

全光纤同带泵浦宽带掺镱超荧光光纤光源的实验研究

娄淑琴, 阮楚君, 王 鑫

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 采用自制的 1 018 nm 光纤激光器做泵浦源, 建立了全光纤同带泵浦的宽带掺镱超荧光光纤光源实验系统, 首次利用同带泵浦对单程前向结构的超荧光产生进行了深入的实验研究。研究结果表明: 基于同带泵浦的掺镱超荧光光源的斜率效率高达 88%, 半极大全宽度 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 最宽可以达到 14.81 nm。掺镱光纤长度的改变, 将影响超荧光光源的最大输出功率、斜率效率及中心波长, 随着掺镱光纤长度的增加, 最大输出功率和斜率效率下降, 中心波长红移。固定光纤长度, 改变泵浦功率, 随着泵浦功率的增加, 超荧光的最大功率和 FWHM 增加, 光谱中心波长偏移很小。在掺镱光纤长度为 5.7 m 时, 超荧光光源的最宽 FWHM 为 14.81 nm, 斜率效率在 80.3% 以上, 输出功率的波动小于 1%, 没有驰豫振荡出现。

关键词: 超荧光光纤光源; 全光纤; 同带泵浦; 掺镱光纤; 宽带

中图分类号: TN245 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0802001

Experiment study on all-fiberized tandem pump broadband superfluorescent fiber source based on single stage Yb-doped fiber

Lou Shuqin, Yuan Chujun, Wang Xin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With a homemade 1 018 nm fiber laser, an all-fiberized tandem pump broadband superfluorescent fiber source (SFS) based on single stage Yb-doped fiber was set up experimentally. It is the first time to experimentally investigate the generation of forward superfluorescence by utilizing tandem pump in detail. Experimental results demonstrate the highest slope efficiency of 88% and the widest full width at half maximum (FWHM) of 14.81 nm for this all-fiberized tandem pump broadband SFS. The length of Yb-doped fiber would affect the maximum of output power, slope efficiency and the central wavelength. With an increase in the length of Yb-doped fiber, the maximum of output power and slope efficiency of the SFS are reduced. The central wavelength shifts towards the longer wavelength. With an increase of the pump power at a certain fiber length, the maximum of output power and slope efficiency of the SFS increase. The central wavelength of superfluorescent spectrum has a slight shift. When 5.7 m Yb-doped

收稿日期: 2016-08-02; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475016)

作者简介: 娄淑琴(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电子器件及新型微结构光纤方面的研究。

Email: shqlou@bjtu.edu.cn

通讯作者: 王鑫(1989-), 女, 讲师, 博士, 主要从事特种光纤及器件的研究。Email: xinwangbjtu@outlook.com

fiber is employed as the active medium, the widest FWHM is 14.81 nm and the slope efficiency is above 80.3%. The fluctuation of the output power is less than 1% and no self pulsing or relaxation oscillation effect is observed.

Key words: superfluorescent fiber source; all-fiber; tandem pump; Yb-doped fiber; broadband

0 引言

宽带超荧光光源,是光纤陀螺、拉曼激光器泵浦和光学相干层析成像等系统中的关键部件。产生宽带超荧光的主要方法,是利用稀土掺杂光纤或半导体器件中的放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE)。超荧光二极管是目前主流的超荧光光源,但存在寿命短、波长稳定性差、输出功率低、空间相干性差及与单模光纤耦合等问题。超荧光光纤光源 (Superfluorescent Fiber Sources, SFSs) 则具有输出光谱宽、光-光转化效率高、时间相干度低、方向性好,以及优异的空间相干性和温度稳定性等优势,可有效地降低瑞利散射引起的相位噪声和相干背向散射噪声,以及克尔效应引起的相位零漂移等的影响。利用不同稀土掺杂光纤以获取不同波段的宽谱超荧光输出,目前已成为广泛关注的研究方向之一。

受光纤通信发展的推动,掺铒超荧光光纤光源的研究较多^[1-6],但铒离子能级结构简单,具有吸收和发射截面宽等方面的优势,近年来吸引了一些研究者的关注。2006年,P. Wang 等人利用一种双包层掺铒多模偏芯光纤,获得了光谱半极大宽度 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 为 40 nm 的双向输出的 ASE 光源,正反向输出功率分别为 47 W 和 63 W^[7]。同年,他们利用螺旋芯的双包层掺铒光纤,获得 107 W 双端输出^[8]。2011年 O. Schmidt 等以二级结构实现了功率为 697 W 窄带超荧光输出^[9]。这些超荧光系统均为分立的结构,存在体积及可靠性等方面的问题。2011年,Q. Xiao 等采用侧面泵浦,提出全光纤掺铒超荧光光源,实现了 68.3 W 的 ASE 双端输出^[10]。2012年,Y. Cao 等基于掺铒双包层光纤、低功率种子源加一级单程放大,获得了百瓦级掺铒超荧光光源^[11]。2014年,Y. An 等利用分布式侧面耦合包层泵浦光纤 (GT-Wave) 实现了 102 W 的双端 ASE 输出^[12]。2015年,J. Xu 等人利用全光纤三级主振功率放大结构,实现了 1.87 kW 级 ASE 光源输出,FWHM 为 1.7 nm,

斜率效率为 77.4%。这是目前报道的最高输出功率的全光纤超荧光光源^[13]。

随着双包层掺铒光纤 (Yb³⁺-doped fiber, YDF) 制造工艺的提高和泵浦技术的发展,双包层 YDF 超荧光光源的输出功率在不断提升。但是,目前报道的高功率掺铒超荧光光源,采用的均为激光二极管的 976 nm 波长的泵浦,伴随以至少 10% 的量子损耗。随着系统功率的进一步提高,YDF 中热载荷管理难度加大,极易引发光纤或元器件损伤,同时非线性及热效应等问题已成为发展瓶颈。同带泵浦,量子损耗减小,可有效降低热载荷管理的难度,获得比 976 nm 波长泵浦方式更高的光-光转换效率。2009年,E. Stiles 等采用同带泵浦,利用一个 1 020 nm 波长的 YDF 激光器泵浦另一个 YDF 激光器,获得了高达 10 kW 的激光输出^[14]。目前,同带泵浦方面的研究报道,主要集中在高功率光纤激光器研究方面,应用于掺铒超荧光光纤光源方面的研究,尚未见报道。

利用自制的 1 018 nm 波长的掺铒光纤激光器作为泵浦源,文中首次开展了同带泵浦的全光纤掺铒超荧光光纤光源的实验研究。实验结果表明,同带泵浦可有效地获得超荧光输出,系统的斜率效率高。另外,还针对泵浦功率及 YDF 长度等主要影响因素进行了深入的实验研究。研究工作为进一步开展同带泵浦、高功率、高稳定性的超荧光光纤光源进行了有益的探索,可为同行研究工作提供借鉴。

1 实验装置

建立的全光纤同带泵浦掺铒超荧光光纤光源实验系统如图 1 所示。实验中选用的 YDF 是 Nufern 公司的一种双包层掺铒增益光纤 (LMA-YDF-10/130-M),在波长 1 018 nm 处的平均纤芯吸收系数为 40 dB/m。为抑制由光纤端面反射引起的寄生振荡,提高激光阈值功率,实验中对光纤输出端面做切斜角处理,角度为 10.5°。泵浦源采用自制的 1 018 nm 波长光纤激光器,泵浦光经过 1 018 nm 波长光隔离器 (ISO,

Isolator) 注入到四端口 1 018/1 080 nm 波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM), 通过 WDM 端口 port1 端面耦合入 YDF 纤芯。在 WDM 与增益光纤 YDF 的熔点处, 采用折射率匹配液滤除泄漏到光纤包层的泵浦光。整个光源系统放置在铝板制成的热沉上。泵浦光功率及光源系统输出光功率均由一个 20 W 激光功率/能量计测量, 光源系统输出光谱由光谱仪(AQ6370C)测量。自制的 1 018 nm 泵浦源的 FWHM 为 0.30 nm, 最大输出功率为 13.9 W, 经过光隔离器后为 10.75 W。1 018/1 080 nm WDM 分光比为 99:1, Port1 和 Port2 为 1 018 nm 端口, Port3 和 Port4 为 1 080 nm 端口。实验中, Port3 用于监测反向 ASE, Port4 则用于监测泵源的稳定性。

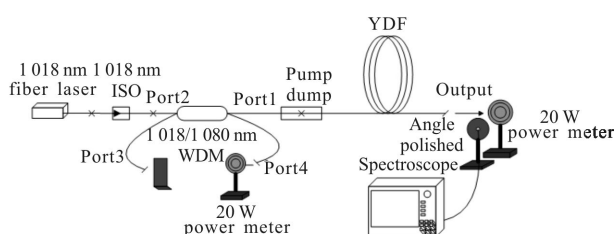


图 1 同带泵浦超荧光光纤光源实验装置示意图

Fig.1 Experimental setup of tandem pump superfluorescent fiber source

2 实验结果与讨论

基于速率方程, 采用仿真软件 RP Fiber Power, 对实验系统进行模拟分析。数值仿真结果显示, 将功率为 10.75 W 的泵浦光完全吸收, 需要的 YDF 长度为 4.4 m。因此, 首先采用了 4.4 m 的 YDF 进行同带泵浦实现超荧光光谱的可行性验证。

改变泵浦功率, 观察实验系统的输出光谱, 图 2 是在 3 种不同泵浦功率下的正向 ASE 光谱输出。

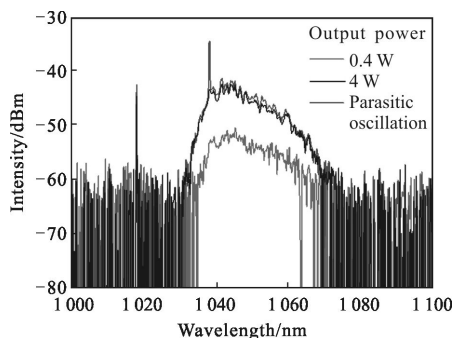


图 2 YDF=4.4 m, 正向 ASE 输出光谱

Fig.2 Output spectrum of forward ASE when YDF is 4.4 m

逐渐增加泵浦功率, 当泵浦功率达到 0.78 W 时, 出现 ASE 谱, 此时 ASE 的中心波长为 1 043.29 nm, FWHM 为 6 nm, 但输出功率只有 0.4 W。当泵浦功率提高为 4.55 W 时, 输出功率也随之增加到 4 W, 光谱范围从 1 033~1 068 nm, 中心波长几乎没有移动, FWHM 增宽到 6.82 nm。线宽之所以有所增加, 是因为镱离子对不同波长的吸收不同, 随着泵浦功率的增大, 越来越多的波长被吸收激发出超荧光, 拓宽了 ASE 光谱。泵浦功率继续增加, 输出最大功率不再增大。当泵浦功率增加到 4.83 W 时, 寄生振荡开始出现。图 3 给出了输出功率随泵浦功率的变化曲线。可见, ASE 输出功率随泵浦功率的增加呈近线性增长, 在出现寄生振荡之前对应的 ASE 最大输出功率为 4 W, 对应斜率效率约为 88%。上述实验结果说明, 利用同带泵浦可以获得超荧光, 而且其斜率效率比现有 976 nm 的泵浦方式要高。

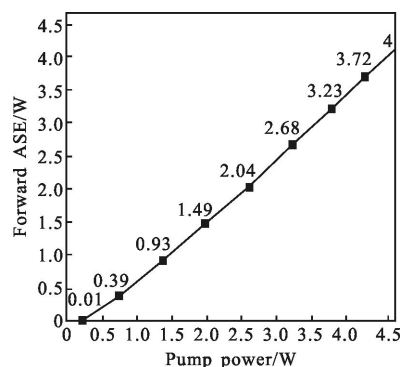


图 3 在 YDF 长度为 4.4 m 时, 正向 ASE 输出功率随泵浦功率变化关系

Fig.3 Output power of forward ASE at different pump powers when the length of YDF is 4.4 m

为获得更宽的 ASE 谱, 对不同长度 YDF 的影响进行了实验研究。选择 4.7 m、5.7 m 和 6.7 m 的 3 个不同的 YDF 长度, 分别进行实验。图 4 为泵浦功率为 3.5 W 时 ASE 光谱随 YDF 长度的变化。可见, YDF 长度由 4.7 m 增加至 6.7 m 时, ASE 中心波长向长波长方向移动, 从 1 044.79 nm 移至 1 051.90 nm, FWHM 也由 9.04 nm 扩展至 14.81 nm; 当 YDF 长度为 5.7 m 时, 输出光谱最宽且最平坦。图 5 为输出功率随泵浦功率在不同 YDF 长度下的变化关系。可见, 尽管 YDF 长度不同, 输出功率随泵浦功率的变化仍保持近线性增加关系, 但随着 YDF 长度增

加,最大输出功率由 4 W 减少至 2.8 W,斜率效率也由 88%减至 80%。实验结果的主要指标如表 1 所示。

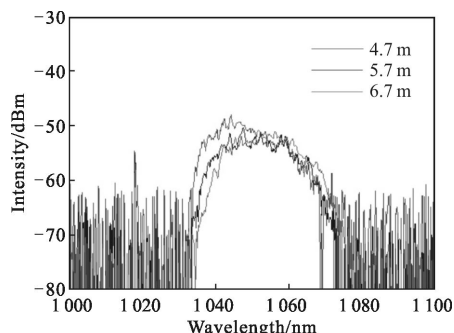


图 4 3 种不同光纤长度下的正向 ASE 输出光谱

Fig.4 Output spectrum of forward ASE at three different fiber lengths

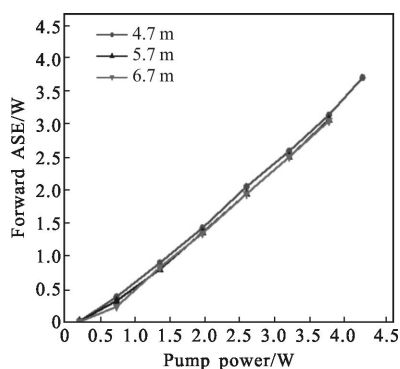


图 5 3 种不同光纤长度下,正向 ASE 输出功率随泵浦功率变化关系

Fig.5 Output spectrum of forward ASE at different pump powers with three fiber lengths

表 1 4 种长度光纤对应的 ASE 实验结果

Tab.1 Experimental results of output ASE with four fiber lengths

Fiber lengths /m	Pump powers /W	Output spectrum of forward ASE powers/W	Maximum slope efficiency	FWHM/nm
4.4	4.55	4	88%	6.82
4.7	4.02	3.45	85.8%	9.32
5.7	3.5	2.81	80.3%	14.81
6.7	3.5	2.8	80%	13.33

可见,随着 YDF 长度的增加,正向 ASE 中心波长向长波方向移动,光谱也变得更为平坦,发生寄生振荡的激光阈值有所下降。中心波长红移的主要原因应是受二次吸收的影响,即随着泵浦光向前传输

被不断吸收,ASE 中的短波长光被二次吸收成为同带泵浦光产生了中心波长红移动的 ASE,因此,随着 YDF 长度的增加,会出现中心波长红移动,光谱变得更为平坦,正向 ASE 总强度降低等现象。

下面针对输出光谱最宽且最平坦的 YDF 长度为 5.7 m 的情况,进一步讨论不同泵浦光功率对其 ASE 的输出特性的影响。图 6 反映了输出功率和光-光转换效率随泵浦光功率的变化关系。随着泵浦功率的增加,ASE 的输出功率呈线性增加,但转换效率是非线性变化的,从 9.5%到趋于饱和的 80.3%,产生的主要原因是随着泵源的驱动电流的增加,中心波长因温度的升高而有少量频移,而增益光纤对于不同波长的泵浦光的吸收系数是不同的,导致转换效率不按线性关系增加。

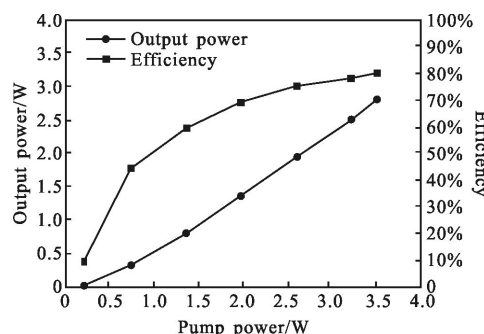


图 6 YDF=5.7 m,输出功率和光-光转换效率随泵浦光功率的变化

Fig.6 Output power and optical-to-optical conversion efficiency at different pump powers when YDF is 5.7 m

图 7 反映了不同输出功率时的 ASE 光谱,由此可以看出,随泵浦功率的增加,中心波长从 1 050.97 nm 频移至 1 051.06 nm,FWHM 则由 12.29 nm 扩展至 14.53 nm;当泵浦功率为 3.5 W 时,输出功率达到最大,此时所对应的输出功率为 2.81 W,FWHM 为 14.81 nm,如图 8 所示。可见,当 YDF 的长度固定时,泵浦光功率的变化也会影响 ASE 光谱的中心波长和带宽。存在此现象的原因是镱离子对不同波长吸收光子的能力不同,各波长存在着竞争。当泵浦功率较低时,吸收光子能力强的波长能在初期便产生自发辐射并被放大,而随着泵浦功率的不断增大,越来越多的波长能吸收光子而激发出超荧光,导致 ASE 的中心波长产生变化,同时 ASE 光谱也实现了展宽。

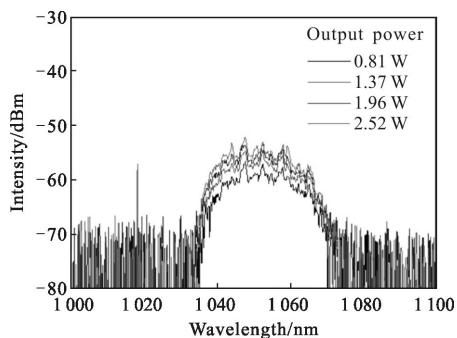


图 7 YDF=5.7 m,不同输出功率时的 ASE 光谱

Fig.7 Output spectrum of ASE at different output powers when

YDF is 5.7 m

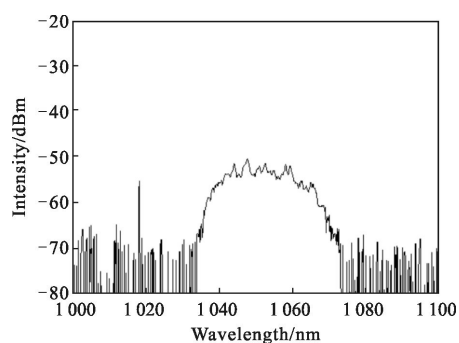


图 8 YDF=5.7 m,最大输出功率(2.81 W)时的 ASE 光谱

Fig.8 Output spectrum of ASE at maximum output powers when

YDF is 5.7 m

功率稳定性是超荧光光源的一个重要指标。在 YDF 长度为 5.7 m 时,实验测量了在最大输出功率 2.81 W 下的功率稳定性。连续运行 60 min,并每隔 5 min 记录一次最大输出功率值,测量结果如图 9 所示。可见,在最大输出功率(2.81 W)时,功率波动小于 1%,而且整个运行过程中也没有弛豫振荡现象出现。

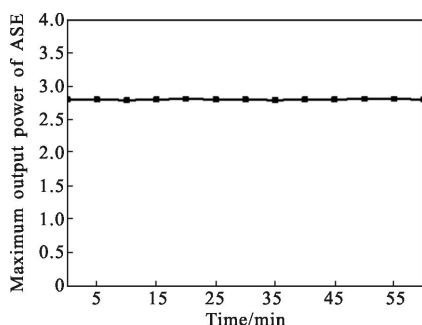


图 9 YDF=5.7 m,最大输出功率时的时间稳定性

Fig.9 Temporal stability at maximum output powers when YDF

is 5.7 m

在上述的输出光谱中,除了有较宽的 ASE 以

外,1 018 nm 的光也出现在其中,不管是改变泵浦功率还是光纤长度,1 018 nm 光都一直存在于光谱之中。分析其原因,可能是有一小部分泵浦光在刚进入 YDF 时就已经泄露到光纤包层中,而低的包层吸收系数又无法将此部分光吸收。为了对此进行验证,在熔点处加入高折射率匹配液来尝试滤除泄露到包层的泵浦激光。图 10 是光纤为 5.7 m 时,加入折射率匹配液前后的输出光谱,可以看出,经过包层光滤除处理,1 018 nm 光从输出光谱中消失了。

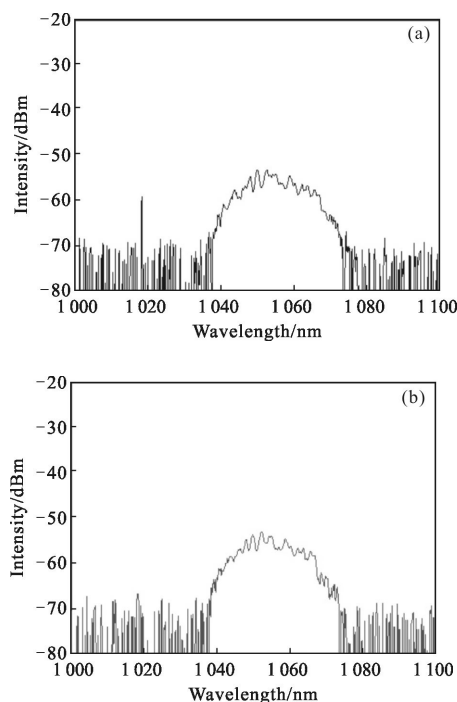


图 10 YDF=5.7 m,加折射率匹配液前后的输出光谱

Fig.10 Output spectrum before/after adding refractive index

matching liquids when YDF is 5.7 m

另外,在 1 018/1 080 nm WDM 的 Port 3 端口对反向 ASE 的进行监测,实验过程中无论改变光纤长度还是改变泵浦功率,最大输出功率仅为 0.02 W,这与 976 nm 泵浦的双端输出实验结果不同。其主要原因是文中建立的实验系统是采用 1 018/1 080 nm WDM 作为泵浦合束器,一方面,1 018/1 080 nm WDM 对传输的光有 5 nm 的带宽限制,只有波长在 1 013~1 023 nm 和 1 075~1 085 nm 的范围内的光,才能低损耗通过 WDM。而实验中产生的大部分反向 ASE 波长范围都不在 WDM 的允许范围内而被隔离,以保证实验只能输出正向 ASE 光。WDM 除了作为泵浦合束器以外,还被作为反向 ASE 的隔离器起到保护

泵源的作用。另一方面,虽然因 1 018/1 080 nm WDM 的使用而无法获得反向 ASE 光,但由于其尾纤参数与 YDF 参数一致,因此,可以使更多的泵浦光用于纤芯泵浦,提高系统整体的效率。

3 结 论

文中建立全光纤同带泵浦掺镱光纤超荧光光源实验装置,首次开展了基于同带泵浦获得超荧光光源的实现。研究表明,利用同带泵浦可以获得高的泵浦效率,在没有自激振荡出现的前提下,获得最高的光光转换效率可以达到 88%。实验研究了不同光纤长度和不同泵浦功率对输出的超连续谱的影响,随着光纤长度的增加,最大输出功率从 4 W 降低到 2.79 W,同时斜率效率从 88% 减小到 80%。前向 ASE 的中心波长从 1 043.3 nm 移到 1 051 nm,而 FWHM 从 6 nm 增加到 14.81 nm。在泵浦功率为 3.5 W 时,获得最大输出功率 2.81 W,FWHM 为 14.81 nm,斜率效率在 80.3% 以上。此外,实验在 1h 内以 5 min 的测量了超荧光光纤的输稳定性,实验结果表明,输出功率的波动小于 1%,没有寄生振荡出现。如要获得更高的功率输出可以采用多级放大结构以及采用其他措施来提高产生激光的阈值。

参考文献:

- [1] Huang W, Ming H, Xie J, et al. High efficiency broad bandwidth erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(6): 311-313.
- [2] Wang L, Lee C, You G. Polarized erbium-doped superfluorescent fiber source utilizing double-pass backward configuration[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 77-82.
- [3] Park H, Yun S, Jin Y. Er-doped superfluorescent fiber source with thermally stable mean wavelength[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(2): 240-244.
- [4] Lin H, Chang C. High power C+L-band Erbium ASE source using optical circulator with double-pass and bi-directional pumping configuration [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (25): 6135-6140.
- [5] Wu X, Ruan S, Liu C. High-stable and broadband erbium-doped superfluorescent photonic crystal fiber source [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 095005.
- [6] Wu X, Ruan S, Liu C. High-stability erbium-doped photonic crystal fiber source[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13): 2277-2281.
- [7] Wang P, Sahu J. 110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with $M^2=1.6$ [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(21): 3116-3118.
- [8] Wang P, Sahu J. High-power broadband ytterbium-doped helical-core fiber superfluorescent source [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2007, 19(5): 300-302.
- [9] Schmidt O, Rekas M, Wirth C, et al. High power narrow-band fiber-based ASE source [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (5): 4421-4427.
- [10] Xiao Q, Yan P, Wang Y, et al. High-power all-fiber superfluorescent source with fused angle-polished side-pumping configuration [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (8): 1164-1169.
- [11] Cao Y, Liu J, Wang K, et al. All-fiber hundred-Watt-level broadband ytterbium-doped double cladding fiber superfluorescent source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0802008.
- [12] An Y, Cao J, Huang Z. High-power all-fiberized superfluorescent source with distributed side-coupled cladding-pumped fiber [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (36): 8564-8570.
- [13] Xu J, Liu W, Leng J. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 2973-2976.
- [14] Codemard C A, Sahu S J, Nilsson J. Tandem cladding-pumping for control of excess gain in ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(12): 1860-1868.