V 形腔获得了 1.25 W、斜效率为 38% 的输出; 利用直线腔, 获得了 880 mW、斜效率为 40% 的输出。本文实验结果表明, 利用 SPS 方法可以制

备出高品质的激光陶瓷, 同时也表明了 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光陶瓷具有作为高功率激光增益介质的潜能。

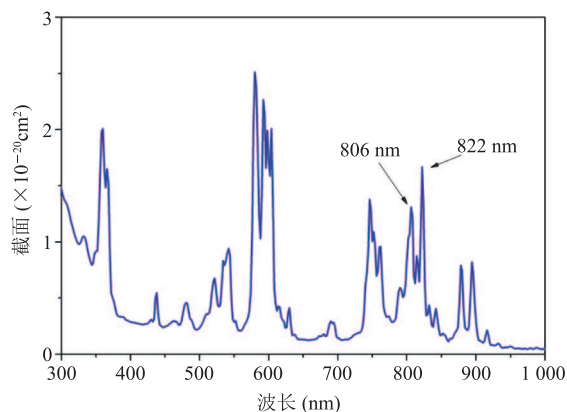
## 2 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷光谱性能

在本文实验中, 所用的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品由中国科学院上海硅酸盐研究所提供。在先前的报道中, An 等<sup>[24]</sup>利用 SPS 方法成功地制备了 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品并实现了激光输出。本文实验使用的样品采用相同的烧结工艺和程序。另外, 考虑到实验所用烧结助剂为 LiF (熔点 1 121 K), 将烧结温度从 1 273 K 降至 1 073 K。最终, 利用 SPS 方法成功地制备出了浓度为 1.0at.% 的样品, 结果如图 1 所示。样品经过简单的抛光后再进行光谱性能测试, 图 1 为用于测试的样品照片。在 1 078 nm 处, 测得样品的透过率为 81.7%, 非常接近于扣除两个表面反射损失后的理论极限。经过换算后样品的吸收截面光谱如图 2 所示。在 800 nm 附近, 存在着几个吸收带。其中, 位于 806 nm、822 nm 处的两个峰的吸收截面大小分别为  $1.31 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  和  $1.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。而 806 nm



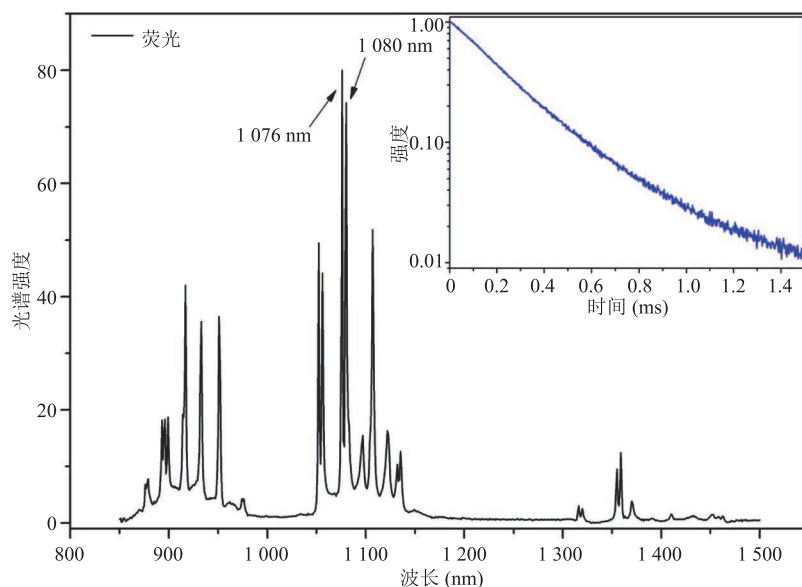
(a) 退火前

(b) 退火后

图 1 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品Fig. 1 SPSed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples图 2 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品吸收谱Fig. 2 Absorption spectrum of SPSed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample

的吸收峰与商售的半导体激光器波长非常接近, 在实验中作为泵浦带用来吸收泵浦能量。

图 3 为样品从 850 nm 到 1 500 nm 的荧光发射谱。其中, 荧光光谱的激发使用了一个波长

图 3 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品的发射谱和在激光上的能级荧光寿命Fig. 3 Emission spectrum and fluorescence lifetime of upper laser level of SPSed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample

为 807 nm 的半导体激光器。图 3 显示, 三组显著的荧光发射谱线分别对应钕离子  ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$  和  ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$  三组跃迁。其中, 两个最强的发射峰位于 1 076 nm 和 1 080 nm 处, 二者位置靠得非常近, 而且发射强度相似。如果在激光腔内没有波长选择元件, 那么很容易产生双波长激光输出。图 3 的插图 of Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在 1 076 nm 处的荧光衰减曲线, 测得的荧光寿命为 231  $\mu$ s, 与掺杂浓度为 1% 的 Nd:YAG 陶瓷非常相似 (224~238  $\mu$ s)。

### 3 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光性能测试和讨论

#### 3.1 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷退火前后激光性能测试

在实验中, 搭建了一个简单的直线腔对 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷退火前后的激光性能进行测试和对比。在所使用的 2 块 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品中, 一块经过退火, 另一块未退火。其中, 两块样品尺寸一致, 横截面为 3 mm×3 mm, 长度为 1 mm。样品的横截面经过光学抛光但没有镀减反膜, 用铝箔包裹并安装在一个水冷铜块内散热。冷却水流的温度设定在 17℃。直线腔激光实验装置如图 4 所示。腔由两面镜子组成: 输入镜  $M_1$  是平面镜, 输出耦合镜  $M_2$  的曲率半径为 100 mm,  $M_1$  到  $M_2$  的距离为 50 mm。经过 ABCD 矩阵计算样品内部的基模光斑半径尺寸约为 130  $\mu$ m。之后, 输入镜  $M_1$  镀上对 807 nm 增透膜和对 1 000~

1 100 nm 高反膜, 三种不同透过率 (0.2%、5.5% 和 11%) 的输出耦合镜用来测试样品的激光性能。另外, 一台波长为 807 nm 光纤耦合输出的半导体激光器被用来做为泵浦源。光纤的芯径和数值孔径分别为 100  $\mu$ m 和 0.22。泵浦光首先用一个焦距为 80 mm 的双胶合透镜准直, 然后被一个焦距为 100 mm 的双胶合透镜聚焦进样品。用刀边法测量经过再次聚焦后的光斑尺寸为 130  $\mu$ m。

图 5 所示为未退火的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷输出功率与泵浦吸收功率之间的关系。当输出耦合镜的透过率为 0.2% 时, 获得最大输出功率为 26.2 mW、阈值泵浦功率为 0.75 W, 对应的光光转换效率为 1.5%、斜效率为 2.2%。当输出耦合镜的透过率为 5.5% 时, 最大输出功率达到 26 mW、阈值泵浦功率为 1.5 W, 此时的斜效率和光光转换效率分别为 4.4% 和 1.5%。当用 11% 的输出耦合镜测试时, 未能实现激光输出。

图 6 为退火后的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷输出功率与泵浦吸收功率之间的关系。当输出耦合镜的透过率为 5.5% 时, 获得的最大输出功率达到 205 mW、阈值泵浦功率为 0.36 W, 对应的光光转换效率为 11.8%、斜效率为 14%。当输出耦合镜透过率为 0.2% 和 11% 时, 获得的最大输出功率为 173 mW 和 98 mW、阈值功率为 0.18 W 和 0.82 W, 对应的斜效率分别为 11% 和 9%、光光转换效率为 9.9% 和 5.6%。由此可见, 11% 输出镜的斜效率

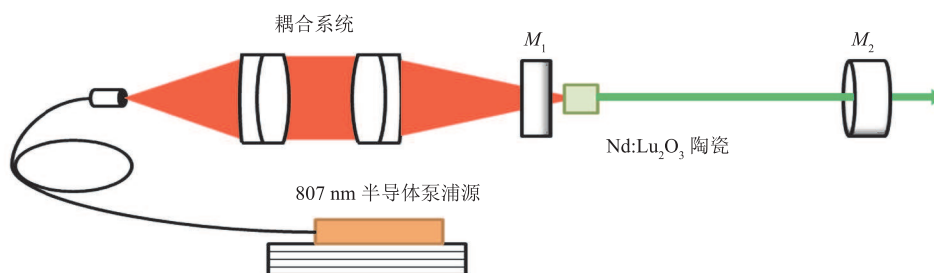


图 4 直线腔激光实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of linear laser cavity setup

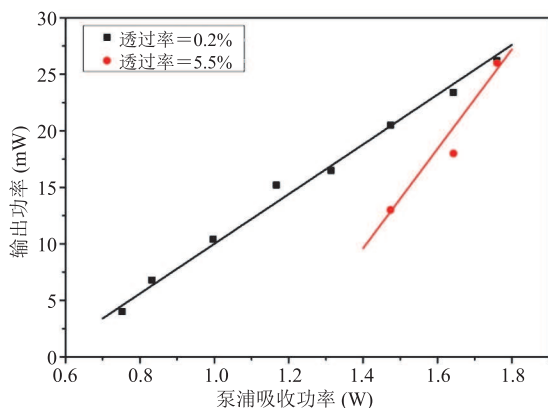


图 5 未退火的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷泵浦吸收功率与输出功率的关系

Fig. 5 Dependence of output power on absorbed pump power for un-annealed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample

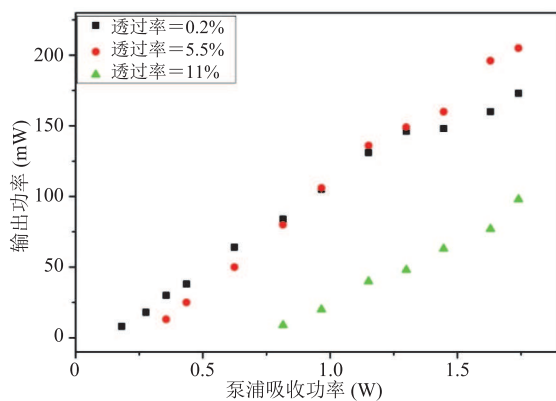


图 6 退火 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷泵浦吸收功率与输出功率关系

Fig. 6 Dependence of output power on absorbed pump power for annealed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample

最低。主要原因有两点：一是 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷本身损耗比较大，二是使用的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷厚度很薄。这两个原因致使腔内的净增益不够大，当使用 11% 输出镜时，无法在腔内形成足够的激光振荡反馈，导致泵浦功率的提取效率下降。

对于未退火陶瓷和退火陶瓷，相应的激光光谱如图 7 所示(均是在最大泵浦功率情况下测量)。从图 7 可见，两个波长同时得到了激发：一个位于 1 076 nm 附近，另一个位于 1 080 nm 附近。由荧光发射谱可知，Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在 1 076 nm 和 1 080 nm 处有两个最强的发射截面，

且强度近似，故在激光光谱上可以见到 1 076 nm 和 1 080 nm 处两条谱线同时振荡。

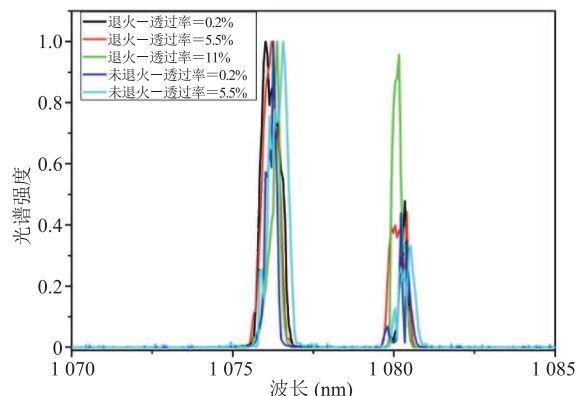


图 7 退火和未退火的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光光谱图

Fig. 7 Laser spectra for annealed and un-annealed Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples

通过对比图 5 和图 6 可以很明显地发现，在输出耦合透镜透过率相同时，退火后的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的最大输出功率、斜效率以及对应的光光转换效率都要远大于未退火的陶瓷，而且泵浦阈值功率也要小很多，容易产生激光振荡。由此可见，经过退火处理后的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的光学性能有了很大的改善，有利于实现高效率的激光输出。退火的主要作用是在高温下的富氧环境中消除 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷内部的氧空位，从而使得样品的散射损耗降低，进而在激光实验中可以获得较高的效率。

### 3.2 退火 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光性能提升测试和分析

对退火后的样品采取镀膜处理，以进一步测试其激光性能。样品的通光截面对 807 nm 和 1 000~1 100 nm 波段同时镀增透膜。镀膜后，样品表面对泵浦光和激光的反射损耗均大大降低，从而使得腔内的总损耗大大降低。激光器的效率和输出功率在镀膜后得到很大的提高，稳定性也会相应地提高。激光镀膜后的样品置于图 4 所示的直线腔内进行激光性能测试，其他实验条件保持不变。

图 8 为 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷输出功率和泵浦吸收

功率的关系。经过镀膜处理的样品, 激光性能得到了很大的提升。与镀膜前相比, 无论是斜效率还是输出功率都有了数倍的提高。当输出耦合镜透过率为 5.5% 时, 斜效率达到了 40%, 最大输出功率 880 mW。但从图 8 可以看出, 当吸收的泵浦功率超过 2 W 时, 输出出现了饱和的现象。这个现象应当归因于, 热透镜效果导致的激光光斑和泵浦光斑的尺寸失配。当泵浦功率增大时, 热透镜效应让谐振腔激光模式与泵浦光的模式匹配越来越差。因此, 从泵浦光获取能量越来越难, 转换效率也相应地减小。

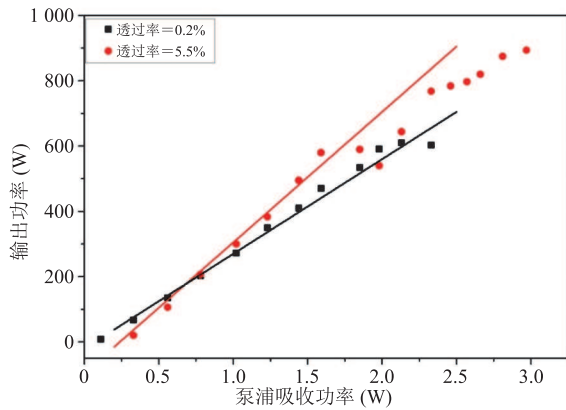


图 8 退火且镀膜后的  $\text{Nd:Lu}_2\text{O}_3$  输出功率与泵浦吸收功率的关系

Fig. 8 Dependence of output power on absorbed pump power for the annealed and coated  $\text{Nd:Lu}_2\text{O}_3$  sample

为了改善热透镜效果导致的激光光斑和泵浦光斑尺寸的失配效应, 我们采用了 V 型腔的实验装置。相比于上述的直线腔, V 型腔对热透镜效果导致的激光光斑和泵浦光斑尺寸的失配效应更为迟钝, 有利于推迟饱和现象的出现, 从而提升激光输出功率。图 9 为采用的 V 型腔实验装置示意图。此时,  $M_2$  是曲率半径为 300 mm 的高反镜, 折叠角大约是  $5^\circ$ ,  $OC$  是平面输出耦合镜。 $M_1$  到  $M_2$  的距离、 $M_2$  到  $OC$  的距离分别是 151 mm 和 300 mm, 其他参数同直线腔。由 ABCD 矩阵可知, 晶体内部的基模光斑尺寸约为  $72 \mu\text{m}$ 。

图 10 为  $\text{Nd:Lu}_2\text{O}_3$  陶瓷激光输出功率与泵浦吸收功率的关系。从图 10 可知, 当输出耦合镜的透过率为 1.6% 时, 得到最大输出功率为 1.25 W, 此时吸收泵浦功率为 4.15 W, 相对应的光光转换率为 30%、斜效率为 38%。当换成透过率为 5% 和 9% 的输出耦合镜时, 最大输出功率分别为 1.1 W、0.67 W, 对应的斜效率分别为 36%、28%。与直线腔时最大的 880 mW 输出功率相比, V 型腔中获得了 1.25 W 的最大输出, 最高输出功率提升了 42%。然而, 激光输出的最高斜效率却有所降低: 与吸收泵浦功率 2 W 以下的情形相比, 从 40% 降低到了 38%。这个原因应

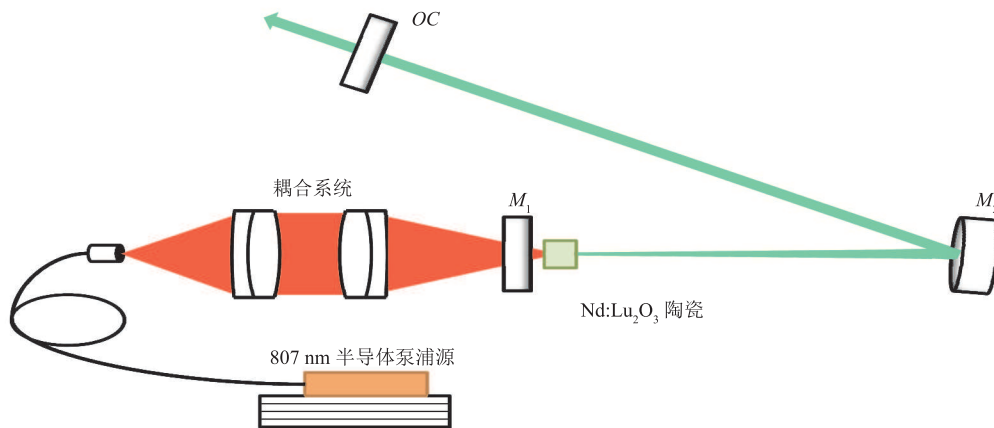


图 9 V 型腔实验装置示意图

Fig. 9 Schematic of V-shaped laser cavity setup

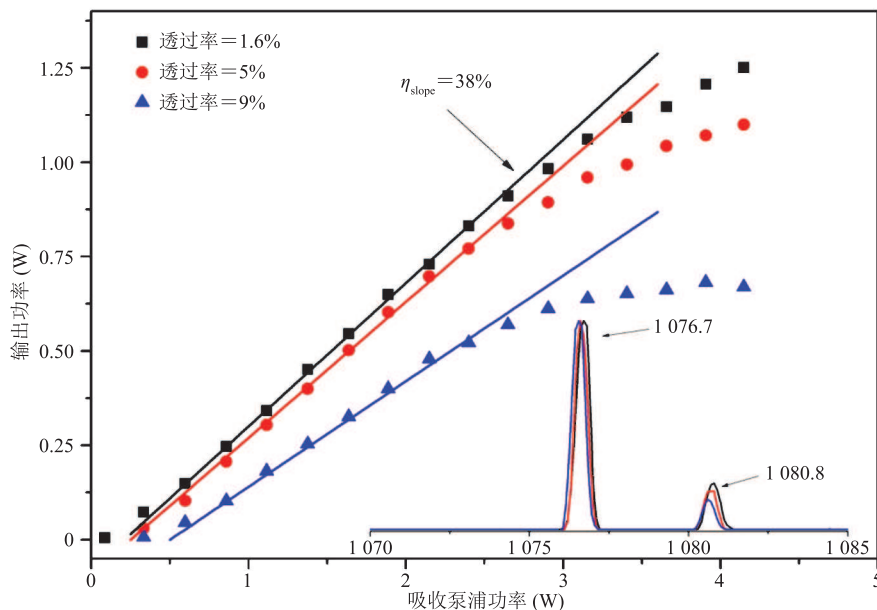


图 10 V 型腔中 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷输出功率与泵浦吸收功率的关系

Fig. 10 Dependence of output power on absorbed pump power for Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample inside the V-shaped cavity

当归因于在低泵浦功率时, 由于热透镜效应还不显著, 在直线腔内泵浦光束与激光光束的模式匹配更好。这从两种不同腔型的基模激光光斑与泵浦光光斑的尺寸对比很容易看出。从图 10 也容易发现, 对于 V 型腔, 当泵浦功率增大时, 激光输出也一样发生了显著的饱和现象, 但饱和现象的发生明显推迟了。对于 5.5% 的输出耦合镜, 饱和现象在吸收泵浦功率为 3 W 以上时才开始明显出现。另外, 输出镜透过率越大, 饱和现象越早发生。由图 10 可见, 输出镜的透过率越大时, 更多的泵浦能量将会沉积在陶瓷中, 热透镜效应越加明显, 所以饱和现象也就越早发生。采用 V 型腔时, 在最大泵浦功率情况下, 记录了 3 种不同透过率的输出耦合镜的输出光谱, 结果如图 10 中插图所示。输出的激光包含了两个波长: 一个是 1 076.7 nm, 另一个是 1 080.8 nm。其中, 1 076.7 nm 光谱强度要比 1 080.8 nm 光谱强度大。对比图 7 和图 10 的激光光谱可知, 在镀膜前后或者当所用镜片透过率改变时, 激光光谱中心位置稍微有所不同, 但中

心位置的变化没有明显的规律。这种变化的原因应该与腔内的总损耗相关。损耗改变的情况下, 粒子数反转布居不同, 从而影响了激光的振荡波长。

### 3.3 样品损耗系数的测量

我们接下来利用振荡阈值法<sup>[27]</sup>对陶瓷样品的损耗进行了测量。

$$-\ln R = 2KP_{th} - 2\alpha l \quad (1)$$

其中,  $R$  为输出镜的反射率;  $-\ln R$  为输出镜耦合透过率损耗因子;  $P_{th}$  是阈值泵浦功率;  $\alpha$  为晶体单位长度的损耗;  $l$  为晶体长度;  $K$  为效率转换因子。

为了尽可能地提高测量准确度, 实验过程共使用 5 个不同透过率的输出耦合镜。耦合透过率分别为 0.8%、1.6%、3.5%、5% 和 9%, 对应的阈值泵浦功率分别为 0.138 W、0.24 W、0.46 W、0.67 W 和 1.22 W, 结果如图 11 所示。拟合后得到截距大小为 0.002 4。由样品长度 1 mm 可以推算出样品损耗大小为 0.012/cm。对比已经发展成熟的 YAG 类陶瓷样品 1% 量级的损耗可见, SPS

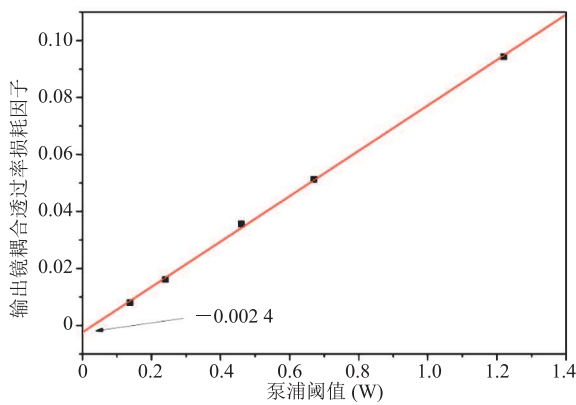


图 11 泵浦阈值与输出耦合透过率的关系

Fig. 11 Dependence of pump threshold power on transmission of output coupler

方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 样品的质量还有较大的提升空间。对于利用 SPS 方法制备激光陶瓷，提高其激光性能主要在于尽可能地降低陶瓷的内部损耗。可能的途径有以下几方面：一是寻求更适合 SPS 方法的烧结助剂和烧结温度，进一步降低烧结陶瓷晶粒之间的气泡和致密度；二是对烧结过程中的放电工艺进行改进，创造更大的放电区域，改善制备的均匀性和样品尺寸；三是对放电极进行改进，减少放电极对陶瓷样品引入的污染。

### 3.4 对比和讨论

表 1 为将本文方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和前人已发表的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光性能进行了总结。从表 1

可见，Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光的最大输出为 4 W，对应的斜效率为 16.6%，而最大的斜效率为 21.4%，对应的输出为 3.52 W<sup>[28]</sup>。在本文中，我们报道了一个高效的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光，其 40% 的斜效率超过了以往任何一个 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光。此外，就 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷而言，本文报道的结果无论在斜效率还是最高输出功率方面，比以往的结果都有了很大的提高。40% 的斜效率比以往的 SPS 方法制备的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷有了两倍的提高。在输出功率方面，由于受限于严重的热透镜效率，最高输出功率受到了限制。为了进一步提高输出功率，需要采用更好的冷却方案。考虑到 SPS 制备的陶瓷样品厚度受限，薄片激光器的方案对于 SPS 方法制备的样品是非常合适的。通过采用合适的冷却和增益介质构型，更高效率和输出功率的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光是可以期待的。

## 4 总结

本文验证了基于 SPS 法制备的透明 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的高效激光运转。实验首先验证了退火后的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品激光性能远好于退火前的样品。当采用直线腔时，获得了最大功率为 880 mW、最大斜效率为 40% 的输出；当采用 V

表 1 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光的性能总结

Table 1 Performance summary for Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lasers

介质类型	制作 / 生长方法	介质构型	最大输出 (W)	输出波长 (nm)	斜效率 (%)	参考文献
陶瓷	SPS	棒状	1.25	1 076.7 & 1 080.8	38.0	本文
陶瓷	SPS	棒状	0.88	1 076.2 & 1 080.5	40.0	本文
陶瓷	SPS	棒状	0.21	1 076.7 & 1 080.8	14.0	Li 等 <sup>[24]</sup>
陶瓷	SPS	棒状	0.60	1 076 & 1 080	6.0	Ito 等 <sup>[26]</sup>
陶瓷	SPS	棒状	0.55	1 076.3 & 1 080.5	6.9	Toci 等 <sup>[25]</sup>
陶瓷	HIP	棒状	4.00	1 074.7 & 1 079	16.6	Toci 等 <sup>[25]</sup>
陶瓷	NVS*	棒状	0.01	1 075.9 & 1 080	/	Lu 等 <sup>[22]</sup>
晶体	OFZ**	棒状	2.81	1 076 & 1 080	17.3	Hao 等 <sup>[19]</sup>
晶体	/	薄片	3.52	1 359	21.4	Li 等 <sup>[28]</sup>

\*NVS: Nonpress Vacuum Sintering; \*\*OFZ: Optical Floating Zone



型腔时, 获得了最大功率为 1.25 W、最大斜效率为 38% 的输出。功率的进一步提高受到了严重的热透镜效应的限制。输出激光的光谱包含了两条位于 1 076.7 nm 和 1 080.8 nm 的谱线。本文结果表明, 通过 SPS 方法可以制备出高光学质量的 Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷样品。

## 致 谢

感谢上海海事大学的安丽琼博士对本文和本实验提供的热心帮助和讨论。

## 参 考 文 献

- [1] Ikesue A, Aung LA. Ceramic laser materials [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 721-727.
- [2] Kim W, Villalobos G, Baker C, et al. Overview of transparent optical ceramics for high-energy lasers at NRL [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F210-F221.
- [3] Sanghera J, Kim W, Villalobos G, et al. Ceramic laser materials [J]. *Materials*, 2012, 5(2): 258-277.
- [4] Boulon G. Fifty years of advances in solid-state laser materials [J]. *Optical Material*, 2012, 34(3): 499-512.
- [5] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, et al. ChemInform abstract: fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd: YAG ceramics for solid-state lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [6] Lee SH, Kupp ER, Stevenson AJ, et al. Hot isostatic pressing of transparent Nd: YAG ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, 92(7): 1456-1463.
- [7] Yoshida H, Morita K, Kim BN, et al. Densification of nanocrystalline yttria by low temperature spark plasma sintering [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(5): 1707-1710.
- [8] Gao WN, Shen Y, Bo Y, et al. Optical and ESR study of Nd: YAG transparent polycrystalline ceramics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(5): 051601.
- [9] Uehara H, Yasuhara R, Tokita S, et al. Efficient continuous wave and quasi-continuous wave operation of a 2.8  $\mu\text{m}$  Er: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18677-18684.
- [10] Griebner U, Petrov V, Petermann K, et al. Passively mode-locked Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser [J]. *Optics Express*, 2004, 12(14): 3125-3130.
- [11] Liu X, Yang K, Zhao S, et al. Growth and lasing performance of a Tm, Y: CaF<sub>2</sub> crystal [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2567-2570.
- [12] Fornasiero L, Mix E, Peters V, et al. New oxide crystals for solid state lasers [J]. *Crystal Research & Technology*, 1999, 34(2): 255-260.
- [13] Peters V, Bolz A, Petermann K, et al. Growth of high-melting sesquioxides by the heat exchanger method [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, 237-239: 879-883.
- [14] Lu JR, Lu JH, Murai T, et al. Nd<sup>3+</sup>: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(12A): L1277.
- [15] Zhou D, Shi Y, Xie JJ, et al. Fabrication and luminescent properties of Nd<sup>3+</sup>-doped Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> transparent ceramics by pressureless sintering [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, 92(10): 2182-2187.
- [16] Fornasiero L, Mix E, Peters V, et al. Efficient laser operation of Nd: Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 966 nm, 1082 nm, and 1486 nm [C] // *Advanced Solid State Lasers*, 1999: MC6.
- [17] Walsh BM, McMahon JM, Edwards WC, et al. Spectroscopic characterization of Nd: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: application toward a differential absorption lidar system for remote sensing of ozone [J]. *Journal of the Optical Society of American B*, 2002, 19(12): 2893-2903.
- [18] Prasad NS, Edwards WC, Trivedi SB, et al. Recent progress in the development of neodymium-doped ceramic yttria [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 831-837.
- [19] Hao LZ, Wu K, Cong HJ, et al. Spectroscopy and laser performance of Nd: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystal [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17774-17779.

- [20] Walsh BM, Barnes NP, Hutchenson RN, et al. Compositionally tuned 0.94- $\mu\text{m}$  lasers: a comparative laser material study and demonstration of 100-mJ Q-switched lasing at 0.946 and 0.9441- $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(9): 1203-1209.
- [21] Munir ZA, Anselmi-Tamburini U, Ohyanagi M. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method [J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(3): 763-777.
- [22] Lu J, Takaichi K, Uematsu T, et al. Promising ceramic laser material: highly transparent  $\text{Nd}^{3+}$ :  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  ceramic [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(23): 4324-4326.
- [23] Li QA, Ito A, Goto T. Fabrication of transparent lutetium oxide by spark plasma sintering [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94(3): 695-698.
- [24] Li QA, Ito A, Zhang J, et al. Highly transparent  $\text{Nd}^{3+}$ :  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  produced by spark plasma sintering and its laser oscillation [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(7): 1420-1426.
- [25] Toci G, Vannini M, Ciofini M, et al.  $\text{Nd}^{3+}$ -doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent sesquioxide ceramics elaborated by the spark plasma sintering (SPS) method. Part 2: first laser output results and comparison with  $\text{Nd}^{3+}$ -doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  and  $\text{Nd}^{3+}$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$  ceramics elaborated by a conventional method [J]. *Optics Materials*, 2015, 41: 12-16.
- [26] Ito A, Li QA, Goto T. Laser oscillation and luminescence of  $\text{Nd}^{3+}$ - and  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  transparent ceramics fabricated by spark plasma sintering [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, 124(4): 313-320.
- [27] Findlay D, Clay RA. The measurement of internal losses in 4-level lasers [J]. *Physics Letters*, 1966, 20(3): 277-278.
- [28] Li JH, Liu XH, Wu JB, et al. High-power diode-pumped Nd:  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  crystal continuous-wave thin-disk laser at 1359 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(3): 195-198.