

文章编号: 0258-7025(2010)10-2605-05

# 一种新型流体激光介质的散射损耗

桂 璐<sup>1</sup> 侯超奇<sup>2</sup> 彭 波<sup>2\*</sup> 范滇元<sup>1</sup> 韦 玮<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光和物理联合实验室, 上海 201800)  
(<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要** 为了研究一种新型固-液混合型的流体激光材料作为激光增益介质应用的性能,研究了其散射损耗随折射率及温度的变化规律。搭建了行波放大器实验平台,进行了该新型流体激光材料和钕玻璃固体激光材料的性能对比。实验表明,该流体材料具有典型的激光增益特性,然而其散射损耗对介质折射率和温度的变化比较敏感;在固-液相折射率匹配的条件下,散射损耗小于  $0.0047 \text{ cm}^{-1}$ 。实验结果表明,通过对折射率匹配的控制,该流体激光介质可以将散射损耗控制在合理的范围内以实现显著的激光增益,具有向高能激光体系发展的前景。

**关键词** 材料;流体激光介质;散射损耗;折射率匹配

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2605

## Scattering Loss of a New Fluid State Laser Material

Gui Luo<sup>1</sup> Hou Chaoqi<sup>2</sup> Peng Bo<sup>2</sup> Fan Dianyuan<sup>1</sup> Wei Wei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)  
(<sup>2</sup>State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi, 710119, China)

**Abstract** The scattering loss of a new mixed fluid state laser material varying with refractive index and temperature is studied experimentally. A platform of laser amplifier is established, on which the laser performance of the new material is shown by a comparison between the fluid state laser material and Nd-glass solid laser material. Experimental results show that the fluid state laser material possesses typical laser gain, but its scattering loss is sensitive to the variation of refractive index and temperature. The scattering loss can be controlled under  $0.0047 \text{ cm}^{-1}$  with accurate refractive index matching. The results above indicate that the method of refractive index matching is able to ensure an acceptable scattering loss of this new type of fluid state laser material, so this new material has a potential ability in high power laser systems.

**Key words** materials; fluid state laser material; scattering loss; refractive index matching

## 1 引 言

长期以来,高功率、大能量激光器的热管理问题一直是影响激光器使用性能的主要瓶颈。液态介质由于具有易散热、可实现流动循环冷却的特点,因而采用其作为激光工作介质成为改善激光器热管理的

一个重要突破口,这一思想在美国利弗莫尔实验室设计的大功率液体染料激光器系统上已经得到证实和应用<sup>[1]</sup>。为了进一步研究并且充分利用液体流动对热问题带来的影响,科研人员对循环流动的热问题进行了模拟仿真和理论分析<sup>[2,3]</sup>,并且提出了一

收稿日期: 2009-12-07; 收到修改稿日期: 2010-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(60977023)资助课题。

作者简介: 桂 璐(1983—),男,硕士研究生,现主要从事激光器器件设计方面的研究。E-mail: guiluo@siom.ac.cn

导师简介: 范滇元(1939—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事大型激光装置研制和应用方面的研究。

E-mail: fandy@smmail.cn(中国光学学会会员号:S040010626S)

\* 通信联系人。E-mail: bpeng@fudan.edu.cn

些针对性的结构设计,取得了良好的模拟和理论结果<sup>[4,5]</sup>;与此同时,掺稀土离子液体激光器的设计与实验研究也引起了国内外的广泛重视<sup>[6]</sup>,目前试验中已经实现了在流动循环条件下的激光输出,其工作效率和光束质量均达到十分优良的水平<sup>[7]</sup>。另一方面,为了研究并制备可实用的掺稀土离子液体激光材料,近年来国内外进行了不懈的努力,包括无机液体体系以及有机液体体系在内的多种方案已经取得初步的研究成果,但是还存在着各种问题和局限性而尚未得到广泛的应用<sup>[8]</sup>。

鉴于固体激光材料具有优良的激光特性,而液体的可流动性为有效的热管理提供了可能<sup>[1,4]</sup>,一种新型流体激光材料的概念被提出:将固体激光材料颗粒分散到液体介质中,制备成固-液混合型流体激光介质,使其既具有类似于固体激光材料优良的激光性能,同时宏观上又具备液体的可进行流动循环冷却的能力。课题组前期对  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  的纳米颗粒分散体系进行了研究和实验制备,经测试计算和分析显示,该体系由于纳米颗粒内部工作离子强烈的浓度荧光淬灭导致量子效率过低,无法实现激光输出<sup>[9]</sup>,目前新的纳米分散体系的研究和制备工作仍然在继续,而国际上尚未见作为常规增益介质的固体纳米颗粒分散体系实现激光输出的报道。与此同时,大尺寸(毫米量级)颗粒分散体系已经在试验中实现了激光输出。通过大量实验,发现该类介质中固-液界面上由于反射和折射造成的散射损耗是其特有的也是影响其激光性能的至关重要的因素。为

表 1 所用溶剂的主要参数

Table 1 Main parameters of the liquids

Environmental liquids	Absorptive loss		Refractive index	Density / (g/cm <sup>3</sup> )
	810 nm / cm <sup>-1</sup>	1053 nm / cm <sup>-1</sup>		
1,2-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	0.0069	0.0201	~1.53	2.18
1,1,2,2-C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Br <sub>4</sub>	0.0170	0.0166	~1.63	2.97

### 3 实验研究

#### 3.1 散射损耗随折射率以及温度变化的规律

图 1 为研究散射损耗变化的实验装置示意图。通过改变溶剂 1,2-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Br<sub>2</sub> 和 1,1,2,2-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Br<sub>4</sub> 的配比,可以得到具有不同折射率的液体介质,将钹玻璃微球分散到这些液体介质中,从而得到若干不同折射率匹配条件下的流体介质样本。

分别将这些样本置于如图 1 所示的测试光路中,通过测量探测脉冲光(波长为 1053 nm,单脉冲能量恒为 23.9  $\mu\text{J}$ )经过样本散射后透过小孔光阑 2

了研究该大尺寸颗粒体系实用化的可行性,本文对这种新型流体激光介质的散射损耗随折射率与温度的变化规律进行了研究,并对其在静态条件下的激光性能进行了测试与分析。

## 2 材料制备

新型固-液混合流体激光介质由中国科学院西安光学精密机械研究所提供。该流体激光材料是将固体激光材料颗粒分散到液体介质中,使其继承了固体材料的激光特性同时具备了宏观的可流动性。选取掺钹磷酸盐玻璃作为制备固体激光介质颗粒的材料,因为该材料作为一种成熟的固体激光介质材料已经在高能量固体激光器上得到了广泛的应用,它具有优良的激光性能,相对低廉易得,且具有各向同性的特点。根据介质的折射率和密度,液体介质选择溴代乙烷混合物。综合考虑固体颗粒在液体介质中的散射损耗和均匀的流动性,掺钹玻璃微球的直径选取为 2 mm。而液体介质作为固体颗粒流动的媒介,可使流体材料能够在螺杆泵的抽运下实现类似于液体激光器的流动循环。

液体介质满足两个要求:1)对抽运光(808 nm)和输出光(1053 nm)的吸收损耗小;2)固体颗粒与液体界面之间的散射损耗小。另外,较大的液体密度可更好地促进固体颗粒的流动。为了减少固-液界面的散射损耗,采取折射率匹配法,使液体介质的折射率与分散在其中的固体颗粒折射率相同。表 1 是所用溶剂的吸收损耗、折射率和密度参数。

的透过脉冲能量,可以获得流体激光介质在不同折射率匹配情况下的散射损耗变化规律。由于 1,2-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Br<sub>2</sub> 和 1,1,2,2-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Br<sub>4</sub> 混合液的温度-折射率系数约为  $dn/dT \approx 5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,从而可以间接得到温度变化对散射损耗影响的规律。

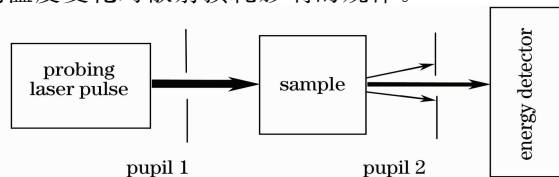


图 1 散射损耗测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the setup to test scattering loss

实验中累计对 8 个样本进行了测试,得到的透过光能量随液体介质折射率变化如图 2 所示。由图 2 可知,液体介质折射率的微小变化都将会导致透过光能量剧烈的起伏,即散射损耗会随着折射率失配而严重加剧。图 2 中的第 4 个样本是当折射率为 1.5381 时达到样本中最大的透过脉冲能量为  $20.53 \mu\text{J}$ ;而相邻的第 3 个和第 5 个样本,折射率分别为 1.5364 和 1.5398,其透过能量分别为  $11.58 \mu\text{J}$  和  $16.94 \mu\text{J}$ 。即在样品 3 和样品 4 之间折射率变化  $\Delta n_{34} = 0.0017$  条件下,第 4 个样本相对第 3 个样本透过能量增长了 77.3%,且在样品 4 和样品 5 之间折射率变化  $\Delta n_{45} = -0.0017$  条件下,第 5 个样本相对第 4 个样本透过能量减少了 17.5%。考虑到各个样品中的液体介质的温度-折射率系数  $dn/dT \approx 5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,可以推知:  $4^\circ\text{C}$  以内的温度变化即可导致以上的透过光能量变化。因此,流体激光介质的散射损耗对折射率以及温度的变化比较敏感。

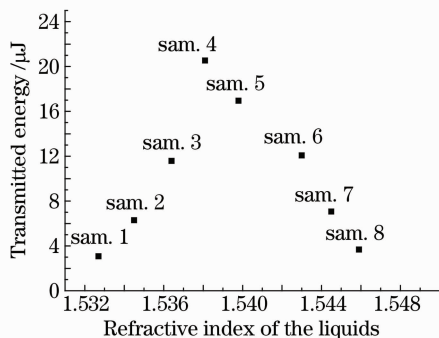


图 2 同一输入能量下不同液体折射率样本的透过脉冲能量

Fig. 2 Transmitted energy versus refractive index of the liquids in the samples at the same input

### 3.2 流体激光介质激光性能及散射损耗

为了研究流体激光介质的激光性能,搭建了行波放大器进行测试,如图 3 所示。分别选取流体激光材料和掺钕磷酸盐玻璃方形块材(与流体激光材料用固体颗粒材料成分相同)作为放大器中的激光

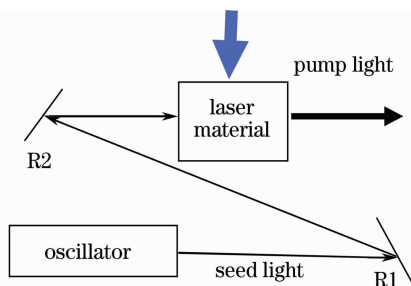


图 3 行波放大器平台示意图

Fig. 3 Scheme of traveling wave amplifier

增益介质。其中流体激光材料体积为  $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ ,其中沿着激光方向的增益长度为  $5 \text{ mm}$ ;而钕玻璃块材沿激光方向的增益长度为  $4 \text{ mm}$ 。

图 4 是由 CCD 在远场摄得的放大器光斑,包括光斑二维和三维的能量分布。比较图 4(a)和(d)发现,当固-液折射率匹配时,入射光完好地透过,不会发生明显的畸变;而比较图 4(a)和(c)会发现,当折射率匹配不良时,透射光产生畸变。图 4(c)和(d)中的液体介质折射率差小于  $2 \times 10^{-4}$ ,即此程度的光斑畸变会发生在小于  $2 \times 10^{-4}$  的折射率失配条件下,或约  $0.5^\circ\text{C}$  的温度变化条件下。比较图 4(a),(b)和(e),钕玻璃块材放大的光斑未对种子光产生明显的畸变,且对抽运光的散射较弱,而流体激光材料放大的光斑产生了轻微地畸变,且散射了较多的抽运光。这是由于在  $200 \mu\text{s}$  的抽运过程中,抽运光的热效应已经轻微地导致了折射率的失配,从而导致放大光斑的畸变以及流体材料对抽运光的散射。该效应可以通过缩短抽运时间和降低抽运能量提高抽运效率得到改善,与此同时,折射率的匹配是针对输出光波长  $1053 \text{ nm}$  实行的,从而在抽运光波长  $810 \text{ nm}$  处存在轻微的折射率失配,进而对抽运光发生了散射。

测试了 4 组在不同输入能量条件下放大器的增益性能,其中钕玻璃块材和流体激光材料作为增益介质各 2 组。实验数据如表 2 所示。

因为种子光能量很小且放大器的增益长度很短,所以,放大器的增益系数满足<sup>[10]</sup>

$$G = \exp[(\sigma\Delta n_0 - \delta)L], \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为受激辐射截面,  $\Delta n_0$  为反转粒子数密度,  $\delta$  为放大器的损耗,  $L$  为放大器的增益长度。由(1)式可知,  $G$  与入射脉冲的能量无关。定义  $G_{\text{Nd}}$  为钕玻璃块材的增益系数,  $G_{\text{F}}$  为流体介质的增益系数,由表 2 可得

$$\begin{cases} G_{\text{Nd}} = 1.385, \\ G_{\text{F}} = 1.266. \end{cases}$$

对钕玻璃块材作为增益介质的放大器,可以有

$$G_{\text{Nd}} = \exp[(\sigma\Delta n_0 - \delta)L_{\text{Nd}}], \quad (2)$$

式中  $L_{\text{Nd}}$  为钕玻璃块材在放大器中的增益长度。

由于实验中的流体激光介质为静态且其中的固体颗粒呈紧密堆积状态,固体间的液体介质很少且其本身的吸收较小,因而将流体激光材料等效为:额外的散射损耗作用在一块具有等效增益长度的钕玻璃块材上(忽略液体的吸收),得到

$$G_F = \exp[(\sigma\Delta n_0 - \delta - \delta_s)L_F], \quad (3)$$

式中  $\delta_s$  为流体激光介质相对钕玻璃块材额外的散射损耗,  $L_F$  是流体激光介质等效为钕玻璃块材的增益长度。

由(2),(3)式可得

$$\delta_s = \frac{1}{L_{Nd}} \ln G_{Nd} - \frac{1}{L_F} \ln G_F, \quad (4)$$

已知

$$L_{Nd} = 4 \text{ mm},$$

由于流体激光介质在样品池中占据了  $5 \text{ mm} \times$

$10 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$  的体积,且每个微球直径为  $2 \text{ mm}$ , 因此可得

$$L_F = \frac{NV_p}{S}, \quad (5)$$

式中  $N$  为微球的数量,  $V_p$  为每个微球的体积,  $S$  为流体介质所占据体积上垂直于激光方向的面积。由(5)式可以得到

$$L_F = 2.99 \text{ mm}.$$

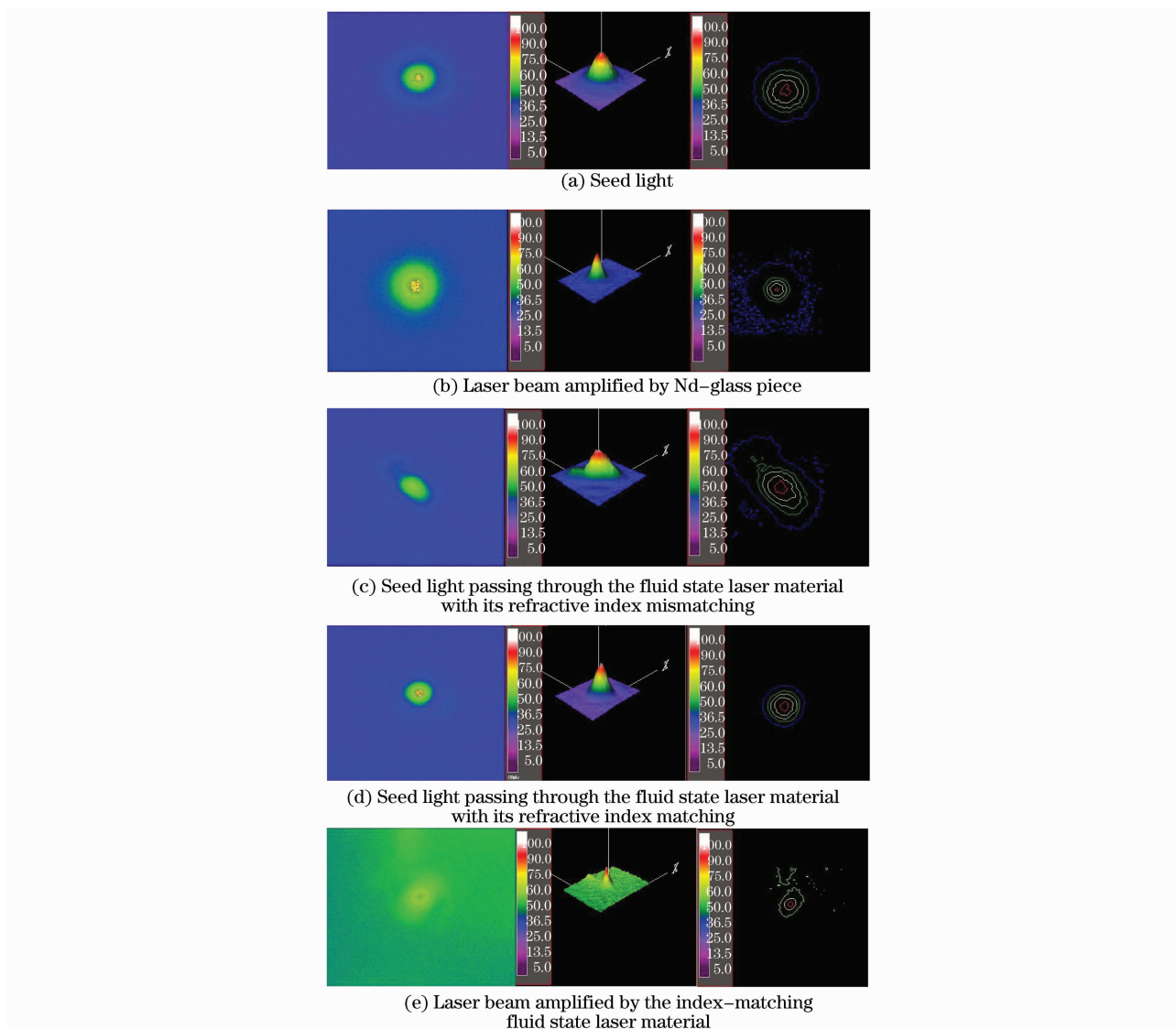


图 4 CCD 摄得的远场光斑

Fig. 4 Spots captured by CCD from far field

表 2 放大器的输入和输出能量

Table 2 Input and output powers of the amplifier

	Set 1 (Nd-glass piece)	Set 2 (Nd-glass piece)	Set 3 (Fluid state laser material)	Set 4 (Fluid state laser material)
Input / $\mu\text{J}$	16.12	24.96	28.84	45.12
Output / $\mu\text{J}$	22.50	34.27	36.60	56.94

将  $L_{Nd}=4\text{ mm}$  和  $L_F=2.99\text{ mm}$  代入(4)式,得到此时流体激光材料的散射损耗为

$$\delta_s = 0.0047\text{ cm}^{-1}.$$

考虑到液体介质对输出激光存在着轻微的吸收损耗,因此,实际流体激光介质的散射损耗小于  $0.0047\text{ cm}^{-1}$ 。

## 4 结 论

对静态条件下流体激光材料的散射损耗和温度折射率变化进行了一系列的测试分析,获得了该材料散射损耗变化的规律,实现了其作为激光增益介质在激光放大器上的运转。实验结果显示,在固-液相折射率匹配的条件下,流体激光材料作为增益介质对激光光束有较好的透过性,工作时的散射损耗可以控制在  $0.0047\text{ cm}^{-1}$  以下,可实现典型的激光增益。同时,实验也显示,固-液相的折射率匹配很容易受温度扰动等因素的干扰,有效的循环温控系统将是这种新型激光材料使用的关键。

目前,美国利弗莫尔实验室的液体激光实验已经实现了循环条件下对液体  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$  的温升控制,实现了较理想的激光输出<sup>[4]</sup>。这又为本文所述的流体激光介质实现流动循环下的运作提供了借鉴。在流动循环进行温控条件下,进一步研究流体激光材料作为激光增益介质的性能,探索其在大功率激光运用上的潜力,将是下一阶段的研究目标。

## 参 考 文 献

- 1 Isaac L. Bass, Regina E. Bonanno, Richard P. Hackel *et al.*. High-average-power dye laser at Lawrence Livermore National Laboratory[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(33): 6993~7005
- 2 Yuan Yongke, Xu Zheng, Li Mi *et al.*. Effects of flow field characteristics in liquid laser system on thermally induced distortion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1342~1345  
袁永轲, 许正, 李密等. 液体激光系统流场特性对热畸变的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1342~1345
- 3 Huang Ke. Thermal Management with Host Flow of High-Average-Power Inorganic Liquid Laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006  
黄珂. 高平均功率无机液体激光器的流动热管理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006
- 4 E. R. Ault. High average power laser using a transverse flowing liquid host [P]. United States Patent, 6600766, 2003
- 5 Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performancason compare of laser diode-pumped liquid laser between single gain host and double-gain host[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 722~725  
李密, 许正, 陈兴无等. 激光二极管抽运单/双增益模块的液体激光系统性能对比[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 722~725
- 6 Xu Zheng, Su Yi, Li Chunling *et al.*. Experimental study on diode pumping inorganic liquid laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12): 1941~1943  
许正, 苏毅, 李春领等. 二极管泵浦无机液体激光器出光实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(12): 1941~1943
- 7 H. A. JonesBey. Flowing neodymium offers improved heated management[J]. *Laser Focus World*, 2004, **15**(3): 18~20
- 8 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Progress of rare-earth-doped liquid laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(1): 45~50  
叶云霞, 范滇元. 掺稀土离子液体激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(1): 45~50
- 9 Rongbiao Yu, Kehan Yu, Wei Wei *et al.*. Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles modified with a silane coupling agent as a liquid laser medium[J]. *Advanced Materials*, 2007, **19**(6): 838~842
- 10 Lan Xinju. Laser Technology (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2004  
蓝信钜. 激光技术(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2004