

文章编号: 1000-324X(2007)06-1095-04

掺铒碲基单模光纤的制备及其放大自发辐射光谱

陈东丹, 张勤远, 杨中民, 姜中宏

(华南理工大学 材料学院光通信材料研究所, 广州 510641)

摘要: 制备了一种新型的可应用于 $1.5\mu\text{m}$ 通讯窗口宽带放大自发辐射光源的掺铒碲酸盐玻璃单模光纤 (EDTF), 并分析了其热学性质和光谱特性. 该玻璃显示了良好的热稳定性 ($\Delta T > 150^\circ\text{C}$) 和匹配的热膨胀系数. 采用自制 EDTF 短光纤, 组装了超荧光单程反向结构光源 (SPB), 利用波长为 980nm 的半导体激光器抽运掺 Er^{3+} 的碲酸盐短光纤, 可在 $1450\sim 1650\text{nm}$ 范围获得宽带的铒离子放大自发辐射光谱 (ASE). 研究了光纤长度, 泵浦功率等对放大自发辐射光谱的影响. 研究结果显示, 该碲酸盐玻璃是一种适用于宽带放大自发辐射光源的基质材料.

关键词: 宽带放大自发辐射; 掺铒碲酸盐光纤; 单模

中图分类号: TQ171 **文献标识码:** A

Fabrication and Characterization of Amplified Spontaneous Emission from Er^{3+} -doped Single-Mode Tellurite Fiber

CHEN Dong-Dan, ZHANG Qin-Yuan, YANG Zhong-Min, JIANG Zhong-Hong

(Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Fabrication and characterization of a newly erbium-doped single-mode tellurite glass-fiber applicable for $1.5\mu\text{m}$ amplified spontaneous emission (ASE) source were reported. The glasses exhibit very good thermal stability ($\Delta T > 150^\circ\text{C}$) and matchable thermal expansion coefficient. A very broad erbium amplified spontaneous emission in a range of $1450\sim 1650\text{nm}$ from erbium-doped single-mode tellurite glass-fiber is obtained upon excitation of a 980nm laser diode. Effects of the length of glass-fiber and the pumping power of laser diode on the amplified spontaneous emission are discussed. The result indicates that the tellurite glass-fiber is a promising candidate for designing fiber-ASE source.

Key words: broadband ASE; erbium-doped tellurite fiber (EDTF); single-mode

1 引言

碲酸盐玻璃具有较宽的红外透过区 ($0.35\sim 6.00\mu\text{m}$)、较高的稀土离子溶解能力、折射率及非线性折射率^[1], 受激发射截面大和荧光半高宽 (FWHM $\sim 65\text{nm}$) 较宽等特点^[2-4], 目前已成为光通信领域中宽带玻璃主动光纤研究的重要组成部分^[2-7]. 近几年, 掺铒碲酸盐光纤用于放大自发辐射光源 (ASE) 也引起了极大的研究兴趣.

宽、输出功率高、增益平坦、光纤长度短、结构简单等优点, 因此获得了广泛的研究^[8-10]. 传统的掺铒石英光纤因其 ASE 谱的不平坦性导致有效线宽较窄, 必须通过一些处理手段才可获得覆盖 C 波段和 L 波段的宽带 ASE 光源^[8-11], 但这些处理方法不可避免导致机构复杂化. 与石英基光纤相比, 掺铒碲酸盐光纤具有更平坦和更宽的放大带宽^[2-4], 因此, 掺铒碲酸盐光纤用于 ASE 光源将更有利于结构简单化和器件小型化^[12].

稀土掺杂光纤宽带 ASE 光源由于具有发射谱

目前国内外研制出一些具有宽带宽放大性能

收稿日期: 2006-12-11, 收到修改稿日期: 2007-01-16

基金项目: 国家自然科学基金 (60307004, 50472053); 广东省自然科学基金 (04020036); 广东省科技计划重大攻关项目 (2004A10602002)

作者简介: 陈东丹 (1976-), 女, 讲师. E-mail: dongdanchen@163.com

的 EDTF^[12,13], 然而其玻璃基质的热力学性能仍不太理想. 本研究报道了一种具有优异的热力学稳定性的碲酸盐玻璃, 其 $\Delta T > 150^\circ\text{C}$, 且在光纤拉制温度附近保温 3h 不致出现析晶现象. 利用该碲酸盐玻璃拉制出单模光纤, 并自行组装了单程后向超荧光实验结构, 获得了带宽达 80nm 的 ASE 谱.

2 实验

2.1 玻璃的熔制及光纤的拉制

光纤纤芯和包层材料分别以 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-WO}_3$ 和 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-BaO-K}_2\text{O-Nb}_2\text{O}_5\text{-GeO}_2$ 系统为基质玻璃, 纤芯铒离子掺杂浓度为 10000ppm. 玻璃熔制使用分析纯以上的试剂 TeO_2 , ZnO , WO_3 , $\text{Ba(NO}_3)_2$, Nb_2O_5 , GeO_2 , K_2CO_3 和 Er_2O_3 , 按配方精确称取原料均匀混合后, 放入铂金坩埚中, 在 900°C 下熔化, 然后将玻璃熔体倒在干净光滑的不锈钢模具上, 送入退火炉中退火. 将退火后的玻璃切割、研磨、精加工, 分别制成纤芯和包层. 光纤预制棒采用管棒法制备, 并采用两次拉制的方法拉制成阶跃式单模光纤.

2.2 性能测试

碲酸盐玻璃的特征温度采用差示扫描分析法 (DSC) 进行测量, 所用仪器为德国 Netzsch 公司产 STA449C Jupiter 型同步热分析仪, 升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$; 纤芯和包层的膨胀系数采用德国 Netzsch 公司产 DIL 402 型膨胀仪测试, 升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$; ASE 谱的特性采用光学光谱分析系统 (OSA) (Anritsu, MS9710C, Japan) 分析; 输出功率采用功率测量仪 (Ophir, NOVA II, USA) 测试. 所有的测试如无特别说明均在室温下进行.

3 结果和讨论

3.1 玻璃的热性质

玻璃的热力学稳定性通常采用玻璃的析晶开始温度 T_x 和玻璃的转变温度 T_g 之间的差值 ΔT 大小来衡量. ΔT 越大, 玻璃的稳定性越好, 反之, ΔT 越小, 玻璃的热稳定性越差. 一般而言, $\Delta T > 100^\circ\text{C}$ 时玻璃的热稳定性较好. 由图 1(a) 可以看到, 纤芯和包层玻璃的玻璃化转变温度分别为 361 和 374°C , 两者 ΔT 均大于 150°C , 没有明显的析晶现象, 而且相差不超过 20°C , 可以满足碲酸盐玻璃光纤拉制的要求.

为了防止光纤在冷却的过程中由于纤芯和包层的热膨胀系数不匹配而产生应力破坏, 一般要求

纤芯和包层的热膨胀系数相差不超过 $\pm 20 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$. 图 1(b) 是玻璃的热膨胀曲线, 在拉丝温度下, 纤芯玻璃膨胀系数为 $146.9 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 包层膨胀系数为 $163.3 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 两者相差 $16.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, 符合光纤拉制的要求.

3.2 ASE谱优化

图 2 是采用自制的碲酸盐玻璃光纤, 自行组装的用于 C-L 波段的单程反向 ASE 光源结构图. 该碲酸盐光纤相对折射率 0.22%, 荧光寿命 2.8ms. 采用的泵浦源是波长 980nm, 功率为 107.2mW 的可调半导体激光器. 波分复用器 (WDM) 由武汉光迅科技有限公司提供, 插入损耗为 0.2dB. 光纤与泵浦端采用端对端的连接方式. 泵浦光经 980/1550nm WDM 直接耦合进入掺 Er^{3+} 碲酸盐光纤, 后向产生的 ASE 经 1550nm 端输出与泵浦光相分离.

图 3 为 6.0cm 长的掺 Er^{3+} 碲酸盐光纤在 49mW 泵浦光的抽运下发出的 ASE 光谱. 在 980nm LD 抽运下, 从 1450~1650nm 的范围内可以观察到一个约 180nm 宽的铒离子 ASE 谱, 同时覆盖了 C 波段和 L 波段. 其 3dB 带宽约 70nm, 是传统石英光纤的 2 倍以上. 图 3 中插图是用带 JVC CCD 照相机的光学显微镜拍摄的光纤端面. 该碲酸盐玻璃光纤偏心率 $< 0.3\mu\text{m}$, 数值孔径 (N_A) 为 0.19. 可以看到光纤

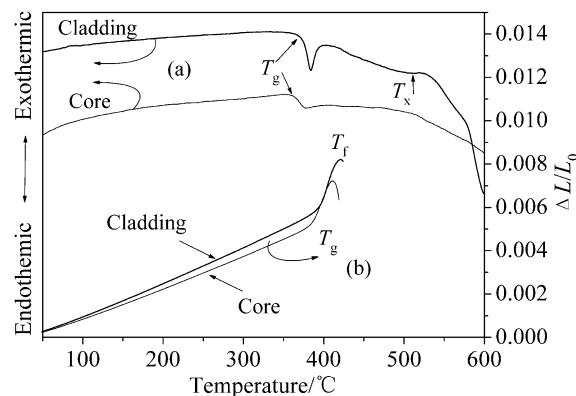


图 1 (a) 包层和纤芯玻璃的差示扫描分析曲线; (b) 包层和纤芯的热膨胀曲线

Fig. 1 (a) DSC traces and (b) thermal expansion curves of the cladding and core

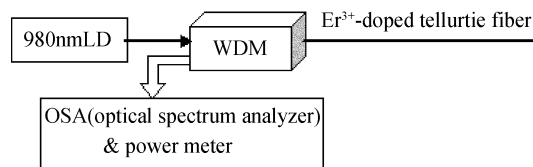


图 2 单程反向实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the proposed single pass backward (SPB) pumping configuration

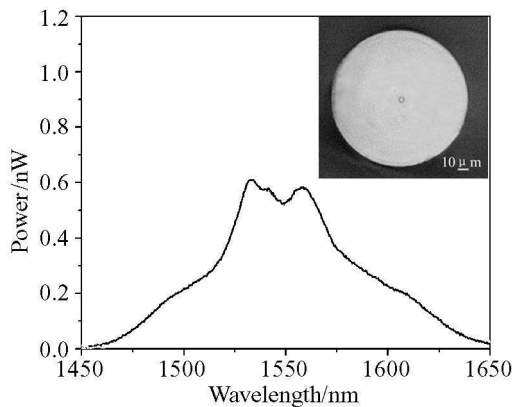


图3 掺铒碲酸盐光纤的 ASE 谱 (插图是光纤端面图)
Fig. 3 ASE spectrum of the EDTF, the inset shows the magnified cross-section of the EDTF

端面规整, 纤芯和包层界面结合良好, 包层直径约 $125\mu\text{m}$, 纤芯直径约 $5\mu\text{m}$.

根据文献 [14], 阶跃式单模光纤必须满足以下条件:

$$v = \frac{\pi d N_A}{\lambda} \leq 2.405 \quad (1)$$

式中 v , N_A , d 和 λ 分别是归一化频率、数值孔径、纤芯直径和截止波长. 其中, 截止波长根据理论计算:

$$\lambda = \frac{\pi d}{V} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 由棱镜耦合仪测得, 分别为 2.072 和 2.063. 对于阶跃折射率光纤, $V=2.405$. 因此, 由式 (2) 可计算截止波长 λ 为 1255nm. 根据通讯单模光纤特性, λ 在 1100~1280nm 之间, 可以有效避免模式噪声和色散的影响. 根据式 (1), 当 $N_A=0.19$ 时, 纤芯直径必须 $<5.06\mu\text{m}$ 才达到单模的要求. 实验制备的碲酸盐光纤很好地满足了单模光纤的几何要求.

图 4(a) 和 (b) 分别显示了不同 EDTF 长度和不同泵浦功率对 ASE 谱的影响. 不同长度的碲酸盐玻璃光纤的光谱均在 1450~1650nm 的范围内. 由图 4(a) 可以看出, 当采用功率为 79.1mW 的泵浦时, 随着玻璃光纤长度变化, 其 ASE 谱形状基本一样, 峰值波长在 1530nm 左右. 当碲酸盐光纤长度从 5.0cm 增加到 6.0cm 时, ASE 谱输出功率相应增大, 而长度由 6.0cm 增加到 7.5cm 时, 输出功率反而有所下降. 其主要原因是长度低于 6.0cm 的光纤不能很充分地吸收泵浦的功率, 而长度 $>6.0\text{cm}$ 的光纤有可能由于荧光捕获效应导致传播过程中较大的损耗.

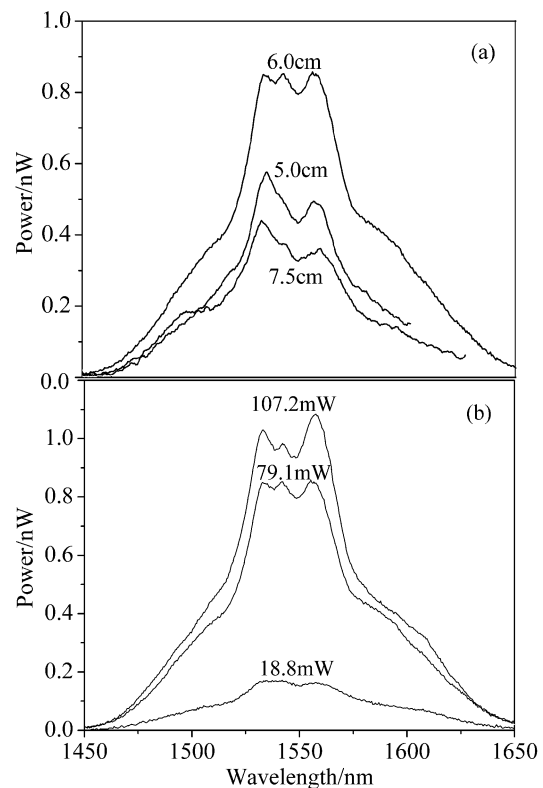


图4 不同 EDTF 长度 (a) 和不同泵浦功率 (b) 对 ASE 谱的影响

Fig. 4 ASE spectra of the EDTF with different lengths (a) and at different pumping powers (b)

不同泵浦功率对于 6.0cm 长碲酸盐光纤的 Er^{3+} 离子 ASE 谱的影响如图 4(b) 所示. 可以看到, 随着泵浦功率增大, 在 1530nm 峰值增益的增加, 导致谱线带宽变窄. 当泵浦功率由 18.8mW 增加到 107.2mW 时, 光纤荧光半高宽 (FWHM) 由 80nm 减少至 60nm, 下降了 25%. 以输出功率 \times FWHM 作为衡量 ASE 光谱的品质指数, 在本实验系统中, 当光纤长度为 6.0cm, 泵浦功率为 79.1mW 时为最佳条件. 从实验结果看, ASE 输出功率较低, 主要原因是该 EDTF 与商用石英光纤的光学模场不匹配, 导致耦合损耗和传播损耗过大, 而且在制备过程中不可避免地带入一些污染, 也是造成损耗的原因之一. 经实验检测, 实际进入光纤的泵浦光效率 $<3\%$. 如何提高泵浦技术和耦合技术还有待进一步的研究.

4 结论

制备了一种具有优良热力学稳定性和匹配的膨胀系数的掺铒碲酸盐单模光纤. 其 $\Delta T > 150^\circ\text{C}$, 且在光纤拉制温度附近保温 3h 不致出现析晶现象. 利用波长为 980nm 的半导体激光器抽运掺 Er^{3+} 的碲

酸盐短光纤, 采用单程后向超荧光实验结构, 获得了宽带宽的放大自发辐射光纤光源 (ASE). 在长仅 4.0~7.5cm 的掺铒碲酸盐玻璃短光纤中实现了 3dB 带宽为 60~80nm 的 ASE 谱. 当光纤长度为 6.0cm 时, 泵浦功率为 79.1mW, ASE 输出品质最佳. 值得注意的是, 这样一种短光纤组成的单程反向光源在毫瓦级的泵浦功率下即可实现放大自发辐射光输出.

致谢 感谢张伟南, 徐善辉, 冯洲明等对本研究工作的帮助.

参考文献

- [1] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. *Opt. Mater.*, 1994, **3** (4): 187–203.
- [2] Mori A, Ohishi Y, Sudo S. *Electron. Lett.*, 1997, **33** (10): 863–864.
- [3] Ono H, Sakamoto T, Mori A, *et al.* *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, **14** (8): 1070–1072.
- [4] Ono H, Mori A, Shikano K, *et al.* *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, **14** (8): 1073–1075.
- [5] Özalp Reha, Özen M, Sennaroglu Gönül, *et al.* *Opt. Comm.*, 2003, **217** (1–6): 281–289.
- [6] Shen S, Naftaly M, Jha A, *et al.* Thulium-doped tellurite glasses for S-band amplification. OFC. 2001. 2: TuQ6-1–TuQ6-3.
- [7] Man S Q, Liu H W, Wong Y H, *et al.* *LEOS*, 1998, **1**: 196–197.
- [8] Aozaso S, Sakamoto T, Kanamori T, *et al.* *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2001, **12** (10): 1331–1333.
- [9] Jeong H, Oh K, Han S R, *et al.* *Chem. Phys. Lett.*, 2003, **367** (3–4): 507–511.
- [10] Huang W C, Tam H Y, Wai P K A, *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19** (9): 1307–1308.
- [11] Espindola P, Ales G, Park J, *et al.* *Electron. Lett.*, 2000, **36** (15): 1263–1265.
- [12] Marjanovic S, Toulouse J, Jain H, *et al.* *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, **322** (1–3): 311–318.
- [13] Dai S X, Zhang J J, Li S G, *et al.* *Phys. Lett.*, 2004, **21**(2): 329–331.
- [14] Braglia M, Bruschi C, Chierici E, *et al.* *J. Non-Cryst. Solids*, 1999, **256/257**: 220–225.