

文章编号: 0253-2239(2010)07-2060-05

$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃的三阶非线性研究

章健良^{1,2} 聂秋华¹ 戴世勋¹ 徐铁峰¹ 陈飞飞¹ 沈祥¹ 王训四¹

(¹ 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; ² 中国人民解放军 91428 部队, 浙江 宁波 315211)

摘要 采用传统熔融淬冷法制备了 4 组高 Bi_2O_3 含量的 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃样品。测试了样品的密度、折射率和透过光谱,并分析了它们和 Ga_2O_3 含量之间的关系,拟合了样品的线性折射率随波长的变化曲线。根据 Z 扫描实验原理,利用钛宝石飞秒激光器测量了 800 nm 波长下各个样品的三阶非线性折射率 n_2 以及非线性吸收系数 β 。结果表明:随着 Ga_2O_3 含量的增加,样品的线性折射率 n_0 和三阶非线性折射率 n_2 也随之增加,线性折射率最大样品对应的 n_2 和 β 分别为 $3.331 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 和 0.695 cm/GW ,表明该系列玻璃样品是一种优良的三阶非线性光学基质材料。

关键词 光学材料;铋酸盐玻璃;三阶非线性;Z 扫描

中图分类号 TQ171 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2060

Third-Order Nonlinearity Investigation in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Glasses

Zhang Jianliang^{1,2} Nie Qiuhua¹ Dai Shixun¹ Xu Tiefeng¹ Chen Feifei¹
Shen Xiang¹ Wang Xunsi¹

(¹ College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211 China)
(² Units No. 91428, The Chinese People's Liberation Army, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract A series of glasses with high Bi_2O_3 content of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ternary system were chosen and prepared by the conventional melt quenching methods. The densities, linear refractive indexes n_0 and transmittance spectra of samples, and their relation with Ga_2O_3 content were measured. The third-order nonlinear-index coefficient n_2 and the nonlinear absorption coefficient β of glasses were investigated at 800 nm by Z-scan technique using Ti:sapphire femto-second laser pulses. The conclusions were as follows: The values of n_0 and n_2 in glasses increase with increasing the Ga_2O_3 content. The values of n_2 and β at 800 nm in the sample which had the largest refractive index in all samples are equal to $3.331 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ and 0.695 cm/GW , respectively. All the results show that these glasses are potential materials in the application to third-order nonlinear optical field.

Key words optical materials; bismuth glasses; third-order nonlinearity; Z-scan

1 引言

近年来,三阶非线性光学玻璃由于具有高的透明性、容易制备、良好的化学稳定性和热稳定性、较高的三阶非线性光学系数以及快的响应时间等一系列优点,在全光开关、全光波长转换器和高速光时分复用等方面显示出广阔的应用前景,日益受到国内外研究者的重视^[1,2]。其中,均质玻璃是一种研究

比较多的三阶非线性光学玻璃材料,其产生三阶非线性光学性质的主要原因是构成玻璃的原子或离子的电子极化^[3],响应时间可达到飞秒量级。要获得大的三阶非线性极化率,玻璃中必须含有大量电子极化率大的离子或是本身具有高的折射率。因此含有大量电子极化率大的 PbO , Bi_2O_3 , TeO_2 等重金属离子的高折射率玻璃成为三阶非线性光学材料的

收稿日期: 2009-09-09; 收到修改稿日期: 2009-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(60677015),浙江省科技厅面上重点科技攻关项目(2007C21122),宁波市自然科学基金(2006A610020)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

作者简介: 章健良(1984—),男,硕士研究生,主要从事非线性玻璃材料方面的研究。E-mail: zjlyzyy99@163.com

导师简介: 聂秋华(1954—),男,教授,主要从事光纤新技术材料方面的研究。E-mail: nieqiuhua@nbu.edu.cn

主要研究对象^[4]。铋硼玻璃是近年来新出现的一种新型光学玻璃材料,具有较高的机械强度和化学稳定性(与硫系玻璃、碲酸盐玻璃相比),以及较高的三阶非线性折射率系数。如果在铋硼玻璃基质中引入高极化率的离子或者重金属离子则可进一步增加玻璃的折射率从而提高三阶非线性性能^[5]。Gomes 等^[6]在铋硼玻璃系统中加入极化率较大的 Zn^{3+} ,从而大大提高了玻璃的三阶非线性折射率 n_2 。 Ga^{3+} 离子作为一种重金属离子有着较强的极化率以及较大的原子量,因此可以预见 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃也应当具有较为理想的三阶非线性光学性能。

本文采用传统熔融法制备了 4 组高 Bi_2O_3 含量的 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃样品,列出了 3 种阳离子 (Bi^{3+} , B^{3+} , Ga^{3+}) 的物理参数,并分析了它们在玻璃系统中的作用。拟合了样品的线性折射率随波长的变化曲线,研究了不同 Ga_2O_3 含量的引入对玻璃样品的线性折射率 n_0 、三阶非线性折射率 n_2 以及非线性吸收系数 β 的影响。

2 实 验

将摩尔分数比为 $Y(\text{Bi}_2\text{O}_3):Y(\text{B}_2\text{O}_3):Y(\text{Ga}_2\text{O}_3)=0.65:(0.35-x):x$ (其中 $x=0,0.05,0.10,0.15$) 的系列玻璃样品,依次命名为 BBG1, BBG2, BBG3, BBG4。按给出的配方精确称取原料 10 g,经充分搅拌后,倒入 30 mL 的刚玉坩埚中,置于 1100 °C 硅碳棒熔炉中熔化 30 min,然后将熔融态的液体倒入预热的石墨模具中,成型后移入退火炉中退火,在 360 °C 附近保温 2 h 后,以 15 °C/h 的速度降至室温。将退火后的玻璃样品研磨抛光,加工成 $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 两面抛光的样品,用于光学测试。

玻璃密度采用排水失重法测量。玻璃折射率采用韩国 SAIRON 公司 SPA-Lite 型棱镜耦合仪测量,折射率精度为 0.001,折射率分辨率为 ± 0.0005 。玻璃的透过率采用 Perkin-Elmer-Lambda 950UV/VIS/NIR 型分光光度计测量,测量范围为 400~2500 nm。所有测试均在室温下进行。

玻璃样品的三阶非线性折射率 n_2 以及非线性吸收系数 β 采用 Z 扫描法测量,图 1 为 Z 扫描实验装置图。采用的激发光为美国 Coherent 公司 Mira 900-D 型钛宝石飞秒激光器(抽运源为 10 W 的 532 nm $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 激光器),脉冲宽度为 200 fs,重复频率为 76 MHz,波长调谐范围为 700~1010 nm,功率不稳定性 $\leq \pm 3\%$ 。抽运光经过一个宽带半透半反透镜(其反射率和透射率分别为 45%

和 55%)分成两束光,反射光束由探测器 1 探测,用于对入射功率的实时取样以便监测激光功率的稳定性,透射光束经过一个双凸透镜(焦距 $f=150\text{ mm}$)聚焦并照射到玻璃样品上,样品置于步进电机控制的一维光学平台上,探测器 2 放置于远场小孔光阑(光阑小孔直径 $\phi=1.5\text{ mm}$)后,检测当样品在焦点附近沿光束传播 Z 方向移动时通过小孔后的光功率变化。探测器 1 和 2 都与 Coherent 公司 EM2000 型双通道功率计连接,所测得的数据通过计算机,经过程序处理后直接得出透射能量随样品位置 Z 坐标变化的曲线。实验选择了 800 nm 波长激光下对样品进行了 Z 扫描测试。

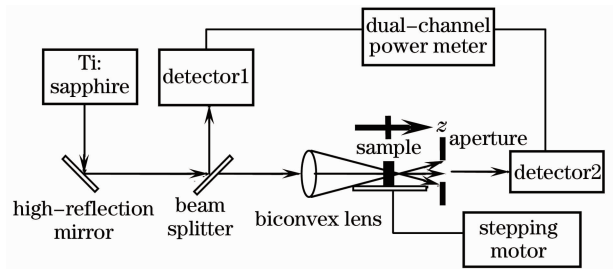


图 1 Z-扫描实验装置

Fig. 1 Experimental setup for the Z-scan measurements

3 结果与讨论

3.1 阳离子的作用及物理参数

$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 三元玻璃系统中 3 种阳离子 (Bi^{3+} , B^{3+} , Ga^{3+}) 的物理参数^[7,8]列于表 1,其中 Bi_2O_3 和 B_2O_3 在玻璃中以网络形成体的形式出现, Ga_2O_3 在玻璃网络中充当网络修饰体的角色。 Bi^{3+} 和 Ga^{3+} 都是重金属离子,有着较大的原子量和极化率,能赋予玻璃更高的折射率和密度,能够有效地改变玻璃的黏度以及光学非线性等物理性质。

表 1 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃系统中阳离子的物理参数
Table 1 Physical parameters of cations in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ glass system

Cation symbol	Relative atomic mass	Cation radius /nm	Cation refractivity R_i	Cation polarizability $\alpha/(10^3/\text{nm}^3)$
Bi^{3+}	208.980	0.120	3.800	1.508
B^{3+}	10.811	0.020	0.006	0.002
Ga^{3+}	69.723	0.062	0.600	0.195

3.2 密度、折射率和透过谱

样品的透射率曲线如图 2 所示,从图中可以发现该系列玻璃样品在可见光至近红外波段具有良好的透过性能。玻璃折射率与玻璃中离子的极化率有关。表 2 列出了样品的密度及线性折射率。

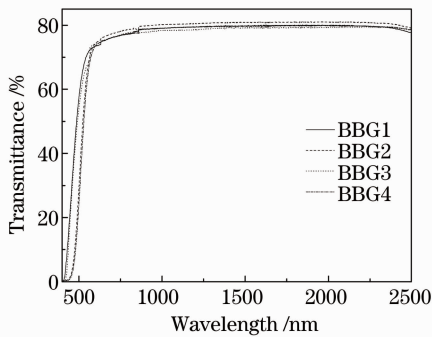


图2 样品的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curve of samples

从表中可以得到:随着 Ga_2O_3 含量的增加,样品的线性折射率 n_0 呈现上升趋势。其根本原因是随着 Ga_2O_3 含量的增加,原来的 B^{3+} 逐渐被 Ga^{3+} 所取代, Ga^{3+} 是重金属离子,有着比 B^{3+} 更高的离子极化率, Ga^{3+} 的引入使得玻璃中离子极化程度的总和增大,导致了玻璃折射率的提高。因此,随着 Ga_2O_3 含量的增加,样品的密度和线性折射率 n_0 也随之增加。图3为样品的线性折射率随波长变化的拟合曲线,从图中可以发现样品的线性折射率随波长的增加而减小。其拟合公式为^[9]

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2, \quad (1)$$

式中 A, B, C, D 为初始参量,其值分别为 3.2141, 0.0456, 0.0349 和 0.0235。

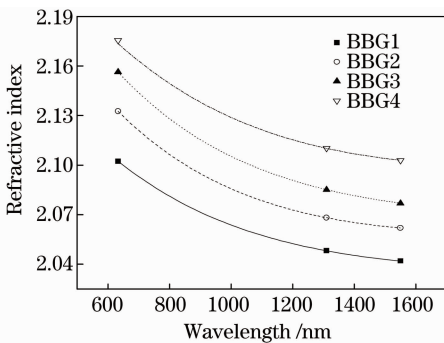


图3 样品折射率随波长的变化曲线

Fig. 3 Wavelength dependence of refractive index in samples

根据米勒经验公式^[10]

$$\chi^{(3)} = \left(\frac{n_0^2 - 1}{4\pi} \right)^4 \times 10^{-10}, \quad (2)$$

可以推断出,随着玻璃样品的线性折射率 n_0 的增加,其三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 也随之增大,而三阶非线性折射率 $n_2 = \text{Re} \chi^{(3)}$,所以 n_2 值会随着 n_0 的增大而增大,由此可以预见随着 Ga^{3+} 的引入,玻璃样品的三阶非线性折射率有增加的趋势。

3.3 三阶非线性研究

在计算材料的非线性折射率时,由于非线性吸收的影响,闭孔 Z 扫描透射特征曲线通常有一个被抑制的峰(或谷)和一个被增强的谷(或峰)。如果材料的非线性吸收相对于它的非线性折射率达到一定的比例,闭孔 Z 扫描特征曲线的峰(或谷)将消失,成为一条相对于透镜焦点不对称的曲线。为了从闭孔 Z 扫描特征曲线中分离出纯非线性折射率的贡献,获得非线性折射率系数 γ 或非线性折射率引起的相移 $\Delta\Phi$,进行了闭孔和开孔两种情况下的 Z 扫描测试。由于非线性吸收的影响,测得的非线性折射率系数会存在一定误差,为了消除这种误差,根据 Sheik-Bahae 等^[11,12] 给出的“逐点相除法”将闭孔 Z 扫描的透射实验数据逐点除以开孔 Z 扫描的透射实验数据,所得结果用(3)式进行拟合计算:

$$T = 1 + \frac{4x}{(x^2 + 9)(x^2 + 1)} \Delta\Phi_0, \quad (3)$$

式中 $x = z/z_0$ 为样品离开焦平面的相对位置, z 为样品离开焦平面的实际距离, z_0 为高斯光束的共焦参数, $\Delta\Phi_0$ 为非线性折射引起的相移。若 $|\Delta\Phi_0| \leq \pi$, 则有

$$|\Delta\Phi_0| \approx \frac{\Delta T_{p-v}}{0.406(1-S)^{0.25}}, \quad (4)$$

式中 ΔT_{p-v} 为 Z 扫描曲线中波峰和波谷的归一化透射率之差, S 为光阑小孔的线性透射率, $S = 1 - \exp(-2r_a^2/\omega_a^2)$, r_a 为小孔半径, ω_a 为小孔处光斑半径。根据 Z 扫描原理, n_2 值可由以下公式推导:

$$n_2 = \frac{cn_0}{40\pi} \cdot \gamma, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\lambda \Delta T_{p-v}}{0.812\pi(1-S)^{0.25} I_0 L_{\text{eff}}}. \quad (6)$$

式中 c 为真空中的光速, n_0 为线性折射率, λ 为入射激光波长, I_0 为焦点处光强 ($I_0 = 1.15 \text{ GW/cm}^2$), L_{eff} 为样品的有效长度, $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$, L 为样品厚度, α 为样品线性吸收系数。

开孔测量时,其归一化光强透射率 T 可表示为^[13]

$$T(z, S = 1) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[-q_0(z)]^m}{(m+1)^{3/2}}, \quad (7)$$

式中 $q_0(0) < 1$, $q_0(z) = \beta I_0 L_{\text{eff}} / (1 + z^2/z_0^2)$, $z_0 = \pi\omega_0/\lambda$, 当 β 较小时,由上式的一级近似即可得到^[14]

$$\beta = 2^{3/2} [1 - T(z = 0, s = 1)] / I_0 L_{\text{eff}}. \quad (8)$$

实验数据用以下等式拟合^[15]

$$T = 1 - \frac{\beta I_0 L_{\text{eff}}}{2^{3/2}(1+x^2)}. \quad (9)$$

图 4(a)、(b)分别为样品 BBG4 在闭孔和开孔情况下测得的 Z 扫描特征曲线。根据上述公式计算得样品 BBG4 的 $n_2 = 3.331 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, $\beta = 0.695 \text{ cm/GW}$,

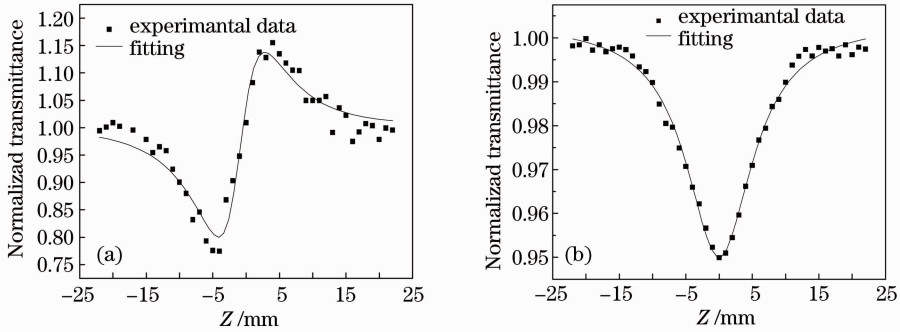


图 4 样品 BBG4 的归一化 Z 扫描曲线。(a)闭孔;(b)开孔

Fig. 4 Normalized Z -scan transmittance curves of BBG4. (a) dosed-aperture; (b) open-aperture

表 2 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃的相关参数

Table 2 Relative parameters of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ glass

Sample	$d /$ (g/cm^3)	n_0 (632.8 nm)	$n_2 /$ ($10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$)	$\beta /$ (cm/GW)	F
BBG1	7.145	2.1024	1.614	0.523	0.386
BBG2	7.228	2.1326	2.219	0.573	0.484
BBG3	7.301	2.1563	2.638	0.629	0.564
BBG4	7.347	2.1755	3.331	0.695	0.599

从表中可以看出随着 Ga_2O_3 含量的增加,样品的 n_2 和 β 也随之增加。其中 n_2 的增加主要是由 Ga_2O_3 含量的增加导致样品折射率的提高而引起的, Ga^{3+} 是重金属离子,有着比 B^{3+} 更高的离子极化率以及离子半径,被极化的机率很高,这种离子与 O^{2-} 形成的配位多面体可以导致较大的三阶光学非线性。为确定热效应对实验结果的影响,在光强 $I_0 = 1.35 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 下测试了 BBG4 样品在 800 nm 波长处的三阶非线性折射率 n_2 , 其值为 $3.319 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, 和光强 $I_0 = 1.15 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 下测得的 n_2 值无明显差异。据 Hasegawa 等^[17] 报道如果测试中有强烈的热致非线性效应,那么得到的 Z 扫描曲线就会存在显著的非对称,而从图 4(a)中可以发现样品的 Z 扫描曲线没有明显的非对称,说明实验中的热致非线性效应不明显。综合以上几点,可以认为实验得到的非线性系数基本不受热效应影响,其结果在实验误差范围之内。此外,为了确定样品的非线性系数和测量波长之间的关系,分别在 850, 900, 950 和 1000 nm 波长下测试了样品 BBG4 的 n_2 和 β , 它们的值列于表 3。从表中可以发现,随着激光波长的增加,样品的双光子吸收逐渐减小,其减小的幅度远大于折射率减小的幅度,当测量波长调到

远高于 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ ^[6], $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ^[16] 等三元铋硼玻璃在 800 nm 下的 n_2 值。同理可算得其余玻璃样品的 n_2 和 β , 它们的值列于表 2。

1000 nm 时,非线性吸收曲线趋于平坦(如图 5 所示),非线性吸收很小,此时非线性折射率 $n_2 = 2.143 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。因此可以认定在 1000 nm 波长及以上波段,样品的非线性折射率基本不受非线性吸收的影响。

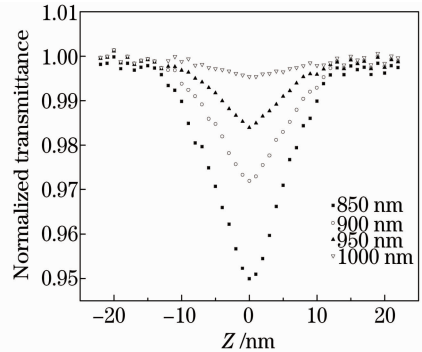


图 5 样品 BBG4 在不同波长下的开孔 Z 扫描

Fig. 5 Open-aperture Z -scan of BBG4 at different wavelengths

表 3 样品 BBG4 在不同波长下的非线性系数

Table 3 Nonlinear coefficients of BBG4 at different wavelengths

Sample	$\lambda /$ (nm)	$n_2 /$ ($10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$)	$\beta /$ (cm/GW)	F
BBG4	850	2.658	0.457	0.684
	900	2.437	0.315	0.860
	950	2.329	0.176	1.393
	1000	2.143	—	—

3.4 品质因素 F

品质因素 F 是确定非线性材料可用于光开关的重要参数^[15], 其表达式为

$$F = \frac{n_2}{\beta \lambda}, \quad (10)$$

玻璃样品的品质因素 F 如表 2 所示, 在 800 nm 波长下 4 个样品的 F 值都比较小 ($F < 1$), 其结果不尽如人意。从吸收光谱 (如图 6 所示) 得到造成 F 值较小的原因: 4 个样品的吸收边波长 λ_{off} 在 450 nm 附近, 因此在 800 nm 波长下双光子吸收 (2PA) 引起的非线性吸收会比较明显, 从而造成较大非线性吸收系数 β 值 (如表 2 所示)。

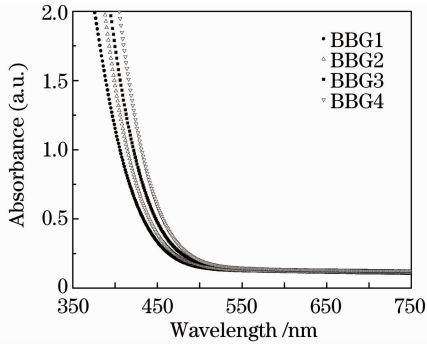


图 6 玻璃样品的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra of the glass samples

但是根据 Harbold 等^[18]的报道, 随着激光波长的增加, 样品的双光子吸收逐渐减小, 其减小的幅度远大于波长增加以及折射率减小的幅度, 使得品质因素 F 增大。利用 (10) 式计算了样品 BBG4 在 850, 900 和 950 nm 波长下的 F 值 (列于表 3), 从表中可以发现随着激光波长的增加, F 值逐渐增大, 这和 Harbold 等的报道相符。因此在实际光通信波长 1300 nm 及以上波段, $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 系统玻璃的品质因素 F 将会进一步得到改善, 其在三阶非线性光学领域也将体现出一定的应用价值。

4 结 论

通过对 4 组高 Bi_2O_3 含量的 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 玻璃样品分析得到, 随着 Ga_2O_3 含量的增加, 样品的线性折射率也随之增加。根据 Z 扫描原理, 研究了 4 组玻璃样品在钛宝石飞秒激光器作用下的三阶非线性光学特性。结果表明, 样品在 800 nm 处的三阶非线性折射率 n_2 随着 Ga_2O_3 含量的增加而增加, 其根本原因是 Ga_2O_3 含量的增加导致样品折射率的提高, 且 Ga^{3+} 是重金属离子, 有着比 B^{3+} 更高的离子极化率以及离子半径, 被极化的概率很高, 这种离子与 O^{2-} 形成的配位多面体可以导致较大的三阶光学非线性, 其中线性折射率最大样品 BBG4 对应的 n_2 和 β 分别为 $3.331 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 和 $0.695 \text{ cm}/\text{GW}$, 表明该系列玻璃样品在三阶非线性光学领域有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- Zhu Fudong, Qiu Fengxian, Yang Dongya *et al.*. Synthesis and third-order nonlinear optical property of poly (urethane-imide) [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 527~529
- Wang Yanling, Dai Shixun, Xu Tiefeng *et al.*. Thermal characteristics and optical band gap properties of $\text{TeO}_2\text{-TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1751~1756
王艳玲, 戴世勋, 徐铁峰 等. $\text{TeO}_2\text{-TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 系统玻璃的热学特性及光学带隙研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1751~1756
- Feng Duan, Shi Changxu, Liu Zhiguo. An Introduction to Material Science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 397~407
冯 端, 师昌绪, 刘治国. 材料科学导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 397~407
- Gu Shaoxuan, Zhao Xiujian, Hu Jun. Research progress of glass as a nonlinear optical material[J]. *Science and Technology of Overseas Building Materials*, 2001, **22**(4): 7~10
顾少轩, 赵修建, 胡 军. 非线性光学玻璃材料的研究进展[J]. *国外建材科技*, 2001, **22**(4): 7~10
- Chen Feifei, Dai Shixun, Shen Xiang *et al.*. Refractive index and band gap of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ glasses [J]. *J. Chin. Ceramic Society*, 2008, **36**(4): 515~519
陈飞飞, 戴世勋, 沈 祥. $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ 系玻璃的光学折射率与带隙[J]. *硅酸盐学报*, 2008, **36**(4): 515~519
- Gomes A. S. L. Falcão E. L. Filho, Araújo Cid B. de. Third-order nonlinear optical properties of bismuth-borate glasses measured by conventional and thermally managed eclipse Z scan [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(3): 033115
- Lu Anxian. New Functional Glass Materials[M]. Changsha: Central South University Press, 2005. 165~174
卢安贤. 新型功能玻璃材料[M]. 长安: 中南大学出版社, 2005. 165~174
- V. Dimitrov, S. Sakka. Electronic oxide polarizability and optical basicity of simple oxides [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(3): 1736~1740
- I. Oprea, H. Hesse, K. Betzler. Optical properties of bismuth borate glasses[J]. *Opt. Mater.*, 2004, (26): 235~237
- N. Sugimoto, H. Kanbara, S. Fujiwara *et al.*. Third-order optical nonlinearities and their ultrafast response in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(11): 1904~1908
- M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. H. Wei *et al.*. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(4): 760~769
- Q. Wan, T. H. Wang, C. L. Lin. Third-order optical nonlinearity and negative photoconductivity of Ge nanocrystals in Al_2O_3 dielectric[J]. *Nanotechnology*, 2003, **14**: L15~L17
- C. Gayathri, A. Ramalingam. Single-beam Z -scan measurement of the third-order optical nonlinearities of azo dyes [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2007, **68**(3): 578~582
- Zhong Huazhou, Tadanori Hasfimoto, Hiroyuki Nasu *et al.*. Two-photon absorption and nonlinear refraction of lanthanum sulfide-gallium sulfide glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(5): 2380~2384
- J. T. Gopinath, M. Soljacić, Erich P. Ippen. Third order nonlinearities in Ge-As-Se-based glasses for telecommunications applications[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(11): 6931~6933
- T. X. Lin, Q. Yang, J. H. Si *et al.*. Ultrafast nonlinear optical properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ oxide glass[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(1): 230~233
- T. Hasegawa, T. Nagashima, N. Sugimoto. Z -scan study of third-order optical nonlinearities in bismuth-based glasses [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(4-6): 411~415
- J. M. Harbold, F. Ö Ilday, F. W. Wise *et al.*. Highly nonlinear Ge-As-Se and Ge-As-S-Se glasses for all-optical switching[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2): 822~825