

doi: 10. 3788/gzxb20164503. 0306001

铋/铒共掺光纤荧光特性实验研究

武小娟¹, 颜玢玢¹, 李春生¹, 桑新柱¹, 陈秀敏², 余重秀¹, 王葵如¹,
苑金辉¹, 程明胜¹, 罗艳华³, 彭纲定³

(1 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2 中国电信股份有限公司广州研究院, 广州 510630)

(3 澳大利亚新南威尔士大学 电气工程与通信学院 光子学与光通信实验室, 悉尼 2052)

摘 要: 分别用 980 nm 和 830 nm 的半导体激光器作为泵浦源激发铋/铒共掺光纤, 采用前向和背向泵浦方式分析放大的自发辐射谱特性. 实验结果表明: 随着泵浦功率的增大, 荧光强度显著增强. 利用 980 nm 半导体激光器, 采用前向泵浦方式可激发以 1 142 nm 和 1 536 nm 为中心的两个辐射带, 以 1 142 nm 为最高辐射峰的 3 dB 带宽是 141 nm, 以 1 536 nm 为最高辐射峰的 3 dB 带宽是 29 nm. 利用 830 nm 半导体激光器, 采用前向泵浦方式可激发以 1 421 nm 为中心的荧光谱, 3 dB 带宽是 447 nm. 980 nm 和 830 nm 激光器分别前向泵浦铋/铒共掺光纤时, 随着光纤长度的增加, 荧光先增强后减弱; 分别背向泵浦铋/铒共掺光纤时, 随着光纤长度的增加, 荧光强度先逐渐增强后保持稳定. 在 25~80℃ 的温度范围内, 铋/铒共掺光纤的荧光强度几乎不受温度的影响. 使用 980 nm 和 830 nm 泵浦源同时激发铋/铒共掺光纤, 结果表明铋/铒共掺光纤的发光中心具有相对独立性, 发光范围存在部分重叠.

关键词: 光纤光学; 光谱学; 掺铋光纤; 自发辐射谱

中图分类号: TN 929. 11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0306001-7

Experimental Investigation on the Luminescence Properties of Bismuth/Erbium Co-doped Optical Fiber

WU Xiao-juan¹, YAN Bin-bin¹, LI Chun-sheng¹, SANG Xin-zhu¹, CHEN Xiu-min², YU Chong-xiu¹,
WANG Kui-ru¹, YUAN Jin-hui¹, CHENG Ming-sheng¹, LUO Yan-hua³, PENG Gang-ding³

(1 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(2 Guangzhou Research Institute of China Telecom Co. Ltd, Guangzhou 510630, China)

(3 Laboratory of Photonics & Optical Communications, School of Electrical Engineering & Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia)

Abstract: 980 nm and 830 nm semiconductor lasers were used as the pump source to excite Bismuth/Erbium co-doped optical fiber respectively, and the amplified spontaneous emission spectrum properties of forward and backward pump methods were analyzed. Experimental results show that the fluorescence intensity is significantly enhanced with increasing of the pumping power. By using 980 nm semiconductor laser, there are two obvious emission bands with the central wavelengths at 1 142 nm and 1 536 nm with the forward pump. The 3 dB bandwidth with the center of 1 142 nm is 141 nm and, the 3 dB bandwidth with the center of 1 536 nm is 29 nm. Using 830 nm semiconductor laser, the forward pump mode can excite the fluorescence spectrum with 1 421 nm as the center, and the 3 dB bandwidth is 447 nm. When 980 nm and 830 nm semiconductor lasers pumped Bismuth/Erbium co-doped optical fiber forward

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 61405014)资助

第一作者: 武小娟(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤放大器. Email: wuxiaojuan126@126.com

通讯作者: 颜玢玢(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为新型光电子器件、光纤通信、三维显示等. Email: yanbinbin@bupt.edu.cn

收稿日期: 2015-08-31; 录用日期: 2015-11-25

<http://www.photon.ac.cn>

respectively, luminescence intensity firstly increased and then decreased. When 980 nm and 830 nm semiconductor lasers pumped Bismuth/Erbium co-doped optical fiber backward respectively, luminescence intensity firstly increased and then remained stable. In the temperature range of 25~80 °C, the fluorescence intensity of Bismuth/Erbium co-doped optical fiber is almost unaffected by the temperature. Using 980 nm and 830 nm semiconductor lasers to excited Bismuth/Erbium co-doped optical fiber at the same time, it is proved that the Bismuth activity centers are independent, and there is some overlap in the luminescence range.

Key words: Fiber optics; Spectroscopy; Bismuth-doped fiber; Spontaneous emission spectrum

OCIS Codes: 060.2310; 160.4760; 230.2285; 300.6280; 300.6340

0 引言

随着信息高速公路的发展和三网融合、物联网及各种宽带业务的推进,人们对光纤通信网络传输容量的需求越来越高.目前实际应用的光纤通信带宽主要集中在 C+L 波段(1 530~1 610 nm),主要受限于掺铒(Er³⁺)光纤的工作带宽.无水光纤制备技术的发展使得石英光纤在 1 100~1 700 nm 的波长范围内具有很低的损耗,因而开发超宽带且与标准通信光纤兼容的光纤放大器十分重要.研究超宽带光纤放大器和超宽带可调谐光纤激光器不仅对 1 100~1 600 nm 光纤全波段通信的应用和发展起到巨大的推动作用,还可促进大容量光纤传感、超宽带光谱测量、光信息处理、等离子体物理、生物学等领域的发展.为了拓展未被掺铒光纤放大器覆盖的通信带宽,人们开展了掺杂 Yb³⁺、Nd³⁺、Tm³⁺ 等各种稀土离子的光纤放大器和喇曼光纤放大器的研究^[1].但是,目前仍然没有一个有效的宽带光纤放大器可以同时覆盖 O-、E-、S-、C-和 L-波段^[1].

1999 年, Murata 等用 500 nm 激光器泵浦掺杂有铋元素的二氧化硅玻璃,观察到峰值位于 1 150 nm 的宽带荧光,半高全宽为 150 nm,荧光寿命为 650 μs^[2]. 2003 年, Yasushi Fujimoto 等利用 500 nm 激光器泵浦铋掺杂玻璃,观察到 1.3 μm 的光放大现象^[3]. 2005 年, V. V. Dvoyrin 等首次利用改进型化学气相沉积(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD)技术制作出铋掺杂石英光纤,其荧光谱在 1.1~1.2 μm 达到最大^[4]. 2007 年, Y. Kuwada 等在铋/铒共掺玻璃中,发现了 1 160~1 570 nm 的超宽带荧光谱^[5]. 2008 年, Chi Guangwei 在铋掺杂锗基玻璃中发现 1 200~1 600 nm 的荧光谱^[6]. 2011 年, M. Peng 等在铋/铒共掺锗玻璃中发现 1 160~1 580 nm 的超宽带荧光谱^[7]. 2012 年, Yanhua Luo 等分别利用 532 nm, 808 nm, 980 nm 激光器,首次泵浦 Bi/Er/Al/P 共掺的锗硅光纤,观察到从 1 100 nm 到 1 570 nm 覆盖了 O-、E-、S-、C-和 L-波段的超宽带荧光谱^[8]. 2013 年, Jianzhong Zhang 等利用 830 nm 激光器泵浦铋/铒共掺光纤(Bismuth/Erbium co-Doped Optical Fiber, BEDF)激发了 1 100~1 570

nm 的超宽带荧光谱,荧光强度超过 -45 dBm/5 nm^[9]. 2014 年, Dianov 根据光纤的掺杂组份将铋掺杂光纤分类为 SBi、GSBi、ASBi、PSBi 等,并分别观察它们的荧光特性^[10]. 虽然有研究认为近红外荧光的铋活性中心(Bismuth Active Center, BAC)与 Bi³⁺^[11-12] 和 Bi²⁺^[13] 无关,可能与 Bi⁺^[14-16]、Bi⁵⁺、BiO、Bi⁰ 团簇离子、点缺陷^[17] 等有关,但有关铋元素近红外辐射的本质仍有争议^[18], BEDF 荧光的基本机理还不明确.因此,系统地实验研究 BEDF 在 980 nm 和 830 nm 等泵浦源激发下的荧光特性,探究其发光机理,具有重要的实际意义.

本文采用 830 nm 和 980 nm 半导体激光器泵浦 BEDF,实验研究了不同泵浦功率、不同泵浦激发方式情况下的荧光特性,并分析了 BEDF 光纤长度和环境温度变化对荧光特性的影响,以及 980 nm 和 830 nm 两个激光器同时泵浦 BEDF 时的荧光特性.

1 实验装置

实验研究的铋/铒共掺光纤是利用 MCVD 技术制成的,其组成成份和浓度分别是 [Si]~26.69, [P]~0.42, [Bi]~0.148, [Er]~0.05, [Al]~0.3 和 [Ge]~1.259 atom%, 纤芯直径为 3.0 μm. 只有在铋离子浓度比较低(<0.1 wt. %) 时,才存在有效的增益和激射现象^[10].

利用截断法测量光纤的吸收谱,结果如图 1. 1 000 nm 的吸收峰是由 ASBi 的激发态吸收作用引起的^[19], 830 nm 的吸收峰是由 SBi 的 ³P₀ → ³P₂ 跃迁引

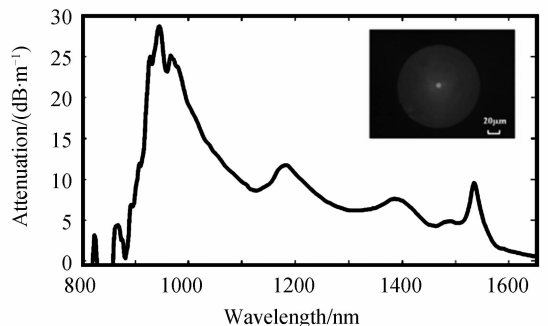


图 1 铋/铒共掺光纤的吸收谱
Fig. 1 Absorption spectrum of Bismuth/Erbium co-doped optical fiber

起,925 nm 的吸收峰是由 GBi 的 $^3P_0 \rightarrow ^3P_2$ 跃迁引起^[13],1 420 nm 的吸收峰是由 SBi 的 $^3P_0 \rightarrow ^3P_1$ 跃迁^[9-10]引起,980 nm 的吸收峰是 Er^{3+} 的 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 跃迁引起,1 530 nm 的吸收峰是由 Er^{3+} 的 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁引起^[6,20],1 380 nm 附近的吸收峰是由 OH 根的吸收作用引起。

实验研究采用如图 2 所示的装置.图 2(a)为前向泵浦方式,泵浦源直接接入 BEDF,BEDF 的另一端连接光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer,OSA).图 2(b)为背向泵浦方式,泵浦源经波分复用器(Wavelength Division Multiplexer,WDM)耦合进入 BEDF,背向荧光谱由连接在 WDM 2 端口的 OSA 进行测量.实验采用 830 nm 和 980 nm 激光器作为泵浦源,根据不同的泵浦波长,使用相应的 830/1310 WDM 和 980/1 310 WDM.图 2(c)为双泵浦方式,用两个泵浦源同时激发 BEDF,用于验证不同 BAC 的独立性。

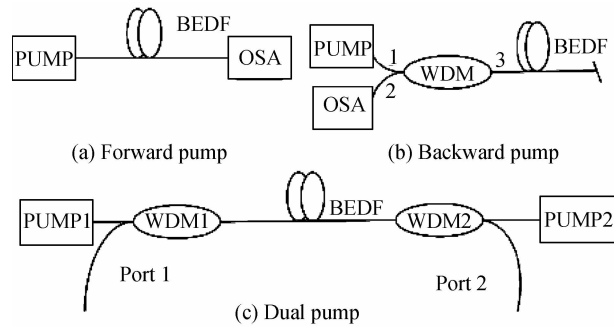


图 2 实验装置图

Fig. 2 The experimental setup

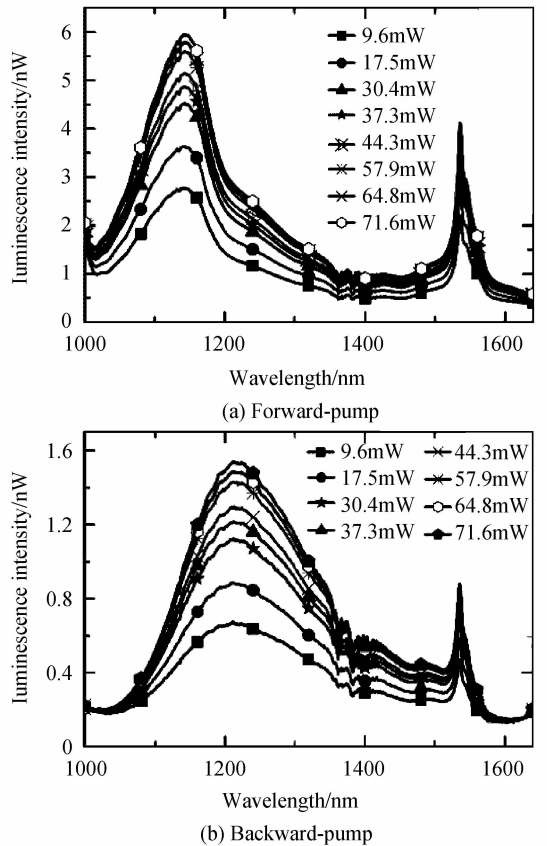
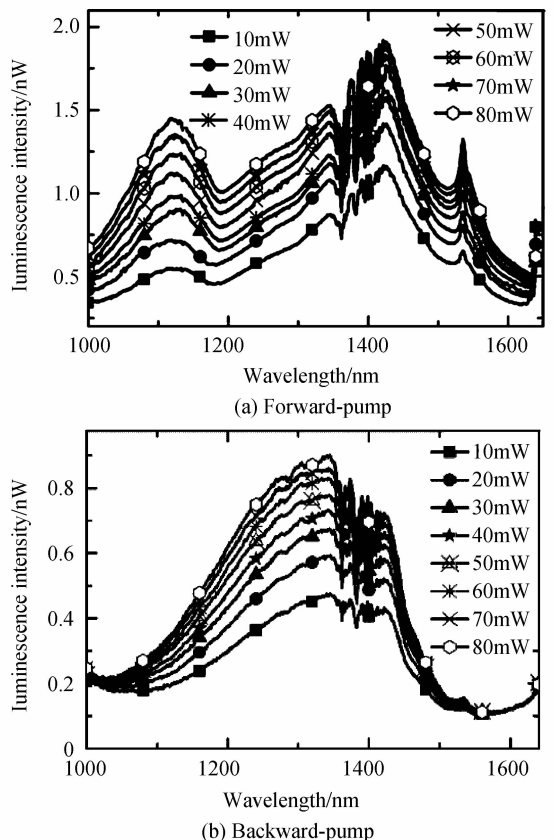
2 实验及结果分析

2.1 泵浦波长及功率对荧光特性的影响

光纤本身会对泵浦源所激发的荧光谱产生吸收作用,光纤越长对荧光谱的吸收作用越大,因此实验选择 9cm 长的光纤,以减少对荧光的再次吸收.实验分别采用前向和背向两种泵浦方式,研究 9cm 长的 BEDF 在 980 nm 和 830 nm 不同泵浦波长激发下的荧光随泵浦功率变化的特性。

980 nm 激光器前向泵浦 BEDF 得到的放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 谱如图 3.当泵浦功率为 71.6 mW(对应驱动电流为 300 mA)时,ASE 谱短波段的峰值中心为 1 142.8 nm,峰值为 5 961 pW,3 dB 荧光区为 1 061~1 202 nm,全波半宽达 141 nm,长波段的峰值中心为 1 536 nm,峰值为 4 114 pW,3 dB 带宽为 29 nm.图 4 为使用 980 nm 激光器以背向泵浦方式得到的 ASE 谱,同样也激发了以 1 210 nm 和 1 536 nm 为中心的两处荧光。

从图 3 可以看出,当 980 nm 激光器的泵浦功率较小时,随着泵浦功率逐渐增大荧光强度显著增强,中心

图 3 980 nm 激光器泵浦得到的 ASE 谱
Fig. 3 ASE spectrum pumped by 980 nm laser图 4 830 nm 激光器泵浦所得 ASE 谱
Fig. 4 ASE spectrum pumped by 830 nm laser

波长没有出现偏移,泵浦功率继续增大,荧光强度增强的速度变缓,这是由于泵浦功率很高时,光纤对泵浦的吸收作用发生饱和,所以总的输出功率也趋于饱和,泵浦效率明显下降.当泵浦功率相同时,前向泵浦得到的荧光强度比背向泵浦更强,主要是因为 980/1 310 WDM 对荧光有很强的衰减作用,且远远大于 BEDF 对荧光的再次吸收作用.实验发现前向泵浦方式(不使用 WDM)和背向泵浦方式(使用 WDM)激发的荧光峰的位置不同,主要是由于 980/1 310 WDM 对 1 000~1 600 nm 各个波长的衰减作用不同引起.由图 3(a)可知,980 nm 激光器激发了至少一个 BAC(1 142 nm).研究表明,ASBi 的 $ES1 \rightarrow GND$ (激发态 1 \rightarrow 基态)辐射跃迁激发了 1 100 nm 附近的荧光,PSBi 的 ${}^3P_1 \rightarrow {}^3P_0$ 辐射跃迁激发了 1 250 nm 附近的荧光,而 1 536 nm 附近的荧光是由 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 跃迁引起的.

980 nm 激光器泵浦 BEDF 时,PSBi 和 Er^{3+} 存在能级间相互作用: ${}^4I_{15/2}(Er^{3+}) \rightarrow {}^4I_{11/2}(Er^{3+})$, ${}^4I_{11/2}(Er^{3+})$ 无辐射跃迁到 ${}^4I_{13/2}(Er^{3+})$,释放的能量激发 PSBi, ${}^3P_0(PSBi) \rightarrow PSBi1(PSBi)$,PSBi1 能级不稳定,无辐射跃迁到 ${}^3P_1(PSBi)$, ${}^3P_1(PSBi) \rightarrow {}^3P_0(PSBi)$ 的自发辐射激发了 1 250 nm 的荧光.

采用 830 nm 半导体激光器作为泵浦源时,得到的 ASE 谱如图 4.前向泵浦功率为 70 mW 时,光纤荧光谱的峰值波长为 1 421 nm,功率为 1 882 pW,3 dB 带宽为 447 nm,波长范围为 1 098~1 545 nm.当采用背向泵浦方式,泵浦功率为 70 mW 时,BEDF 的 ASE 谱的峰值波长是 1 345 nm,功率是 1 491 pW,3 dB 带宽是 285 nm,3 dB 波长范围是 1 168~1 454 nm.同样,经测试 830/1 310 WDM 对各个波长处的荧光具有不同的衰减作用,所以背向泵浦时,1 116 nm、1 421 nm、1 536 nm 附近的荧光峰变得不明显了,最高荧光峰由 1 421 nm 转移到了 1 345 nm.由图 4(a)可知,830 nm 激光器泵浦 BEDF 激发了至少 2 个 BAC(1 116 nm,1 421 nm).研究表明,1 100 nm、1 430 nm、1 536 nm 附近的荧光峰分别是由于 ASBi 的 $ES1 \rightarrow GND$ 辐射跃迁、SBi 的 ${}^3P_1 \rightarrow {}^3P_0$ 辐射跃迁、 Er^{3+} 的 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的跃迁引起的.

830 nm 激光器泵浦 BEDF 时,SBi 和 Er^{3+} 存在能级间相互作用:830 nm 激发 ${}^3P_1(SBi) \rightarrow SBi1(SBi)$,SBi1 能级不稳定,发生无辐射跃迁释放能量激发 ${}^4I_{15/2}(Er^{3+}) \rightarrow {}^4I_{11/2}(Er^{3+})$, ${}^4I_{11/2}(Er^{3+})$ 也不稳定,发生自发辐射 ${}^4I_{13/2}(Er^{3+}) \rightarrow {}^4I_{15/2}(Er^{3+})$,发出 1 536 nm 的荧光.

图 3(a)和图 4(a)对比,980 nm、830 nm 都能激发 1 140 nm 附近的荧光,980 nm 效率更高.830 nm 和 980 nm 激发的荧光谱强度都很低(大约几个纳瓦),表明大部分泵浦光存在不饱和吸收,BEDF 性能很差,可能存在激发态吸收、上能级辐射及非辐射跃迁等.在

1 000~1 600 nm 的频谱内,不同泵浦源激发的荧光谱的形状差别很大.这是不同泵浦功率,对应 BEDF 不同的吸收截面、辐射截面及泵浦功率沿光纤长度的衰减共同作用的结果.

2.2 BEDF 长度对荧光特性的影响

为了分析光纤长度对荧光特性的影响,实验研究了不同长度的光纤在不同泵浦方式下的 ASE 谱.

在前向泵浦方式下,采用图 2(a)所示的实验装置,研究光纤长度对荧光的影响. BEDF 一端连接泵浦,另一端连接 OSA. 实验中 BEDF 连接泵浦的一端不断地被截短,然后熔接同一根跳线,实验过程中熔接损耗一直保持较小.830 nm 激光器的功率固定为 20 mW,980 nm 激光器的输出功率设置为 17.5 mW. 实验结果如图 5,980 nm 激光器泵浦时,随着 BEDF 长度从 4 cm 开始增加,荧光强度逐渐增强,直到 BEDF 为 12.3 cm 荧光强度达到最大.随着光纤长度超过 12.3 cm 时,荧光强度逐渐减弱.830 nm 激光器泵浦时,随着 BEDF 长度从 4 cm 开始增加,荧光强度逐渐增强,光纤长度达到 16 cm 时,荧光强度达到最大.当光纤长度从 16 cm 增加到 49.2 cm 时,荧光强度逐渐减弱.实验表明采用前向泵浦方式时,荧光强度随着 BEDF 长度的增加先增强,在达到最大值后,开始逐渐减弱,说明存

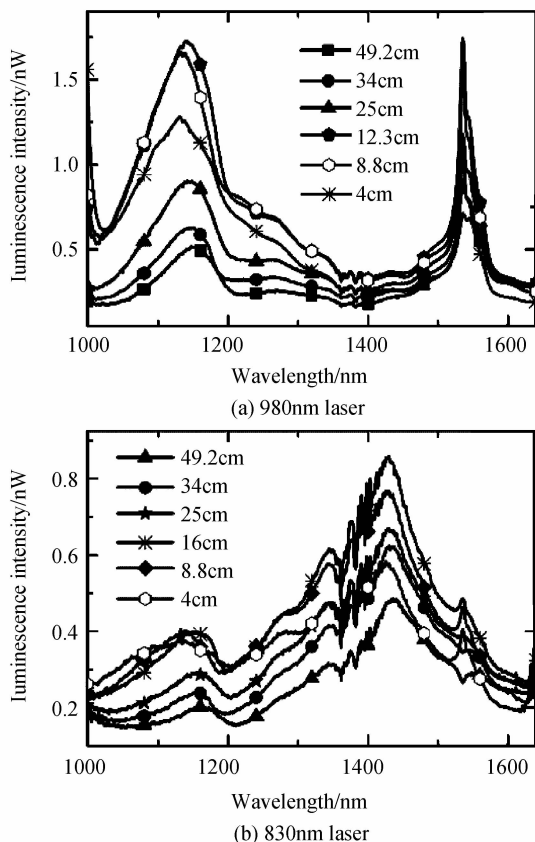


图 5 激光器前向泵浦时 ASE 谱随光纤长度的变化
Fig. 5 ASE spectrum varied with length of BEDF when laser pump BEDF forward

在最佳光纤长度问题.这是因为泵浦激发基态粒子到上能级,通过自发辐射产生荧光,当泵浦沿 BEDF 长度传输时被不断吸收,光纤末端大部分的粒子数不会被激发至上能级,导致反转粒子数的浓度不断减小,当 BEDF 长度超过最佳光纤长度后, BEDF 对荧光的吸收大于增益而导致荧光强度减弱.

研究背向泵浦方式对荧光特性的影响时,采用图 2(b)所示装置图,分别用 830 nm 和 980 nm 激光器背向泵浦 BEDF,逐步切割 BEDF 悬空的一端,以改变其长度,观察背向 ASE 谱随光纤长度的变化规律.实验中,830 nm 激光器的功率固定为 20 mW,980 nm 激光器的输出功率设置为 17.5 mW.用 830 nm 和 980 nm 激光器激发 BEDF 得到的 ASE 谱分别如图 6.由图 6(a)可知,980 nm 激光器背向泵浦 BEDF 得到的荧光随着光纤长度的增加而增强,当光纤长度为 26 cm 时,荧光强度达到最大,继续增加光纤长度时荧光强度趋于稳定不变.观察图 6(b),发现 830 nm 激光器背向泵浦 BEDF 时随着光纤长度的增加,荧光强度先急剧增加,后趋于稳定.实验表明采用背向泵浦方式时,荧光谱幅值会随着光纤长度的增加逐渐增加并达到饱和.这是因为光纤长度越长,尾端部分光纤的 ASE 对总的 ASE 谱贡献越小,超过最佳光纤长度后,荧光强度基本

保持不变.

由实验结果可知,不同的泵浦波长及泵浦方式下,获得最强荧光的光纤长度不同,这为开发和优化基于 BEDF 的放大器和激光器提供了基础依据.

2.3 温度对荧光特性的影响

研究温度对 BEDF 荧光特性的影响时,实验装置如图 2(a),BEDF 一端连接 OSA,另一端接入 830 nm 泵浦源,泵浦功率固定为 40 mW.取 9 cm 的 BEDF 放置在水域中,水温从 80℃ 下降到 25℃,得到的 ASE 谱如图 7.随着水温的逐渐下降,荧光强度和荧光范围基本没有变化,说明在实验温度 25~80℃ 范围内,BEDF 的 ASE 谱基本不受温度变化的影响,光纤里粒子数反转程度及粒子在不同能级间的跃迁不受该范围内温度变化的影响,这有利于 BEDF 在放大器和激光器中的实际应用.

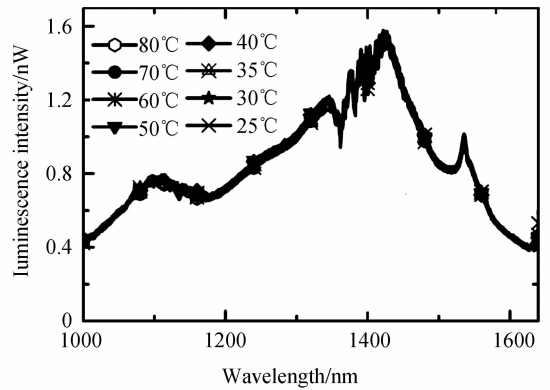


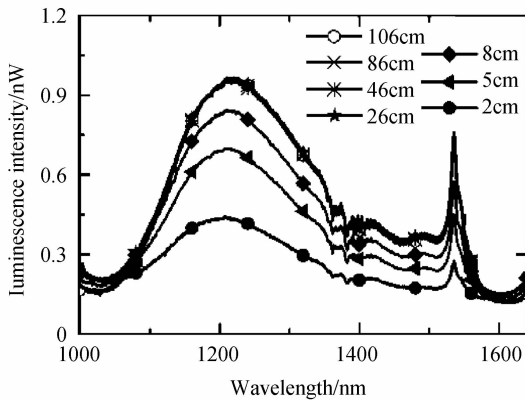
图 7 荧光随温度的变化

Fig.7 Luminescence varied with temperature

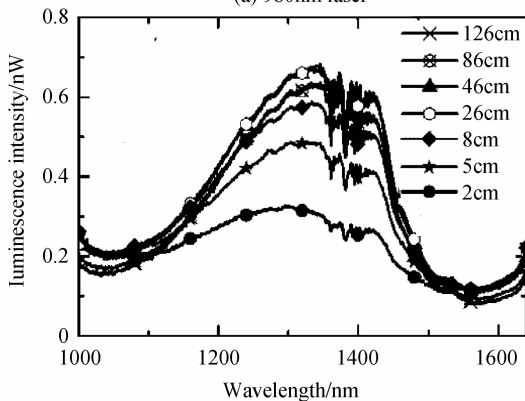
2.4 980 nm 和 830 nm 泵浦源同时激发 BEDF

选择不同的泵浦源,会激发不同位置的荧光峰,即对应不同的 BAC.利用图 2(c)所示的实验装置研究不同的 BAC 之间的独立性.其中 pump 1 是 980 nm 激光器,pump 2 是 830 nm 激光器,WDM 1 是 980/1 310 WDM,WDM 2 是 830/1 310 WDM.这样使得泵浦源功率在整个 BEDF 长度上分布相对比较均匀,且粒子数反转度在整个 BEDF 上都保持较高的水平.实验采用 BEDF 的长度为 9 cm,830 nm 泵浦源经过 830/1 310 WDM 后的实测入纤功率为 12.05 mW,980 nm 泵浦源经过 980/1 310 WDM 后的实测入纤功率为 11.98 mW.两功率值设置为近似相等,以便于对比分析.

图 8(a)为从 Port 1 观察到的 ASE 谱.曲线 980 nm+830 nm dual pump 表示两个泵浦源都开启时,即 980 nm 泵浦源背向激发 BEDF,同时 830 nm 泵浦源前向激发 BEDF 得到的 ASE 谱.曲线 830 nm only 表示 830 nm 泵浦源前向泵浦 BEDF,经过 980/1 310 WDM 后得到以 1 410 nm 为最高峰的 ASE 谱.曲线 980 nm only 表示 980 nm 泵浦源背向泵浦



(a) 980nm laser



(b) 830nm laser

图 6 激光器背向泵浦时 ASE 谱随光纤长度的变化

Fig.6 ASE spectrum varied with length of BEDF when laser pump BEDF backward

BEDF, 经过 980/1310WDM 后得到波峰位置在 1 210 nm 附近的 ASE 谱. 曲线 980 nm only+830nm only 表示 980 nm only 和 830 nm only 两个曲线的叠加谱, 即两个泵浦源单独工作时 ASE 谱的叠加. 观察发现曲线 980 nm only+830 nm only 与曲线 980 nm+830 nm dual pump 的 ASE 谱形状很相似, 但曲线 980 nm only+830 nm only 在 1 000~1 640 nm 的荧光范围内幅值都略高一些. 两条曲线的幅值差距是因为 PSBi-BAC(1 250 nm) 和 SBi-BAC(1 430 nm) 的有效粒子数在 1000~1 640 nm 区间存在重叠. 两个泵浦源同时开启时, 发光范围存在重叠的粒子数会由于功率过高导致几乎全部反转, 而使得这个范围的光谱没有两个单独泵浦时叠加谱的幅值大. 两条曲线的形状很相似, 峰位置基本一致, 说明 830 nm 和 980 nm 激光器同时泵浦 BEDF, 与 830 nm 和 980 nm 激光器分别单独泵浦 BEDF 相比, BAC 没有发生变化, 即 BAC 之间具有独立性, 而且对泵浦波长有一定的依赖性.

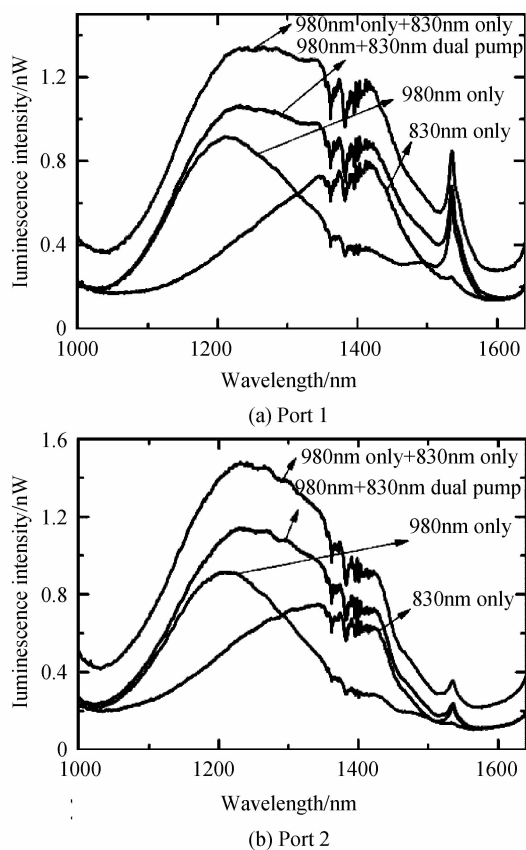


图 8 四种情况下的 ASE 谱

Fig. 8 ASE spectrum of four cases

图 8(b) 为从 Port 2 端口观察到的 ASE 谱, 曲线 830 nm only 为 830 nm 泵浦源背向泵浦 BEDF 得到的 ASE 谱, 最高峰位于 1 345 nm. 曲线 980 nm only 为 980 nm 激光器前向泵浦 BEDF, 但是 ASE 谱经过 830/1 310WDM 后得到的 ASE 谱. 曲线 980 nm only+830 nm only 与曲线 980 nm+830 nm dual pump 的

ASE 谱形状同样很相似, 峰位置也没有发生变化, 只是曲线 980 nm only+830 nm only 幅值略高些. 这同样证明 BEDF 的 BAC 具有相对独立性, 但是发光范围存在部分重叠.

3 结论

实验研究了 BEDF 在 980 nm 激光器和 830 nm 激光器单独泵浦情况下的荧光特性. 实验结果表明, 随着泵浦功率的增大, 荧光强度显著增强. 泵浦功率固定, 980 nm 和 830 nm 激光器分别前向泵浦 BEDF 时, 随着光纤长度的增加, 荧光强度先逐渐增强, 到最大值后开始减弱; 分别背向泵浦 BEDF 时, 随着 BEDF 长度的增加, 荧光强度先逐渐增强后趋于稳定不变. 在 25~80℃ 范围内, BEDF 的荧光强度几乎不随温度而发生变化, 说明其有很好的温度稳定性, 有利于实际应用. 最后, 通过 980 nm 和 830 nm 两个泵浦源分别和同时激发 BEDF, 证实了 BEDF 的发光中心是相对独立的, 但是发光范围存在部分重叠.

参考文献

- [1] BUFETOV I A, DIANOV E M. Bi-doped fiber lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, **6**(7): 487-504.
- [2] MURATA K, FUJIMOTO Y, KANABE T, *et al.* Bi-doped SiO as a new laser material for an intense laser [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, **44**(1): 437-439.
- [3] FUJIMOTO Y, NAKATSUKA M. Optical amplification in bismuth-doped silica glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(19): 3325-3326.
- [4] DVOYRIN V V, MASHINSKY V M, DIANOV E M, *et al.*. Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD Bismuth-doped silica glass optical fibres[C]. 31st European Conference on Optical Communications, 2005, 4: 949-950.
- [5] KUWADA Y, FUJIMOTO Y, NAKATSUKA M. Ultrawideband light emission from bismuth and erbium doped silica[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46**: 1531-1532.
- [6] CHI Guang-wei, XIONG Da-min, ZHOU Da-cheng, *et al.* Optical basicity dependence on broadband infrared fluorescence in Bi-doped germanate glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(s1): 235-238.
迟光伟, 熊大民, 周大成, 等. 光学碱度对铋掺杂玻璃红外宽带发光的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(s1): 235-238.
- [7] PENG Ming-ying, ZHANG Na, WONDRACZEK L, *et al.* Ultrabroad NIR luminescence and energy transfer in Bi and Er/Bi co-doped germanate glasses[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20799-20807.
- [8] LUO Yan-hua, WEN Jian-xiang, ZHANG Jian-zhong, *et al.*. Bismuth and erbium codoped optical fiber with ultrabroadband luminescence across O-, E-, S-, C-, and L-bands[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(6): 3447-3449.
- [9] ZHANG Jian-zhong, SATHI Z M, LUO Yan-hua, *et al.* Toward an ultra-broadband emission source based on the Bismuth and Erbium co-doped optical fiber and a single 830nm laser diode pump[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 7786-7792.
- [10] BUFETOV I A, MELKUMOV M A, FIRSTOV S V, *et al.* Bi-doped optical fibers and fiber lasers[J]. *IEEE Journal of*

- Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 0903815.
- [11] PENG Ming-ying, ZHAO Quan-zhong, QIU Jian-rong, *et al.* Generation of emission centers for broadband NIR luminescence in bismuthate glass by femtosecond laser irradiation[J]. *Journal of American Ceramic Society*, 2009, **92**(2): 542-544.
- [12] EHRT D. Structure, properties and applications of borate glasses[J]. *Glass Tech*, 2000, **41**(6): 182-185.
- [13] FIRSTOV S V, KHOPIN V F, BUFETOV I A, *et al.* Combined excitation-emission spectroscopy of bismuth active centers in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(20): 19551-19561.
- [14] HAU T M, YU Xue, ZHOU Da-cheng, *et al.* Super broadband near-infrared emission and energy transfer in Bi - Er co-doped lanthanum aluminosilicate glasses [J]. *Optical Materials*, 2013, **35**(3): 487-490.
- [15] LIU Lan-lan, YANG Wei, WU Chong-qing, *et al.* Active spontaneous emission of EDF pumped by arbitrary waveform pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1206001.
刘岚岚, 杨伟, 吴重庆, 等. 任意波形脉冲泵浦下掺铋光纤的自发辐射[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1206001
- [16] PENG Ming-ying, DONG Guo-ping, WONDRACZEK L, *et al.* Discussion on the origin of NIR emission from Bi-doped materials [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, **357**: 2241-2245.
- [17] SOKOLOV V O, PLOTNICHENKO V G, DIANOV E M. The origin of near-IR luminescence in bismuth-doped silica and germania glasses free of other dopants First-principle study[J]. *Optical Materials Express*, 2013, **3**(8): 1059-1074.
- [18] DIANOV E M. Amplification in extended transmission bands using Bismuth-doped optical fibers[J]. *Journal of Lightwave and Technology*, 2013, **31**(4): 681-688.
- [19] SATHI Z M, ZHANG Jian-zhong, LUO Yan-hua, *et al.* Spectral properties and role of aluminium-related bismuth active centre (BAC-AD) in bismuth and erbium co-doped fibres [J]. *Optical Materials Express*, 2015, **5**(5): 1195-1209.
- [20] HE Xi-jia, ZHOU Da-cheng, LI Chen, *et al.* Bi-doped and Bi/Er co-doped calcium aluminum germanate glasses with ultra-broadband infrared luminescence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0316001.
何禧佳, 周大成, 李臣, 等. Bi 和 Bi/Er 共掺钙铝锗酸盐玻璃的超宽带红外发光[J]. *光子学报*, 2014, **43**(3): 0316001.