

掺铈锂硅酸盐玻璃的光谱及离子交换特性分析

吴青晴 许峰* 张桂菊 张翔 袁孝 邹快盛

(苏州大学现代光学技术研究所江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 采用高温二次化料的方法制备一种多梯度折射率芯光纤所用掺铈锂硅酸盐玻璃, 测量了玻璃样品的吸收光谱、荧光光谱和荧光寿命, 利用 McCumber 理论计算了该玻璃系统中铈离子的 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2I_{7/2}$ 能级跃迁受激发射截面。研究表明锂硅酸盐玻璃中 Yb^{3+} 在 1006 nm 处的 σ_{emi} 为 $0.38 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 荧光有效线宽为 82.4 nm, 荧光寿命为 1.31 ms。在 530 °C 高温硝酸钠熔盐中, 对玻璃 $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换到达中心轴前后制作的梯度折射率透镜的成像和折射率分布特性进行了研究。光谱分析和离子交换实验结果表明, 该玻璃是制作梯度折射率光纤的理想材料, 可用于多梯度折射率芯光纤的制作, 是大模场光纤的候选材料。

关键词 材料; 多渐变折射率芯光纤; 铈离子; 锂硅酸盐玻璃; $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换; 光谱性质

中图分类号 TN244 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0916004

Spectrum and Ion-Exchange Properties of Ytterbium-Doped Lithium Silicate Glass

Wu Qingqing Xu Feng Zhang Guiju Zhang Xiang Yuan Xiao Zou Kuaiheng

(Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province,

Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract An Yb^{3+} -doped lithium silicate glass for multi-graded-index-core fiber is prepared by a two-step melting process. Absorption, emission spectra and fluorescence-lifetime of the samples are measured, and the stimulated emission cross-section σ_{emi} of $\text{Yb}^{3+} : {}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2I_{7/2}$ transition in samples is calculated by McCumber theory. It is found that σ_{emi} of Yb^{3+} ions in lithium silicate glass at 1006 nm is $0.38 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, and its fluorescence effective line-width is about 82.4 nm, its fluorescence lifetime is 1.31 ms. The $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange properties of Yb^{3+} doped lithium silicate glasses are investigated in molten sodium nitrate at 530 °C. Imaging properties and radial refractive index profile of gradient index lens made by ytterbium-doped lithium silicate glass before and after central-axis of Yb^{3+} -doped lithium silicate glass rod $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ -ion-exchanged is studied. Spectral analysis and ion-exchange experimental results show that the glass is an ideal material for production of gradient index laser optical fiber. It can be used for multiple gradient index core fiber. A combination of good lasing and ion-exchange properties enables a new approach to large-mode-area fiber laser.

Key words materials; multi-graded-index core fiber; ytterbium ions; lithium silicate glass; $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ ion-exchange; spectroscopic properties

OCIS codes 160.2290; 160.3380; 160.2750; 140.3615; 140.3510

1 引言

光纤激光器具有结构紧凑、寿命长、重量轻、散热特性良好、光光转换效率高(大于 70%)和光束质

量接近衍射极限(M^2 接近于 1.0)等优势, 在高精度激光加工、汽车制造及新型国防器件和系统等方面正在逐步取代传统的激光器。目前光纤激光连续输

收稿日期: 2012-03-16; 收到修改稿日期: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(91023009, 61108024)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176021, 11076021, 10876011)、江苏省高校自然科学基金项目(10KJA140045, 09KJB140008)和江苏省高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 吴青晴(1977 年—), 女, 工程师, 主要从事信息工程方面的研究。E-mail: wuqq@suda.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xf750617@suda.edu.cn

输出功率可达 10 kW 量级,脉冲输出峰值功率可达数吉瓦量级^[1]。影响光纤激光器高功率输出的主要因素有:抽运光的耦合效率、转换效率、光纤的非线性效应和光纤的热管理能力等,通常采用多模包层抽运技术、增大光纤芯径、提高稀土离子掺杂浓度、降低光纤损耗、提高光纤材料破坏阈值等手段来提高光纤激光器的输出能力^[1~3]。为增大光纤芯径,大模场光纤得到广泛研究具体包括:双包层阶跃折射率光纤^[4]、双包层光子晶体光纤^[5]、负折射率差增益反引导型光纤^[6]、泄漏通道光纤^[7]、螺旋光纤^[8]和多芯光纤^[9]等。

多芯光纤作为增大光纤芯径的有效方法目前正成为光纤激光器的研究热点之一^[10,11]。多芯光纤在较大的内包层中有多个完全相同的单模掺杂纤芯,每个纤芯的直径、掺杂浓度等均相同,纤芯间的距离很近,由于振荡激光倏势波的耦合,使得各纤芯受激发射的激光相互作用,获得同相位的激光输出。多芯光纤相比单芯光纤增加了有效模场面积,可使得光纤输出功率密度降低,这对进一步提升大功率光纤激光器的输出功率非常有效。

本文提出一种可用于多芯光纤的渐变折射率多组分玻璃激光材料,该材料具有良好的离子交换特性,使得光纤的折射率沿着径向呈梯度分布。与阶跃折射率结构光纤不同,这种渐变折射率特性使得光纤无需包层即可实现光的传输,因而可直接用于多芯结构,易于构建大模场结构。此外,多组分玻璃材料具备石英玻璃无法比拟的物理化学性质,如玻璃组分可调、软化温度低、预制棒制作的重复性好及稀土离子掺杂浓度高(可以根据需要任意掺杂)等^[12]。可以预见,该种渐变折射率多组分玻璃激光材料将是 大模场光纤激光器的又一候选材料。重点研究了该材料的吸收光谱和荧光光谱特性,并对其

激光性能进行了评估,并采用在高温熔盐中进行离子交换的方法研究了其离子交换特性。

2 实 验

2.1 玻璃样品和细玻璃棒的准备

掺镱锂硅酸盐玻璃试样的氧化物组成(摩尔分数)如表 1 所示。精确称量相当于 1.6 kg 玻璃样品的原料,所有原料的纯度均为 99.99%。为了避免发生初始分解、熔融反应的原材料对铂金坩埚产生损伤,引起铂金属粒子对掺镱碱金属硅酸盐玻璃的污染,进而影响镱离子 Yb^{3+} 在碱金属硅酸盐玻璃中的发光特性,拟采用二次化料的方式进行掺镱碱金属硅酸盐玻璃的制备。二次化料过程为:1)使原材料在研钵中细细研磨,使其充分均匀混和,在 1290 °C 左右将原料逐次加入到由硅碳棒加热的石英坩埚中,使混合料熔化成玻璃态;2)在 1350 °C 将玻璃态掺镱碱金属硅酸盐玻璃熟料浇入规格为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 铂坩埚中,按照特定的工艺采用铂金叶浆搅拌以进行玻璃的澄清和均化,澄清温度为 1420 °C,熔制时间为 6.5 h。在 1250 °C 左右将高温熔体浇铸到 400 °C 的铜模具中,后转入退火炉中,在 480 °C 附近保温 6 h,最后以 5 °C/h 的降温速度冷却到室温。选择无气泡、无条纹的玻璃,切割、研磨、加工成 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times (2,7) \text{ mm}$ 的片状和 $\Phi 20 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 棒状样品,其中片状样品的两大表面抛光,平行度为 $1'$,光洁度为 III 级,其余表面细磨,用于吸收光谱和荧光光谱的测试;把 $\Phi 20 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 棒状样品放在拉丝机上拉制成 $\Phi 1.88 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 规格的细玻璃棒,然后在 530 °C 的硝酸钠熔盐中进行离子交换。

表 1 掺镱锂硅酸盐激光玻璃的摩尔分数配方

Table 1 Yb^{3+} -doped lithium silicate laser glass composition of mole fraction

| Composition | SiO_2 | B_2O_3 | Al_2O_3 | MgO | ZnO | CaO | BaO | Li_2O | Na_2O | ZrO_2 | Yb_2O_3 |
|--------------|----------------|------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| Content /mol | 60.00 | 4.00 | 6.00 | 3.00 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 10.00 | 6.50 | 1.00 | 0.50 |

2.2 吸收光谱及折射率测试

透射率的测量选用美国 Perkin-Elmer 公司的 Lambda950 紫外-可见光-近红外分光光度计。分别测量 $d_1 = 2 \text{ mm}$ 和 $d_2 = 7 \text{ mm}$ 厚度下玻璃的透射率 $T_1(\lambda)$ 和 $T_2(\lambda)$,进而计算出厚度为 $d = 5 \text{ mm}$ 时玻璃的内透射率

$$\tau(\lambda) = [T_1(\lambda)/T_2(\lambda)]^{d/(d_1-d_2)}. \quad (1)$$

热膨胀测量采用 NETZSCH DIL-402EP 型热

膨胀仪,加热速度 5 K/min。以波长为 974 nm 的连续半导体激光器为激发光源来激发样品,采用北京卓立汉光公司的 Omini- $\lambda 300$ 型荧光光谱仪测量样品光谱,差热分析的测量采用德国耐驰的 STA 409PC 综合热分析仪,加热速率为 10 K/min。

采用 WYV-V 棱镜折光仪(上海精密科学仪器有限公司生产,折射率测量精度为 $\pm 5 \times 10^{-5}$)测定试样在不同波长处(706.5、656.3、589.3、546.1、

486.1、435.8 nm)的折射率 $n(\lambda)$ 。然后根据 Cauchy 色散公式模拟计算其他波长的折射率。掺

镱锂硅酸盐玻璃的物理参数如表 2 所示。

表 2 掺镱锂硅酸盐玻璃物理参数表

Table 2 Physical properties of Yb³⁺-doped lithium silicate glass

| Density / (g/cm ³) | Yb ³⁺ ions concentration /cm ⁻³ | T _g /°C | T _i /°C | Expansion coefficient (1/K) | Refractive index $n(\lambda)$ | | | | | |
|-----------------------------------|---|--------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | 435.8 nm | 486.1 nm | 546.1 nm | 589.3 nm | 656.3 nm | 706.5 nm |
| 3.14 | 2.66×10^{20} | 458.6 | 500.7 | 6.25×10^{-6} | 1.618 | 1.611 | 1.605 | 1.602 | 1.599 | 1.596 |

2.3 荧光光谱测量

荧光光谱测量采用法国 JobinYvon 公司的 Triax320 型光谱仪,抽运源为美国 Coherent 公司带光纤输出的半导体激光器,输出功率为 400 mW,工作中心波长为 974 nm;测量荧光寿命时将抽运源调为脉冲激光输出,脉冲宽度为 4 μs,脉冲周期为 20 ms;探测器为 InGaAs 型,响应范围为 800~1650 nm。荧光信号经单色仪、探测器传递到示波器上,荧光寿命衰减曲线由美国 Tektronix 公司的 TDS3012B 示波器采集记录,最后用指数函数进行拟合,得到荧光寿命。

3 实验结果与分析

3.1 光谱性质

3.1.1 McCumber 理论

Yb³⁺ 的 $^2I_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ 能级跃迁的吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ 为

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{1}{Nl} \ln \frac{1}{\tau(\lambda)}, \quad (2)$$

式中 N 为 Yb³⁺ 的浓度, l 为样品厚度, $\tau(\lambda)$ 为样品的内透射率。根据 McCumber 理论, Yb³⁺ 的发射截面 $\sigma_{\text{emi}}(\lambda)$ 与其吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ 存在可逆关系^[13]

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \exp\left[\left(E - \frac{hc}{\lambda}\right) / kT\right], \quad (3)$$

式中 E 表示零线能量,即为 $^2I_{7/2}$ 上能级和 $^2F_{5/2}$ 下能级之间的能量差; h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k 为波尔兹曼常数, T 为温度, $\sigma_{\text{emi}}(\lambda)$ 与能级自发辐射跃迁几率 A 的关系为

$$A = 8\pi c n^2 \int \frac{\sigma_{\text{emi}}(\lambda) d\lambda}{\lambda^4}, \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得

$$E = kT \ln \left[\frac{A}{8\pi c n^2 \int \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda)}{\lambda^4} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) d\lambda} \right]. \quad (5)$$

根据 Judd-Ofelt 理论, $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ 与能级自发辐射跃迁几率 A 有关系:

$$A = \frac{8\pi c n^2 (2J' + 1)}{\lambda_p^4 (2J + 1)} \int \sigma_{\text{abs}}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

利用(6)式,根据吸收光谱可以求出 A ,把它代入(5)式中可得 E 。从而能级 $^2F_{5/2} \rightarrow ^2I_{7/2}$ 跃迁的发射截面能通过(3)式得到。

3.1.2 吸收光谱

根据测量的掺镱锂硅酸盐玻璃的透射率谱计算的吸收截面和(3)式计算的受激发射截面如图 1 所示,虚线为模拟计算掺镱锂硅酸盐玻璃的折射率随波长变化曲线。根据(4)式和(5)式计算的掺镱锂硅酸盐玻璃的 $A(^2F_{5/2} \rightarrow ^2I_{7/2})$ 、 τ_s 和 E 值分别为 754.8 s^{-1} 、 1.31 ms 和 10290.8 cm^{-1} 。

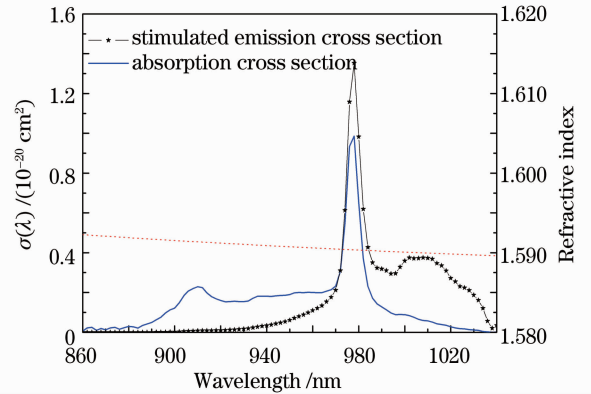


图 1 室温下掺镱锂硅酸盐玻璃的吸收截面和受激发射截面
Fig. 1 Absorption and stimulated emission cross-sections of Yb³⁺ in lithium silicate glasses at the room temperature

从图 1 中可以看出,掺镱锂硅酸盐玻璃在 860~1040 nm 吸收区间内存在 2 个吸收峰,吸收主峰为 978 nm,对应吸收截面为 $9.87 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$;吸收次峰为 910 nm,对应吸收截面为 $0.23 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。受激发射截面次峰位置为 1006 nm,对应发射截面为 $0.38 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

3.1.3 自发辐射寿命和荧光有效线宽

掺镱锂硅酸盐玻璃在 974 nm 激光抽运下的荧光曲线和荧光寿命衰减曲线如图 2 所示,峰值位置和谱宽与图 1 中理论计算的受激发射截面曲线相同,荧光有效线宽为

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = \int \frac{I(\lambda) d\lambda}{I_{\text{max}}}, \quad (7)$$

式中 $I(\lambda)$ 表示波长 λ 处的受激辐射荧光强度, I_{\max} 为受激辐射荧光强度最大值。计算得荧光有效线宽

为 82.4 nm。指数拟合[图 2(b)]计算得到的荧光寿命为 1.31 ms。

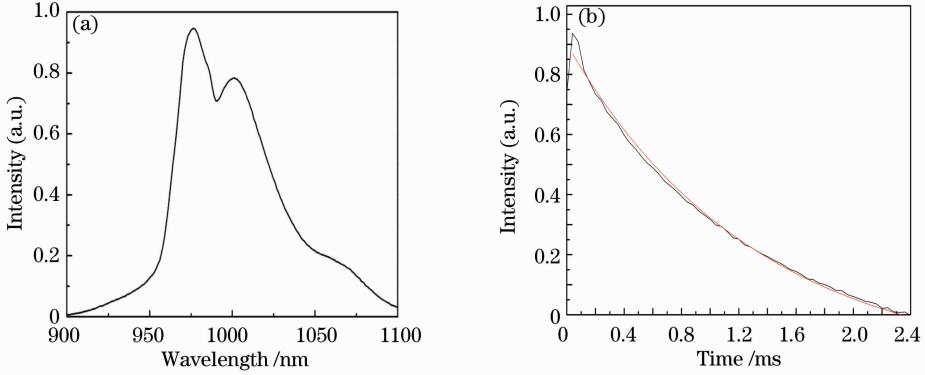


图 2 室温下 974 nm 抽运光作用下掺镱锂硅酸盐玻璃的(a)荧光发射谱和(b)荧光寿命曲线

Fig. 2 (a) Emission spectrum and (b) luminescence decay curve of lithium silicate glasses pumping at 974 nm under room temperature

3.2 激光性能评价

评价稀土离子激光性能的参数包括^[14]: 吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)$ 、发射截面 $\sigma_{\text{emi}}(\lambda_{\text{ext}})$ 、上能级荧光寿命 τ_f (实测)、克服阈值功率所需最小抽运强度 I_{\min} 。 I_{\min} 表示实现基态耗尽模式激光运行的难易, 和获得零增益所需的激发态最小离子数 β_{\min} 及饱和抽运强度 I_{sat} 有关。就激光性能而言, I_{\min} 越小越好, 计算公式为

$$I_{\min} = \beta_{\min} I_{\text{sat}}, \quad (8)$$

$$\beta_{\min} = \frac{\sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ext}})}{\sigma_{\text{emi}}(\lambda_{\text{ext}}) + \sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ext}})}, \quad (9)$$

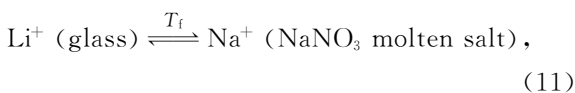
$$I_{\text{sat}} = \frac{hc}{\lambda_p \tau_f \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)}, \quad (10)$$

式中 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)$ 为吸收峰值波长的吸收截面 ($\lambda_p = 978 \text{ nm}$), $\sigma_{\text{emi}}(\lambda_{\text{ext}})$ 和 $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_{\text{ext}})$ 分别为荧光峰值波长的发射和吸收截面 ($\lambda_{\text{ext}} = 1006 \text{ nm}$)。对于掺镱锂硅酸盐玻璃, β_{\min} 为 0.157, I_{sat} 为 $1.571 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 经计算 I_{\min} 为 2.47 kW/cm^2 , 小于实现激光运转可接收的功率值 4.5 kW/cm^2 ^[15]。鉴于其荧光寿命较长, 荧光有效线宽较宽, 可用于高功率光纤激光材料。

3.3 离子交换特性分析

3.3.1 离子交换实验

离子交换实验按照梯度折射率透镜的制备工艺进行。把 $\Phi 1.88 \sim 1.89 \text{ mm}$ 掺镱锂硅酸盐细玻璃棒放入硝酸钠熔盐系统中进行离子交换, 由于玻璃中 Li^+ 离子的浓度远高于硝酸钠熔盐, 玻璃中的 Na^+ 离子的浓度远低于硝酸钠熔盐, 玻璃和硝酸钠熔盐将发生 $\text{Li}^+ - \text{Na}^+$ 离子的扩散交换, 离子交换过程为



离子交换的温度根据热膨胀系数测定获得的软化温度确定, 实验时略高于软化温度, 原因为: 1) 低于软化温度时, 玻璃中阳离子迁移困难, 离子交换过程难以发生; 2) 高于软化温度时, 玻璃易发生软化变形, 不利于后续工艺。在一定温度下, 离子交换到达细玻璃棒中心的时间为

$$t = \frac{D}{r^2}, \quad (12)$$

式中 D 为扩散系数, r 为细玻璃棒直径。实验测量 $\Phi 1.0 \text{ mm}$ 的离子交换时间, 通过(12)式计算扩散系数, 进而得出 $\Phi 1.88 \text{ mm}$ 细玻璃棒的离子交换时间。

离子交换是否到达中心的检测主要通过测量离子交换后的掺镱锂硅酸盐细玻璃棒制成的自聚焦透镜的成像效果来确定。通过选取 1/4 节距的掺镱锂硅酸盐玻璃自聚焦透镜对方格板进行成像实验, 此时自聚焦透镜前方的方格板成像在自聚焦透镜后端面, 通过显微镜观测可获得其成像效果。离子交换所需的时间由离子交换温度决定, 在丝径相同的情况下, 熔盐温度越低, 所需交换的时间越长, 然而交换时间过长, 会影响细玻璃棒表面的化学稳定性。提高温度有利于离子交换速度的提高, 但温度过高容易发生丝的表面被腐蚀及弯曲现象, 不能用于实验的二次拉丝; 考虑到实验的可行性, 最终确定离子交换工艺熔盐温度为 $530 \text{ }^\circ\text{C}$, 交换完成时间是 17 h。图 3 为 $\Phi 1.88 \text{ mm}$ 细玻璃棒在温度为 $530 \text{ }^\circ\text{C}$ 下不同交换时间的成像效果。由图可见离子交换扩散是从玻璃纤维的边缘开始, 逐渐向中心扩散, 成像效果由浅入深, 说明掺镱硅酸盐玻璃具有较佳的离子交换性能。

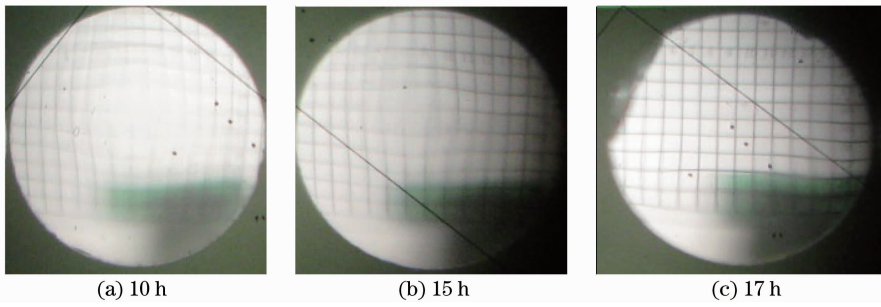


图3 不同离子交换时间的成像特点

Fig. 3 Imaging characteristics with different ion-exchange times

3.3.2 折射率分布测试

离子交换后的掺镱锂硅酸盐细玻璃棒径向折射率分布测量采用干涉法,如图4所示,由激光器(He-Ne激光器,工作波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$)发出的激光经过光学平晶 BS_1 后,分成两束,后经过平晶 BS_2 后又合为一束,经过透镜 L_3 将光线会聚到电荷耦合器件(CCD)上,CCD把光学影像转换为数字信号传递到计算机,可以观察到样品的干涉图形。由于其中一束光经过样品(掺镱锂硅酸盐细玻璃棒横截面切片,厚度 $d=0.5\text{ mm}$),产生了一个与样品厚度及折射率分布有关的光程差,从而产生了干涉现象,相邻干涉环之间的折射率差为 λ/d ,若样品上某两

点间干涉环数目为 N ,则这两点之间的折射率差 Δn 为 $N\lambda/d$ 。在离子交换程度不足时,玻璃样品中心轴处的折射率即为原始玻璃的折射率 n_{glass} ,若此时干涉环数为 M ,则细玻璃棒边缘 a 处的折射率为

$$n(a) = n_{\text{glass}} - M \frac{\lambda}{d}. \quad (13)$$

由离子交换理论可知,在离子交换过程中,细玻璃棒边缘处的折射率 $n(a)$ 是近似不变的,这样就能从离子交换后的干涉图形上来确定细玻璃棒中心轴处的折射率 n_0 ,即

$$n_0 = n(a) + N \frac{\lambda}{d}. \quad (14)$$

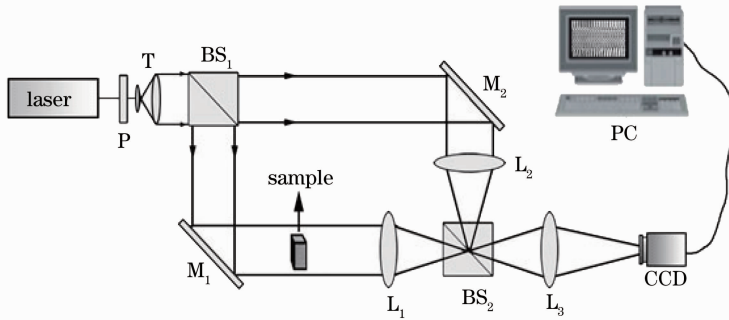


图4 干涉法测量自聚焦透镜折射率分布的光路图

Fig. 4 Light path diagram of measuring refractive index profile of a gradient index lens by the optical interferometric method

通过对离子交换15 h(未交换到中心)和17 h(交换到中心)的样品进行干涉法测试,获得的干涉图如图5(a)和(b)所示,利用Matlab模拟,获得的离子交换后的掺镱锂硅酸盐细玻璃棒径向折射率分布结果如图5(c)和(d)所示,在离子交换实验过程中,交换时间不足和交换到中心时,样品折射率分布均呈抛物线形状。从图5(c)中也可清楚的看出,离子交换15 h的样品抛物线顶部趋于平缓,离子未交换到中心,而图5(d)图中抛物线的形状符合理论设计,说明已交换到中心。

对掺镱锂硅酸盐细玻璃棒制作的梯度折射率透

镜成像效果和径向折射率分布测试及分析可知,该材料具有良好的离子交换特性,使得光纤的折射率沿着径向呈梯度分布,该掺镱锂硅酸盐玻璃适合用于拉制梯度折射率光纤。

4 结 论

采用高温二次化料的方法制备了一种掺镱锂硅酸盐玻璃,测量了该玻璃样品的吸收光谱、荧光光谱和荧光寿命,计算分析了该玻璃系统中 Yb^{3+} 的 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2I_{7/2}$ 能级跃迁受激发射截面,该玻璃在1006 nm处的 σ_{emi} 为 $0.38 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$,荧光有效线宽

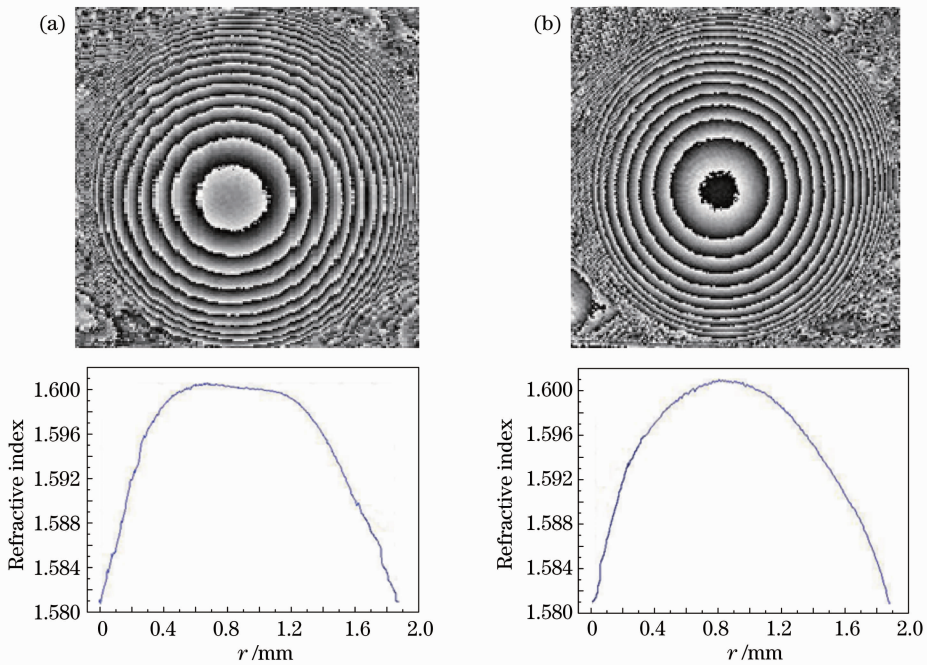


图 5 掺镱锂硅酸盐玻璃棒透镜的离子交换到达中心(a)前(b)后的干涉条纹图和相应的折射率分布图

Fig. 5 Interference fringe pattern and the corresponding the refractive index profile (a) before and (b) after central-axis of Yb^{3+} -doped lithium silicate glass rod lens ion-exchanged

为 82.4 nm, 荧光寿命为 1.31 ms, 激光评价结果表明该玻璃是一种理想的激光材料。在 530 °C 高温硝酸钠熔盐中, 对 Li^+ - Na^+ 离子交换后制作的自聚焦透镜成像效果和径向折射率分布特性进行了研究, 实验证明该玻璃有良好的离子交换特性, 因此该掺镱锂硅酸盐玻璃适合用于梯度折射率光纤的制作。通过对掺镱锂硅酸盐玻璃的光谱分析和离子交换实验结果表明, 该玻璃是制作梯度折射率激光光纤的理想材料, 可用于多梯度折射率芯光纤的制作, 是大模场光纤的候选材料。

参 考 文 献

- 1 A. Tunnermann, J. Limpert. Prospects and challenges in high power fiber laser technology [C]. Optical Society of America, 2011, SOMA; SOMA1
- 2 J. Broeng, G. Vienne, A. Petersson *et al.*. Air-clad photonic crystal fibers for high-power single-mode lasers [C]. Photonics West 2004, California, 2004, 192~201
- 3 P. H. Kim, J. Broeng, P. M. W. Skovgaard *et al.*. High-power photonic crystal fiber lasers; design, handling and subassemblies [C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 273~283
- 4 Jens Limpert, Fabian Röser, Sandro Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 5 K. P. Hansen, C. B. Olausson, J. Broeng *et al.*. Airclad fiber laser technology [C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687307
- 6 Min Lu, Weinan Li, Kuaisheng Zou *et al.*. Yb^{3+} -doped 200 μm diameter core, gain guided index-antiguidded fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(2-3): 301~304

- 7 L. Dong, H. A. McKay, L. Fu *et al.*. Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 8962~8969
- 8 C. Liu, G. Chang, N. Litchinitser *et al.*. Effectively single-mode chirally-coupled core fiber [C]. In *Advanced Solid-State Photonics*, Vancouver, Canada, 2007, ME2
- 9 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1812~1816
- 周 朴, 侯 静, 陈子伦 等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1812~1816
- 10 M. Matsumoto, T. Kobayashi, A. Shirakawa *et al.*. All-fiber phase-locked multi-core photonic crystal fiber laser [C]. in *Advanced Solid-State Photonics*, 2011, AMC3
- 11 John M. Fini. Large-mode-area multicore fibers in the single-moded regime [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 4042~4046
- 12 T. M. Monro, Y. D. West, D. W. Hewak *et al.*. Chalcogenide hole fibres [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24): 1998~2000
- 13 Li Maohe, Hu Hefang, Qi Changhong. A method to calculate the emission cross section of rare-earth ions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 626~629
- 李毛和, 胡和方, 祁长鸿. 一种稀土离子发射截面的计算方法 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 626~629
- 14 V. D. D. Cacho, L. R. P. Kassab, P. Verdonck *et al.*. Near infrared and blue cooperative emissions in Yb^{3+} -doped GeO_2 - PbO glasses [J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 2006, **352**(1): 56~62
- 15 DeLoach Laura S, Payne Stephen A, Chasse L L *et al.*. Evaluation of absorption and emission properties of Yb^{3+} -doped crystal for laser applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4): 1179~1191

栏目编辑: 韩 峰