

355 nm 激光抽运的双包层掺铒光纤荧光

赵俊清 阮双琛 郭春雨 张 敏

(深圳大学深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 以 355 nm 激光器抽运源抽运合作拉制的国产双包层掺铒光纤(DC-EDF), 获得了可见光及近红外波段的荧光输出。经实验测定, 对于长约 8 m 的 DC-EDF, 在 429 mW 入纤功率抽运下, 可见光区的荧光波长约从 375 nm 延续到 800 nm。荧光峰分别位于 397.24、415.06、456.30、497.35、549.49、678.26 nm。近红外波段的荧光谱约从 1429.25 nm 延续到 1667.75 nm, 激发峰处于 1551.76 nm。近红外波段荧光峰的位置和谱宽依赖于光纤长度, 荧光谱宽经测定也随抽运功率的增加而加宽。实验结果证明 355 nm 激光可以作为掺铒光纤的一种抽运源, 为传统掺铒光纤光源提供了一种新的抽运选择, 也为新波段光源的开发提供了实验基础。

关键词 激光器; 双包层掺铒光纤; 355 nm; 荧光

中图分类号 TN204 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0502010

Fluorescence Emission from a 355-nm Laser Pumped Double-Cladding Erbium-Doped Fiber

Zhao Junqing Ruan Shuangchen Guo Chunyu Zhang Min

(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University,
Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Using a 355-nm laser to pump a home-made double-cladding erbium-doped fiber (DC-EDF), visible and near-infrared fluorescence emissions are obtained. For a 8-m long DC-EDF, visible fluorescence can cover the wavelength region from 375 nm to 800 nm under 429 mW launched pump power, in which the fluorescence peaks are at 397.24, 415.06, 456.30, 497.35, 549.49, 678.26 nm. The near-infrared fluorescence ranges from 1429.25 nm to 1667.75 nm. The peaks and band-widths in the near infrared region are strongly dependent on the length of the DC-EDF. We also observe the broadening of bandwidth when the launched pump power is enhanced. Our results demonstrate that the 355-nm laser can be utilized to pump EDF, which provides a new approach for the traditional EDF light sources. Development of light sources operating at new-wavelength band is possible according to experimental results.

Key words lasers; double-cladding erbium-doped fiber; 355-nm; fluorescence

OCIS codes 140.5560; 140.3510; 140.3500

1 引 言

掺铒光纤激光器或放大器一直是人们研究的重要内容。目前, 新材料、新器件的发现和现象的成功应用, 仍是研究的热点之一^[1~7]。目前, 大多数掺铒光纤激光器用 980 nm^[1] 或 1480 nm^[2,8] 激光器来抽运。在早期的抽运探索中, 人们也曾尝试过

其他波段的抽运源。Chen 等^[9] 利用发射波长为 532 nm 的二倍频 Nd:YAG 激光器作为抽运源, 获得了 1522~1567 nm 范围内可调谐掺铒光纤激光器。Fermann 等^[10] 利用 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器和 820 nm 的染料激光器来抽运 Yb³⁺ 敏化的掺铒光纤, 获得了阈值分别低于 7 mW 和 4 mW 的低阈

收稿日期: 2012-11-10; 收到修改稿日期: 2012-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61275144)资助课题。

作者简介: 赵俊清(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: zhaojunqing2009@163.com

导师简介: 阮双琛(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器及超连续谱等方面的研究。

E-mail: scruan@szu.edu.cn(通信联系人)

值 $1.56 \mu\text{m}$ 激光输出。Grubb 等^[11] 也利用运行波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光抽运掺铒光纤, 获得了 21 dBm 的输出功率。Barnes 等^[12] 利用波长约 810 nm 和 826 nm 的激光器抽运掺 Er 纤和 Er-Yb 共掺光纤获得了 $1.57 \mu\text{m}$ 的激光输出。Horiguchi 等^[13] 利用 670 nm 的半导体 AlGaInP 激光器抽运掺铒光纤, 获得了在 1535 nm 处信号增益为 33 dB 的掺铒光纤放大器。Giles 等^[14] 利用波长为 648 nm 的多量子阱半导体激光器抽运掺铒光纤, 获得了 1559 nm 的单频激光^[14]。以上这些使用过的抽运带通常用以获得 1550 nm 附近的荧光或激光输出, 要获得更短波长输出, 目前只能通过频率上转换过程^[15,16]。除此之外, 要获得通过短波长的光纤激光器, 就需要更短波长的抽运源, 以便实现“下转换”输出。这些曾经使用过的抽运带均处于可见光和近红外波段, 波长短于 500 nm 的激光器用于抽运源尚未报道。本文首次探索以成熟的 355 nm 紫外(UV)激光为抽运源来抽运掺铒光纤, 并得到了较宽范围内的荧光输出, 为进一步的实验提供了参考。

2 实验装置

如图 1(a) 所示, Nd:YAG 激光器经晶体三倍频后可以获得 355 nm 的激光输出, 记为 Nd:YAG(3)。然而, 由于基频光 1064 nm 和二倍频光 532 nm 仍会存在少许输出, 为保证实验结果确为 355 nm 激发的结果, 用一片融石英镀膜的二色镜(DM)安装在激光器的输出端以滤去基频光和二倍频光, 该二色镜对 355 nm 激光高透(HT), 同时对 1064 nm 基频光和 532 nm 二倍频光高反(HR)。经二色镜滤光后就能得到单一的 355 nm 激光, 然后经一焦距 f 为 50 mm 的透镜耦合到约 8° 磨角的双包层掺铒光纤中(DC-

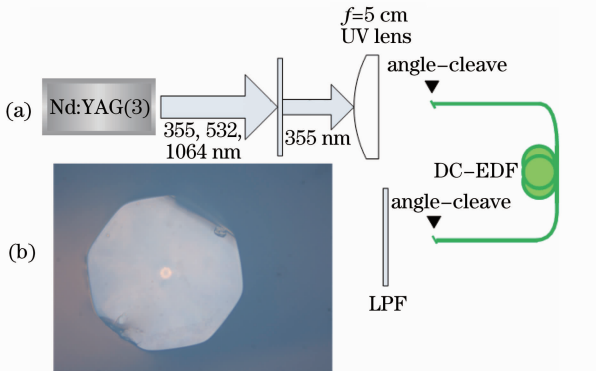


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

EDF)。通常情况下, 经 DC-EDF 后仍会有部分 355 nm 激光未完全被铒离子吸收, 为滤去该部分多余的抽运光, 将一长波通滤光片(LPF)安装在光纤输出端。图 1(b) 为所用 DC-EDF 的端面图。内包层为正八边形结构, 八边形对边距离约为 $393 \mu\text{m}$, 最长对角线约为 $405 \mu\text{m}$ 。内包层的数值孔径约为 0.46 。纤芯直径约为 $30 \mu\text{m}$, 数值孔径约为 0.2 。光纤的外包层直径约为 $480 \mu\text{m}$, 端面图中未能显示。

3 结果与讨论

图 2 为在 272 mW 入纤抽运功率下, 光谱仪测得的可见光波段的荧光光谱。 355 nm 处的光谱是由于滤光片未能完全滤掉 355 nm 激光的缘故。由图可见荧光光谱很宽, 从 375 nm 一直延续到 800 nm , 覆盖了整个可见光波段。如此宽的荧光光谱原因在于 355 nm 光子将电子从基态 $^4I_{15/2}$ 激发到高能级 $^2G_{7/2}$ 上, 而该能级寿命较短, 经历短暂的停留, 电子迅速向下跃迁到较低能级上, 停留在不同能级上的电子往基态跃迁时就会产生不同波长的荧光。因 355 nm 光子能量较大, 故能使电子可能停留的能级也较多, 从而得到较多的跃迁发射谱。荧光峰的位置分别处于 $397.24, 415.06, 456.30, 497.35, 549.49, 678.26 \text{ nm}$, 这些峰的强度从短波到长波依次减弱。图 3(b) 为 355 nm 抽运下的 DC-EDF 拍摄图。图 3(a) 为相应的输出光斑情况, 一定程度上反应了荧光的分布情形。中心近于白色的光是所有波长的荧光叠加的结果, 光斑中蓝紫光占据了大部分, 这正是两个主要荧光峰位于 397.24 nm 和 415.06 nm 的缘故。边缘较弱的红光是可见光区较弱长波红光的分量。 397.24 nm 和 415.06 nm 荧光谱线分别对应于 $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 和 $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 的能级跃迁。其余 4 个荧光峰对应的能级跃迁分别为 $^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}, ^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}, ^4S_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$

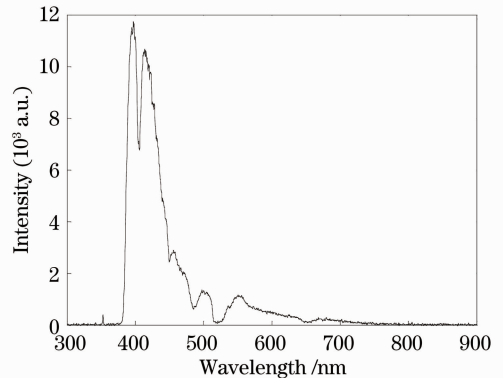


图 2 可见光波段的荧光发射谱
Fig. 2 Visible fluorescence emission spectrum

和 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 。与铒离子本身的跃迁能级相比,这些发射峰均有10 nm左右的长波偏移(红移)。主要原因有:1)铒离子与光纤基质之间的相互作用引起

能级一定量的偏移,致使发射峰移动;2)激发出的荧光在光纤中传输的各种相互作用也会引起一定的波长漂移。

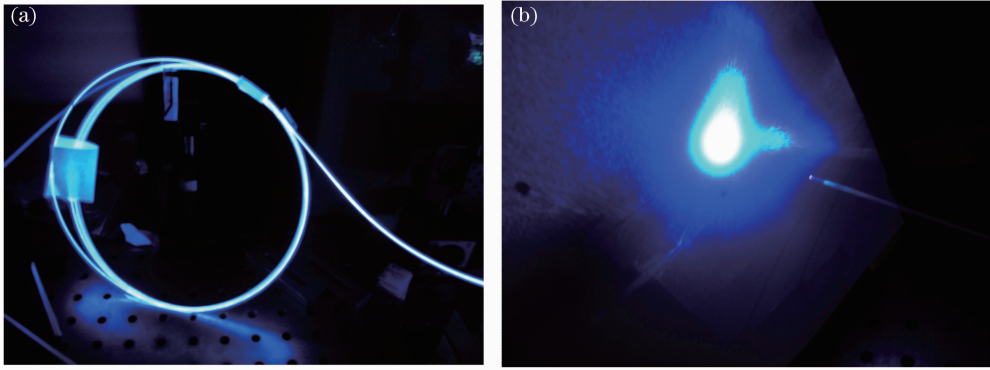


图3 (a) 355 nm 抽运 DC-EDF 情形; (b) 输出光斑

Fig. 3 (a) DC-EDF pumped at 355 nm; (b) emission spot

图4为近红外波段的荧光谱情况。该波段的荧光谱源于 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的能级跃迁。该跃迁是目前远程光通信波段掺铒光纤激光器和放大器的工作基础,而这些器件的成功开发正是目前广泛应用的C和L波段通信的根本。由于 ${}^4I_{13/2}$ 能级丰富的亚能级结构和在硅基玻璃光纤中较长寿命的亚稳态,致使该波段的发射谱范围较宽。荧光谱的峰值和带宽与光纤长度有关,如图4(a)所示。在325 mW入纤功率下,随着光纤长度的增加,荧光峰往长波方向移动,且荧光谱宽也随之增加。实验中当光纤长度分别为1、4、8 m时(此时入纤功率均约为272 mW),荧光峰分

别处于1526.25、1544.38、1551.76 nm,对应的光谱3 dB带宽分别约为58、72、84 nm。而在光纤长度一定的情况下,如图4(b)所示,随着抽运功率的增加,荧光谱的中心波长是基本不变的,带宽则是随功率增加而加宽的。实验中,所用光纤长度为4 m,当入纤抽运功率为59、100、202 mW时,对应产生荧光的3 dB带宽分别约为65、68、70 nm。其原因是更大的抽运功率使得更多的电子处于 ${}^4I_{13/2}$ 的子能级,进而使得亚能级跃迁电子增加,但中心跃迁却是不变的。

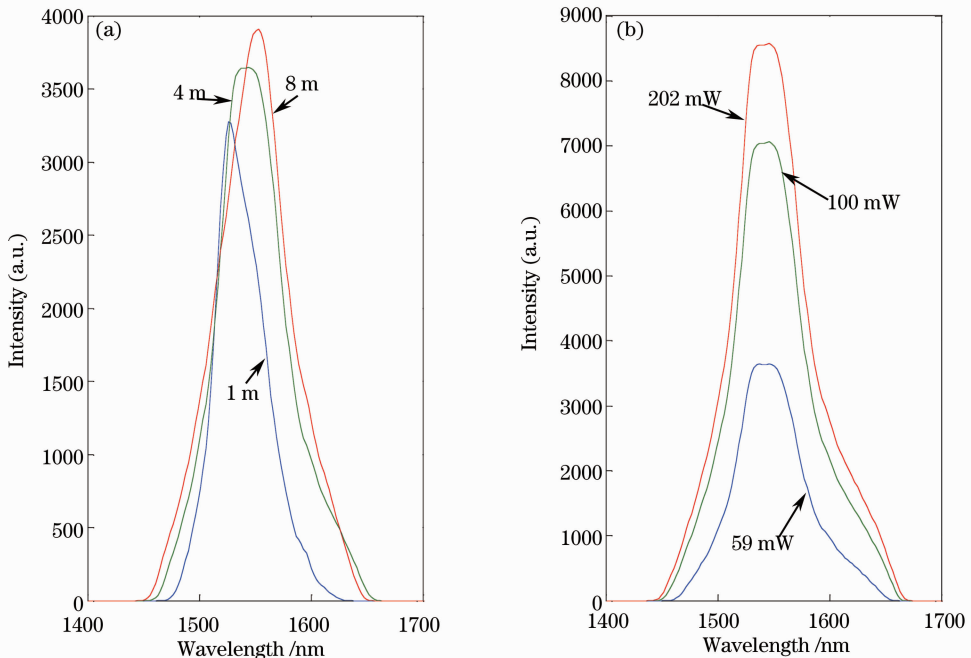


图4 (a)不同长度和(b)不同入纤抽运功率时的近红外波段荧光发射谱

Fig. 4 Near-infrared fluorescence emission spectra at (a) different lengths and (b) different launched pump powers

4 结 论

利用 355 nm 激光器作为抽运源,抽运双包层掺铒光纤,获得了覆盖全可见光波段以及光通信波段的荧光输出。基于能级理论以及电子和光纤基质的相互作用,对不同波长荧光激发的机理进行了探讨。实验中发现 355 nm 抽运下通信波段荧光对光纤长度的依赖性和对入纤功率的相关性,并做了详细分析。实验结果证明 355 nm 激光器可作为掺铒光纤的一种新的抽运选择,在新的掺铒光纤激光器和掺铒光纤荧光光源方面具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- 1 A. B. Sulaiman, S. W. Harun, H. Arof *et al.*. Compact and tunable erbium-doped fiber laser with microfiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, **48**(9): 1165~1168
- 2 Weiqing Gao, Meisong Liao, Hiroyasu Kawashima *et al.*. Switchable different operation states in an erbium-doped fiber laser cavity with normal dispersion [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(18): 3809~3815
- 3 Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan *et al.*. Graphene mode locked Er³⁺ doped fiber pulse laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302004
田 振, 刘山亮, 张丙元等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302004
- 4 Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei *et al.*. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702010
周会娟, 陈 默, 陈 伟等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702010
- 5 Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang *et al.*. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602010
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光

- 纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602010
- 6 Yang Rong, Zhang Li, Yang Lingzhen. Experimental investigation on multi-wavelength chaos of erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0114001
杨 蓉, 张 丽, 杨玲珍. 多波长混沌掺铒光纤环形激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0114001
- 7 Wu Xu, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang *et al.*. Experimental investigation on superfluorescent sources based on photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0306005
吴 旭, 阮双琛, 刘承香等. 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0306005
- 8 Qiaoliang Bao, Han Zhang, Yu Wang *et al.*. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, **19**(19): 3077~3083
- 9 C. Y. Chen, M. M. Choy, M. J. Andrejco *et al.*. A widely tunable erbium-doped fiber laser pumped at 532 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(1): 18~20
- 10 M. E. Fermann, D. C. Hanna, D. P. Shepherd *et al.*. Efficient operation of an Yb-sensitised Er fibre laser at 1.56 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(18): 1135~1136
- 11 S. G. Grubb, W. F. Humer, R. S. Cannon *et al.*. +21 dBm erbium power amplifier pumped by a diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 553~555
- 12 W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend *et al.*. Er³⁺-Yb³⁺ and Er³⁺ doped fiber lasers [J]. *IEEE J. Lightw. Technol.*, 1989, **7**(10): 1461~1465
- 13 M. Horiguchi, K. Yoshino, M. Shimizu *et al.*. 670 nm semiconductor laser diode pumped erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(7): 593~595
- 14 C. R. Giles, V. Mizrahi. Single-frequency 1559-nm erbium-doped fiber laser pumped by a 650-nm semiconductor laser [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5859~5861
- 15 S. Ferber, V. Gaebler, H. Eichler. Violet and blue upconversion-emission from erbium-doped ZBLAN-fibers with red diode laser pumping [J]. *Opt. Mater.*, 2002, **20**(3): 211~215
- 16 S. S. Abbas, S. Popov. Compact Er³⁺-doped ZBLAN green upconversion fibre laser [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, **54**(145): 756~758

栏目编辑: 王晓瑛