

文章编号:1004-4213(2011)07-1122-5

# “绿色”液体激光介质的非线性光学特性研究

彭文炫<sup>1a</sup>, 冯国英<sup>1a</sup>, 张秋慧<sup>1a</sup>, 伍爱明<sup>1b</sup>, 柳焱<sup>1a</sup>, 李密<sup>2</sup>, 宋影松<sup>2</sup>

(1 四川大学 a. 电子信息学院; b. 化工学院 成都 610064)

(2 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:**利用氧化钕和盐酸为原料制得  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  (三氯二邻菲罗啉合钕), 测得其光谱特性并以稀土氧化钕、苯甲酸和邻菲罗啉为原料制得绿色液体激光介质钕离子的配合物—— $\text{NdB}_3\text{phen}$  (三苯甲酸—邻菲罗啉合钕). 利用飞秒激光器, 采用单光束 Z-扫描法研究了  $\text{NdB}_3\text{phen}$  的三阶非线性光学特性. 结果表明: 当入射飞秒激光脉冲波长为 400 nm, 峰值功率密度为  $2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ , 脉宽为 117 fs 时, 测得样品  $\text{NdB}_3\text{phen}$  的非线性折射率为  $-2.84 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{W}$ ;  $\text{NdB}_3\text{phen}$  在开孔条件下呈现反饱和吸收现象, 测出双光子吸收系数的值为  $9.11 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ . 实验结果表明,  $\text{NdB}_3\text{phen}$  的双光子吸收系数和非线性折射率随着光强的增强而增大.

**关键词:**三苯甲酸—邻菲罗啉合钕; Z 扫描; 非线性折射; 非线性吸收; 液体激光器

中图分类号: O4373

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114007.1122

## 0 引言

液体激光器高损伤阈值、低应力双折射的特点, 从而造就了它在高功率激光器的发展上呈现越来越明显的优越性<sup>[1]</sup>. 由于配置稀土无机液体激光材料的无机溶剂大部分毒性较大<sup>[2]</sup> (毒性很强的  $\text{SeOCl}_2$ 、次之的  $\text{POCl}_3$ , 及较小的溴化物 ( $\text{PBr}_3$ 、 $\text{BBr}_3$ 、 $\text{SbBr}_3$ 、 $\text{AlBr}_3$ ) 等), 腐蚀性较强, 很难实用, 而稀土有机液体激光介质具有无毒、低成本的特点, 能成为绿色环保的材料. 目前, 研制出具有优良光学性能的“绿色”(无毒/低毒) 环保材料是液体激光器发展的重要内容之一. 近年来, 人们发现, 稀土配合物的荧光具有较好的稳定性及单色性等优点, 陆续有学者开始研究其光学特性<sup>[3-6]</sup>. 由于非线性光学特性是物质的重要光学性质, 故研究“绿色”液体激光介质的非线性光学性质是极其必要的.

目前, 已知的研究样品非线性光学特性的方法有简并四波混频法、椭圆偏振法、非线性干涉法、自衍射法、光束畸变法和 Z 扫描技术等<sup>[7]</sup>. 其中 Z 扫描技术是 Sheik-Bahae 等人于 1989 年首先提出的一种方便有效的测量材料光学非线性吸收和折射的方法<sup>[8]</sup>, 它灵敏度较高, 实验设备构造简单, 数据处理简单方便, 并能同时确定材料的三阶非线性光学系数大小和符号, 从而成为人们常用的方法. 至今应

用比较多的是纳秒和皮秒 Z 扫描技术测量材料的光学非线性特性<sup>[3-6, 9-12]</sup>. 而今, 飞秒 Z 扫描技术以其光源稳定、超快响应速度及高重复频率等特点在测量材料的光学非线性方面引起重视并逐渐实现了其应用价值<sup>[9, 13-17]</sup>. 本文合成了新型钕离子配合物液体激光介质—— $\text{NdB}_3\text{phen}$  和  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$ , 测得它们的光谱特性, 并利用飞秒激光脉冲, 采用开孔、闭孔的 Z-扫描法测出在液体而非固态(前人的研究多在固态上对  $\text{Nd}^{3+}$  的非线性测试)下的钕离子配合物的  $\text{NdB}_3\text{phen}$  的非线性吸收系数和非线性折射率. 它在“绿色”液体激光器的发展方面有潜在的应用价值.

## 1 “绿色”液体激光介质制备流程及光谱特性

### 1.1 液体激光介质制备

样品  $\text{NdB}_3\text{phen}$  (三苯甲酸—邻菲罗啉合钕, B: 苯甲酸, phen: 1,10-phenanthroline) 的制备过程为:

1) 将  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  和苯甲酸加入到 5 mL DMF (二甲基甲酰胺) 中, 混合均匀后加热搅拌, 至原料完全溶解得澄清透明溶液.

2) 溶液冷却后, 沉淀析出, 过滤, 用无水乙醇洗涤后 90 °C 干燥 3 h. 所得固体溶于 DMF 中, 搅拌下滴入 phen 的 DMF 溶液, 90 °C 下搅拌 4 h.

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 项目 (No. 10976017, No. 60890200) 资助

第一作者: 彭文炫 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型激光技术. Email: xuan\_898@163.com

导师 (通讯作者): 冯国英 (1969—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为固体激光技术和光通信, 激光线性和非线性传输及其应用. Email: guoing\_feng@scu.edu.cn

收稿日期: 2011-01-10; 修回日期: 2011-04-21

4) 减压蒸馏除去大部份 DMF, 冷却, 过滤, 无水乙醇洗涤后 120 °C 干燥 12 h, 得  $\text{NdB}_3\text{phen}$ , 最后将所得粉末溶于氘代 DMSO 中.

样品  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  的制备法:  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  和 HCl 反应生成三氯化钕的溶液, 将其溶于适量无水乙醇中; 搅拌下慢慢滴入 phen 的无水乙醇溶液, 而后回流五个小时, 过滤洗涤所得沉淀, 80 °C 烘干 5 h; 最后将所得粉末溶于氘代 DMSO 中. 实验制得不同浓度的  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  溶液.

在样品制备过程中, 主要材料苯甲酸、phen、DMSO 和 DMF 都是无毒性、低毒性的物质, 最后制成的  $\text{NdB}_3\text{phen}$  和  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  比起用无机材料制得的稀土激光介质相对低毒, 即  $\text{NdB}_3\text{phen}$  和  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  为实验获得的绿色液体激光介质.

## 1.2 样品光谱特性

液体稀土样品  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  的透过谱和荧光光谱(808 nm 连续激光泵浦)如图 1. 在室温下, 用 EVOLUTION 300 型分光光度计测得透过率, 荧光光谱用 PI Acton sp2750 型光谱仪测得. 从图 1(a) 中, 可以看出液体样品在 525 nm、585 nm、738 nm 和 803 nm 附近出现强吸收峰; 在荧光测试实验中

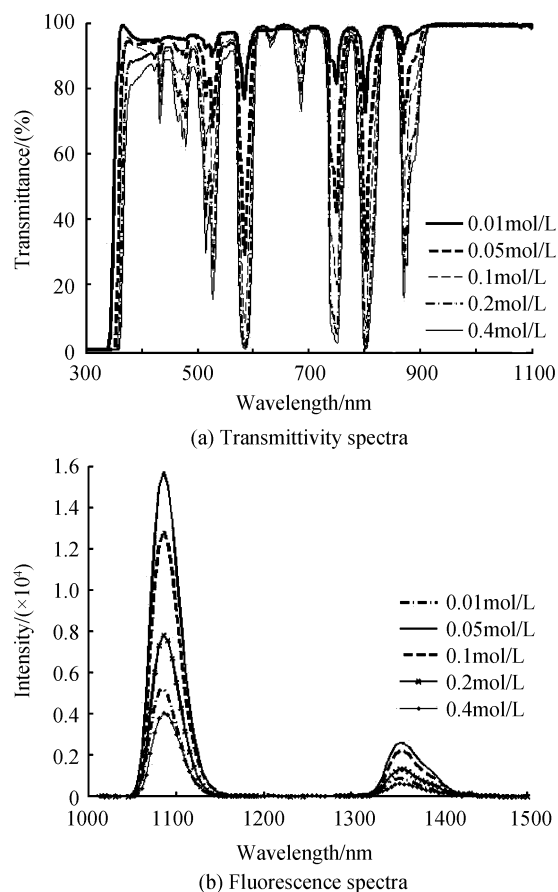


图 1 不同浓度的  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  的透过谱及荧光光谱  
Fig. 1 Transmittivity spectra and fluorescence spectra with different concentration of  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$

选择常规的 808 nm 激光泵浦, 实验测得的荧光光谱如图 1(b). 从图 1 可见, 样品在 1 060 nm 和 1 355 nm 附近出现荧光峰, 并且在 1 064 nm 附近出现的是较强的、稳定的荧光, 这主要是由于钕离子在  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ 、 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$  和  $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$  能级跃迁产生的. 随着样品浓度的增加, 样品的透过率随之减小即吸收增强. 这是因为当浓度低时, 样品中  $\text{Nd}^{3+}$  离子数少, 吸收较弱; 反之, 较强. 用 808 nm 激光泵浦样品, 当样品浓度为 0.05 mol/L 荧光最强; 浓度为 0.01 mol/L 时荧光较 0.4 mol/L 稍强. 对于  $\text{Nd}^{3+}$  离子的稀溶液, 产生能级跃迁的离子也较少, 荧光强度与样品的浓度成正比, 0.05 mol/L 的比 0.01 mol/L 的荧光强; 但当浓度较高, 荧光强度也会逐渐减弱, 其原因或是受激发后的激发态分子与体系中的其他分子所碰撞, 使其以非辐射跃迁的形式激化, 产生荧光猝灭; 或是激发态分子所发射的荧光被没受激发的分子所吸收, 使荧光减弱. 以上的实验分析为选择样品泵浦光提供了参考, 因而在 Z-扫描的实验中, 采用 800 nm 光的倍频光  $\lambda=400$  nm.

## 2 “绿色”液体激光介质非线性光学特性

### 2.1 实验装置

Z-扫描实验光路如图 2. 输出波长为 800 nm, 重复频率为 1 KHz, 脉宽为 117 fs 飞秒激光(振荡级 Mantis-5, 放大级 Legend Elite USP-EK-HE, 美国相干公司)脉冲经倍频晶体 D(KTP 晶体)倍频后得到 400 nm 波长的光, 400 nm 激光经分束镜分束后, 一束由能量计  $D_1$  探测, 作为标定入射光强的参考光. 另一束经透镜 L( $f=10$  cm)聚焦后, 照射在非线性介质 S(用壁厚小于 0.5 mm, 内宽为 1 mm 的自制的比色皿装入液体)上, 样品放置在移动台上, 在透镜的焦点附近沿光传输方向(Z 轴)前后移动, 通过样品的激光通过小孔 A 由能量计  $D_2$  探测, 记录得到的实验数据.

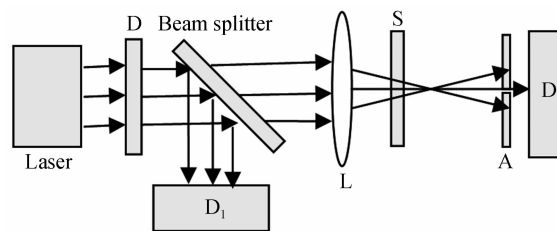


图 2 Z-扫描测量示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the Z-scan measurement

### 2.2 实验理论

在薄样品近似(样品厚度  $L$  足够小)和缓变振幅近似下, 激光经过样品的相位和场振幅由式(1)、

(2) 决定<sup>[18]</sup>

$$d\Delta\varphi/dz' = \Delta n(I)k \quad (1)$$

$$dI/dz' = -\alpha(I)I \quad (2)$$

式中,  $z'$  为光通过样品的传播距离, 波矢  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\Delta n(I) = \gamma I$ ,  $\alpha(I) = \alpha_0 + \beta I$ ,  $\gamma$  为非线性折射率 ( $\text{m}^2/\text{W}$ ),  $\alpha_0$ ,  $\beta$  分别为线性吸收系数和非线性吸收系数.

假设入射光为基模高斯光束, 其光强分布  $I(r, 0) = I_0 \exp(-2r^2/\omega^2)$ , 再由式(1)和(2), 解得因  $\Delta n$  产生的波面相位变化为

$$\Delta\varphi(z, r, t) = \Delta\varphi(z, t) \exp(-2r^2/\omega^2(z)) \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_0(z, t) = \Delta\varphi_0(t)/(1+z^2/z_0^2) \quad (4)$$

式中,  $\Delta\varphi_0(t) = k\gamma I_0(t)L_{\text{eff}}$  为波面在轴上焦点 ( $z=0$ ) 处的位相变化,  $I_0(t)$  为光轴上焦点处的瞬时光强,  $L_{\text{eff}}$  为样品的有效厚度,  $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha_0 L})/\alpha_0$ ,  $L$  为样品厚度 (1 mm).  $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$  为激光的瑞利长度,  $z$  为样品与焦点间的距离,  $\omega^2(z) = \omega_0^2[1 + (z/z_0)^2]$  为光束半径,  $\omega_0$  为束腰半径. 利用 Sheik-Bahae 等人的研究方法<sup>[18]</sup>, 闭孔 Z-扫描实验所得到的归一化透过率  $T(z)$  为通过小孔的光功率  $P_T$ /入射样品的瞬时光功率  $P_i$

$$T(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_T[\Delta\varphi_0(t)] dt / S}{\int_{-\infty}^{\infty} P_i(t) dt} \quad (5)$$

式中,  $P_T[\Delta\varphi_0(t)] = \int_0^{r_a} \int_0^{2\pi} I[\Delta\varphi_0(t)] 2\pi r dr d\theta$ ,  $I(z, r, t)$  是随着时间、位移变化的进入小孔的瞬时光强.  $P_i(t) = \pi\omega_0^2 I(t)/2$  为入射样品的瞬时光功率,  $S = 1 - \exp(-2r_a^2/\omega_a^2)$  为小孔的线性透过率 ( $S=0$  对应闭孔,  $S=1$  对应开孔),  $r_a$  为小孔半径,  $\omega_a$  为小孔处光束半径. 非线性折射率  $\Delta n$  可利用峰谷处两透过率的差值  $\Delta T_{p-v}$  求得. 当孔很小<sup>[18]</sup> 时  $S \approx 0$ ,  $\Delta T_{p-v} \approx 0.406 |\Delta\varphi_0|$ ; 而当孔较大时, 且有  $|\Delta\varphi_0| \leq \pi$ ,  $\Delta T_{p-v} \approx 0.406(1-S)^{0.25} |\Delta\varphi_0|$ . 那么得到  $\Delta n = |\Delta\varphi_0|/kL_{\text{eff}}$ .

而计算非线性吸收系数  $\beta$  时, 开孔 Z-扫描实验所得到的归一化透过率  $T(z)$  为<sup>[18]</sup>

$$T(z, S=1) = \sum_{m=0}^{\infty} [-q_0(z, 0)]^m / [(m+1)]^{3/2} \quad (6)$$

式中,  $q_0(z, t) = \beta I_0(t) L_{\text{eff}} / (1 + z^2/z_0^2)$ . 将  $q_0(z, t)$  带入式(6), 取一级近似求得  $\beta$  值.

### 2.3 NdB<sub>3</sub>phen 非线性吸收

实验采用图 2 实验装置, 当入射飞秒激光脉冲波长为 400 nm, 脉宽为 117 fs 时, 开孔 Z-扫描结果及拟合曲线如图 3. 从图中可以看出, 开孔的曲线开口向上, 这是激发态吸收而引起的反饱和和吸收现象, 在焦点处由于双光子吸收作用, 样品透过率出现极小值. 当入射激光脉冲重复频率为 1 KHz, 峰值功率密度  $I_a = 2.01 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$  时, 计算得到 NdB<sub>3</sub>phen 的双光子吸收系数为  $\beta = 6.30 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ ; 峰值功

率密度  $I_b = 2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$  时,  $\beta = 9.11 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ . 当光强增大时, 双光子吸收(反饱和和吸收)增强.

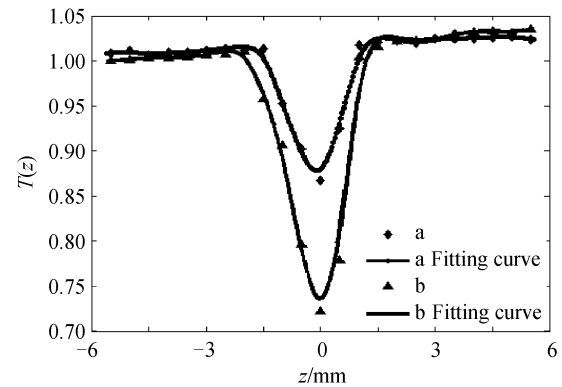


图 3 NdB<sub>3</sub>phen 开孔 Z-扫描归一化透过率曲线

Fig. 3 Normalized Z-scan transmittance with no aperture of NdB<sub>3</sub>phen

### 2.4 三阶非线性折射

同样的实验条件下, 在入射光波长为 400 nm, 脉宽为 117 fs 时, 闭孔 Z-扫描的结果如图 4 和 5. 从这两图中可以看出 NdB<sub>3</sub>phen 呈现自散焦效应, 同时也可以明显地看出其透过率峰被抑制, 而谷被增

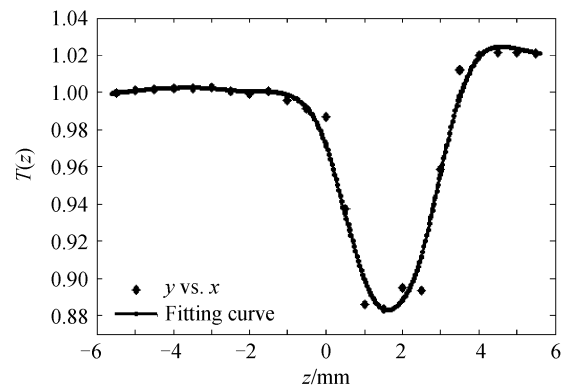


图 4 NdB<sub>3</sub>phen 闭孔 Z-扫描归一化透过率曲线

Fig. 4 Normalized Z-scan transmittance with closed aperture of NdB<sub>3</sub>phen

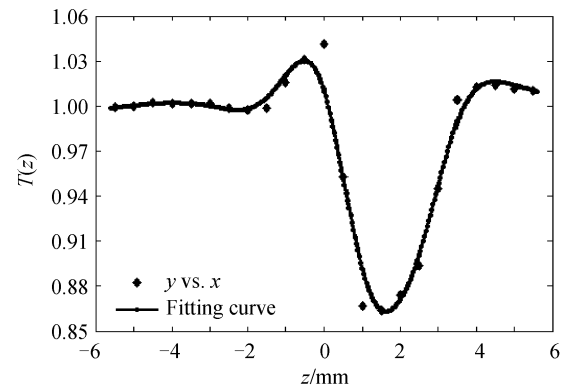


图 5 NdB<sub>3</sub>phen 闭孔 Z-扫描归一化透过率曲线 (入射激光  $\lambda = 400 \text{ nm}$ , 脉宽 117 fs, 峰值功率密度  $2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ )

Fig. 5 Normalized Z-scan transmittance with closed aperture of NdB<sub>3</sub>phen (using 117 fs pulses at  $\lambda = 400 \text{ nm}$  with  $I_b = 2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ )

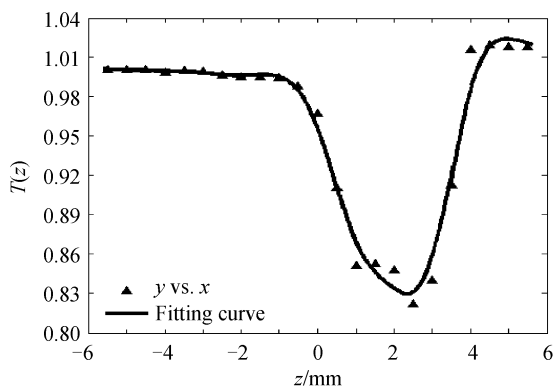


图6 图4和图3:分离后的非线性折射率透过率曲线  
Fig. 6 The result of division of the Z-scan of Fig. 4/ Fig. 3: normalized transmittance curve of nonlinear refractive index

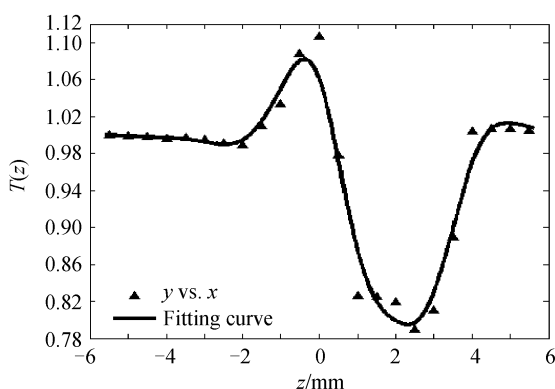


图7 图5和图3:分离后的非线性折射率透过率曲线  
Fig. 7 The result of division of the Z-scan of Fig. 5/ Fig. 3: Normalized transmittance curve of nonlinear refractive index

强.这是由于反饱和吸收减弱了非线性透过率,使曲线的峰被抑制.将图4的曲线除以图3中相应强度的曲线,分离出非线性折射率的透过率曲线,如图6;同样处理图5,得到图7.

由于介质的非线性光学性质将引起光束的会聚或发散,从而影响通过小孔辐射通量的变化.由图5和图7,可以明显地看出样品沿 $-z$ 方向移动时远场光轴处光强变大,沿 $+z$ 方向移动时远场光轴处光强变小,非线性折射率的贡献减小,可判断NdB<sub>3</sub>phen的非线性折射率为负值,即具有自散焦作用.当飞秒激光脉冲重复频率为1 kHz、峰值功率密度 $I_a = 2.01 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ 时拟合得到的非线性折射率为 $\gamma = -2.31 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ;峰值功率密度 $I_b = 2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ 时, $\gamma = -2.84 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ .这与有关文献[3](Nd<sup>3+</sup>)报道的非线性折射率值具有相同数量级.由计算结果看来,NdB<sub>3</sub>phen的非线性折射率大小随着光强的增强而增大.

非线性折射存在主要是由于电子云分布畸变、光克尔效应、电致伸缩效应和热效应等物理机制的作用.强光作用下介质内部的电子云分布畸变的过程,会导致介质极化强度的改变,此过程的响应时间

一般在 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ s}$ ,光克尔效应过程响应在 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ s}$ ,电致伸缩效应过程响应在 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$ ,热效应的过程响应 $10^{-3} \text{ s}$ [7].实验结果表明在飞秒脉冲下,NdB<sub>3</sub>phen既有非线性吸收,也会出现非线性折射,而非线性折射率主要来自超快光学过程的电子云畸变、光克尔效应.

### 3 结论

实验利用稀土氧化钕、苯甲酸和邻菲罗啉为主要原料制得新型的“绿色”(无毒/低毒)液体激光介质NdB<sub>3</sub>phen,以氧化钕和盐酸为原料制得Nd(phen)<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>,测出并研究它们的光谱特性,并采用单光束Z-扫描法研究了NdB<sub>3</sub>phen的非线性光学特性.当入射激光脉冲(117fs)峰值功率密度 $I = 2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ 时,得到其非线性折射率 $\gamma = -2.84 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ,此时电子云畸变和光克尔效应对样品的非线性折射率起主要作用;同时开孔Z-扫描结果显示NdB<sub>3</sub>phen出现反饱和和吸收现象,这减弱了其非线性透过率,使闭孔曲线的峰被抑制,这是因为分子的电子跃迁中出现了双光子吸收现象,双光子吸收系数为 $\beta = 9.11 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ .同时实验结果还表明,当增大光强, $I_a = 2.01 \times 10^{14} \text{ W/m}^2 \rightarrow I_b = 2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ ,NdB<sub>3</sub>phen的双光子吸收系数和非线性折射率随着光强的增强而增大.

#### 参考文献

- [1] YE Yun-xia, FAN Dian-yuan. 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.
- [2] BRINKSCHULTE H, FILL E, LANG R. Spectral output properties of the Nd [Single Bond] POCl inorganic liquid laser. [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, **43**(4): 1807-1811.
- [3] FU Jian, SUN Li, LIU Xiao-dong, et al. Nonlinear optical performance of Nd<sup>3+</sup>-doped borosilicate glass[J]. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2009, **11**(1): 51-54.  
付剑,孙丽,刘晓东,等. 掺Nd<sup>3+</sup>硼硅酸盐玻璃的非线性光学特性[J]. *大连民族学院学报*, 2009, **11**(1): 51-54.
- [4] SHAO Huan-wei, XIANG Mei, JIA Zhen-hong, et al. Study on optical nonlinearities in rare earth (RE) complex Eu (TTFA)<sub>3</sub>[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(2): 34-35.  
邵华伟,向梅,贾振红,等. 稀土配合物Eu(TTFA)<sub>3</sub>的非线性光学性质的研究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(2): 34-35.
- [5] SONG Zhao-yuan, LIU Xiao-dong, CHEN Yue-e, et al. Optical limiting property of Er<sup>3+</sup>-doped cadmium silicate glasses[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, **39**(1): 29-31.  
宋昭远,刘晓东,陈月娥,等. 掺Er<sup>3+</sup>的镉硅酸盐玻璃的光限幅特性[J]. *功能材料*, 2008, **39**(1): 29-31.
- [6] SUN Li, FU Jian, LIU Xiao-dong, et al. Nonlinear optical performance of Ho<sup>3+</sup>-doped borosilicate glass[J]. *Journal of*

- The Chinese Rare Earth Society*, 2009, **27**(1): 51- 56.
- 孙丽,付剑,刘晓东,等. 掺  $\text{Ho}^{3+}$  的硼硅酸盐玻璃的非线性光学特性[J]. 中国稀土学报, 2009, **27**(1): 51- 56.
- [7] 钱世雄,王恭明. 非线性光学-原理与进展[M]. 上海:复旦大学出版社, 2001: 121, 126- 131.
- [8] SHEIK-BAHAE M, SAID A, Van STRYLAND E. High-sensitivity, single-beam  $n_2$  measurements [J]. *Optics Letters*, 1989, **14**(17): 955- 957.
- [9] ZHAO Yong-gui, SONG Ying-lin, YANG Jun-yi. Optical nonlinearity of toluene studied with variable pulsewidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1732- 1734.
- 赵永贵,宋瑛林,杨俊义. 不同激光脉冲宽度下甲苯的光学非线性特性的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1732- 1734.
- [10] LIU Z, WANG Y, ZHANG X, *et al.* Nonlinear optical properties of graphene oxide in nanosecond and picosecond regimes[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(2): 1902- 1902-3.
- [11] YELLESWARAPU C, KOTHAPALLI S. Nonlinear photoacoustics for measuring the nonlinear optical absorption coefficient[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9020- 9025.
- [12] MA L, ZHANG Y, WANG N, *et al.* Nonlinear optical properties of polyaniline composite materials [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(10): 599- 600.
- [13] HAN Ya-ping, CHEN Bing-cai, YE Hong-an, *et al.* Study on the optical nonlinearity of material using femtosecond Z-scan technique [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2007, **24**(2): 219- 222.
- 韩亚萍,陈炳才,叶红安,等. 飞秒 Z 扫描技术测量材料光学非线性的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007, **24**(2): 219- 222.
- [14] COURIS S, RENARD M, FAUCHER O, *et al.* An experimental investigation of the nonlinear refractive index ( $n_2$ ) of carbon disulfide and toluene by spectral shearing interferometry and z-scan techniques[J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, **369**(3-4): 318- 324.
- [15] SEO J, YANG Q, CREEKMORE S, *et al.* Large pure refractive nonlinearity of nanostructure silica aerogel [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(25): 4444- 4446.
- [16] RATIVA D, De ARAUJO R, GOMES A, *et al.* Hartmann-Shack wavefront sensing for nonlinear materials characterization[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 22047- 22053.
- [17] MARKOWICZ P, SAMOC M, CERNE J, *et al.* Modified Z-scan techniques for investigations of nonlinear chiroptical effects[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(21): 5209- 5214.
- [18] SHEIK-BAHAE M, SAID A, WEI T, *et al.* Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, **26**(4): 760- 769.

## Nonlinear Optical Properties of the “Green” Liquid Laser Medium

PENG Wen-xuan<sup>1a</sup>, FENG Guo-ying<sup>1a</sup>, ZHANG Qiu-hui<sup>1a</sup>, WU Ai-ming<sup>1b</sup>,  
LIU Kui<sup>1a</sup>, LI Mi<sup>2</sup>, SONG Ying-song<sup>2</sup>

(1a. College of Electronic Information; b. College of Chemical Engineering, Sichuan University,  
Chengdu 610064, China)

(2 Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** Using  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  and HCl as raw materials,  $\text{Nd}(\text{phen})_2\text{Cl}_3$  was obtained and its spectral characteristics were measured. With  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , benzoic acid and o-phenanthroline as the raw material, green liquid laser medium  $\text{Nd}^{3+}$  ions complexes— $\text{NdB}_3\text{phen}$  (tribenzoic acid-phenanthroline co-Nd) was prepared. The third-order non-linear optical properties of  $\text{NdB}_3\text{phen}$  were studied using femtosecond laser and signal-beam Z-scan method. When the incident femtosecond laser pulse wavelength is 400 nm, the peak power density is  $2.94 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$ , and pulse width is 117 fs, the measured nonlinear refractive-index coefficient of the sample is  $-2.84 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ . Under the opening aperture configuration,  $\text{NdB}_3\text{phen}$  presents phenomenon of the reverse saturated absorption, and the measured two-photon absorption coefficient is estimated to be  $9.11 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ . The experimental results show that two-photon absorption coefficient and nonlinear refractive-index coefficient of  $\text{NdB}_3\text{phen}$  refractive index become more intense.

**Key words:** Tribenzoic acid-phenanthroline co-Nd; Z-scan; Nonlinear refraction; Nonlinear absorption; Liquid laser