

·光电器件与材料·

全光纤结构掺镱超荧光光纤光源实验研究

院楚君, 姜淑琴

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:利用掺镱双包层光纤,建立了一套全光纤结构超荧光光纤光源的实验系统。研究了在正向泵浦情况下,单程双向输出超荧光光源的特性,并讨论了不同长度掺镱光纤对超荧光光源性能的影响。实验结果表明,反向输出超荧光光源具有更高的效率和更宽的带宽。当增益光纤长度较短时,其激光振荡阈值更高,可产生更高的输出功率;而当增益光纤长度增加后,虽然最大输出功率下降,但其能产生更宽的输出光谱。

关键词:超荧光光纤光源;掺镱光纤;转换效率;带宽

中图分类号:O433

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0031-06

Experimental Research on All-fiber Ytterbium-doped Superfluorescent Fiber Source

YUAN Chu-jun, LOU Shu-qin

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

Abstract: Based on a segment of Ytterbium-doped dual-cladding fiber (YDF), an all-fiber superfluorescent fiber source (SFS) experimental system is demonstrated. The characteristics of double-ended output SFS is researched under forward pump condition. And the effects of YDF with different length on the performances of SFS are discussed. Experimental result shows that backward output SFS has higher conversion efficiency and broader bandwidth. When the length of gain fiber becomes shorter, the laser oscillation threshold is higher and thus higher output power can be obtained. With the increasing of gain fiber length, the maximum output power decreases, but the bandwidth of the output spectrum increases at the same time.

Key words: superfluorescent fiber source (SFS); Ytterbium-doped fiber; conversion efficiency; bandwidth

超荧光光纤光源(superfluorescent fiber sources, SFSs)是在稀土掺杂光纤中通过激光泵浦而产生的放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)过程。超荧光光源具有很宽的输出光谱,从而能够有效地减少由瑞利散射引起的相位噪声、相干背向散射噪声以及由光学克尔效应引发的相位零漂移等^[1]。此外,超荧光光源还具有方向性好、光-光转化效率高、时间相干度低以及温度稳定性好等特

点,广泛的应用于光传感、医学成像及低相干光谱仪等领域中。如光纤陀螺仪^[2],尤其是需要高的波长稳定性的导航级高精度光纤陀螺^[3],光学相干层析成像^[4],对视网膜以下的脉络膜血管系统进行医学成像来监测其病变情况^[5],以及拉曼激光器光源^[6]等。因此,利用不同稀土掺杂光纤获得了不同波段宽谱输出的超荧光光纤光源成为国际上广泛关注的研究方向之一。常见的掺杂离子有Yb、Er、

收稿日期:2015-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目资助(61475016)

作者简介:院楚君(1992-),女,内蒙古人,北京交通大学硕士研究生,研究方向为全光纤结构超荧光光源;导师简介:姜淑琴(1965-),女,山东人,北京交通大学教授,博士研究生导师,研究方向为光通信、光传感、光器件、光网络。

Tm、Nd、Bi、Ho以及多个离子共掺^[7-11],分别在1 μm、1.5 μm和2 μm等波段实现了宽谱输出。目前研究最多的是掺铒的超荧光光纤光源,它的输出中心波长位于光通信的第三窗口内,而且相对于半导体宽谱光源而言,掺铒超荧光光源具有更好的功率和波长稳定性。但铒离子具有能级结构简单、吸收和发射截面宽等优势,比其他稀土离子更适合做超荧光光源,因此近年来得到了研究者的广泛关注。目前对于掺铒超荧光光纤光源的研究重点是通过采用不同的装置结构和制作工艺来进一步提高输出功率、输出光谱宽度以及波长和功率的稳定性。文中采用了掺铒双包层光纤作为增益介质,建立了全光纤结构的单程双向输出超荧光光源系统,实验研究了系统的性能。研究成果对进一步优化掺铒超荧光光纤光源的性能提供了有益的指导。

1 实验装置

建立的全光纤结构的单程双向输出超荧光光源系统如图1所示。

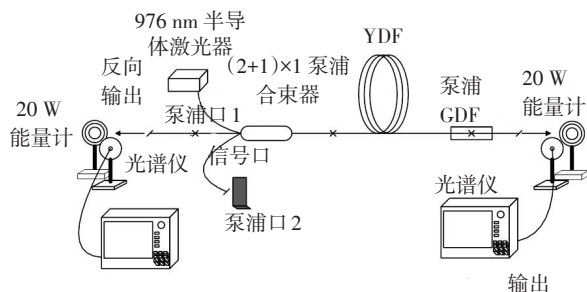


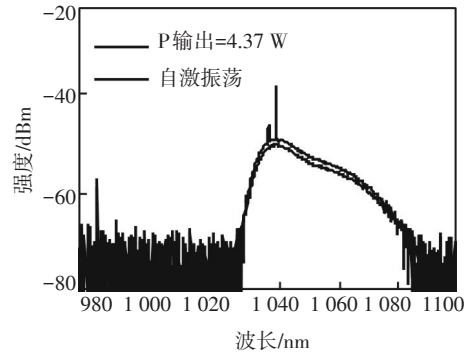
图1 976 nm 包层泵浦单程双向超荧光光源实验装置

由图1可见,泵浦源是一个中心波长为976 nm的凯普林(BWT)光纤耦合半导体激光器,最大功率可达25 W,其尾纤直径为105 μm/125 μm,纤芯数值孔径NA为0.22。输出的泵浦光经(2+1)×1泵浦合束器,被耦合到掺Yb双包层光纤中,(2+1)×1泵浦合束器的采用使得两个方向的ASE可以同时输出。合束器泵浦臂的光纤直径为105 μm/125 μm,它与泵源尾纤相匹配,纤芯数值孔径同样为0.22。经测试,光经过合束器泵浦臂的通过率约为97.1%。合束器输出端光纤的纤芯/包层直径为10 μm/125 μm,数值孔径为0.08/0.46。泵浦光通过合束器输出端光纤进入到掺铒双包层光纤中被吸收产生放大自发辐射。掺铒双包层光纤的纤芯直

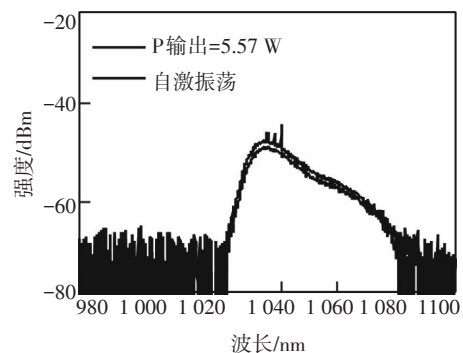
径为10 μm,数值孔径为0.08,八边形内包层直径为130 μm,数值孔径为0.46,在975 nm处的最大包层吸收系数为4.1 dB/m。由于合束器输出端光纤的包层与掺铒光纤内包层具有相同的数值孔径,因此,能有效减少泵浦光在掺铒光纤端面耦合时的损耗。掺铒光纤的输出端与一段长为60 cm的传能光纤(GDF,掺锗光纤)相熔接,作为正向ASE的输出端。为了避免光纤端面反射形成寄生振荡而导致超荧光光源的阈值降低,实验中将输出光纤端面进行角度切割,经测量为10.6°。反向ASE通过泵浦合束器信号纤输出,其光纤端面角度为7.9°。正、反向ASE的输出功率分别由两个20 W激光功率/能量计进行测量。输出光谱由光谱仪(AQ6370C)测量,波长监测范围为600~1 700 nm,波长分辨率为0.02 nm。

2 实验结果与分析

实验中首先采用的掺铒双包层光纤长度为4.7 m,不断增大泵浦功率,监测正向和反向ASE输出功率,结果如图2所示。



(a)正向ASE光谱



(b)反向ASE光谱

图2 光纤长度为4.7 m时,最大输出功率及开始出现寄生振荡时的正向和反向ASE谱

图中的两条曲线对应于最大输出功率和开始

出现寄生振荡时的情况。当泵浦光功率增加到 10.75 W 时,得到最大的输出功率,此时正向输出为 4.37 W,反向输出为 5.57 W。随着泵浦光功率继续增大,正向及反向输出光谱中均出现了自激振荡。对图 2a 光谱进行分析,可以得到当正向 ASE 输出功率最大时,所对应的中心波长为 1 038.27 nm,3 dB 带宽为 14.02 nm。另外光谱中在波长 976 nm 处,仍有残留的泵浦峰出现,这主要是由于随着泵浦功率的增加,掺杂光纤长度不足,无法将全部泵浦光吸收。由图 2b 可以得到,当反向 ASE 输出功率最大时,所对应的中心波长为 1 034.50 nm,3 dB 带宽为 13.26 nm。为了消除残留泵浦光对前向超荧光光谱的影响,实验加入泵浦光滤除措施,在距离正向 ASE 输出端前 50 cm 处的传能光纤上进行长约 6 cm 的涂覆层剥除,并加入折射率为 1.5 的匹配液进行包层光滤除处理,此时输出的光谱如图 3 所示。

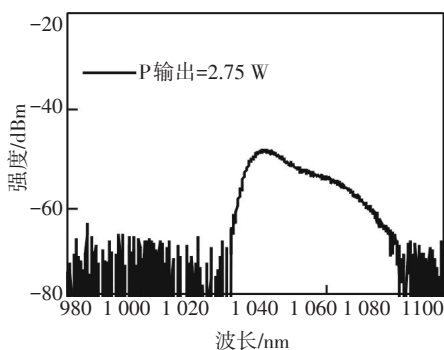


图3 采用包层光滤除后的正向 ASE 输出光谱

对比图 2 和图 3 可以明显看出,976 nm 处的光脉冲消失,此时正向 ASE 谱中心波长为 1 039.34 nm,3 dB 带宽为 13.79 nm。最大输出功率较滤除之前相比,变为 2.75 W,这说明有一部分泵浦光没有被充分利用。

对应于不同的泵源注入功率,分别得到了如图 4 中包层光滤除处理前后,正、反向 ASE 输出功率随泵浦光功率变化情况。由图 4a 可知,包层光滤除处理前的正向输出功率由正向 ASE 和未被吸收的泵浦光组成,随着泵源功率的不断增大,泵浦光不能完全被掺镱光纤所吸收。由图 4b 得出,虽然随着泵浦功率的不断增大,反向 ASE 功率也在不断增大至出现自激振荡,但输出端包层光滤除处理不影响反向 ASE 的输出情况。因为泵浦光的传输方向与反向 ASE 相反,即使有很少量泵浦光因正向输出光纤端面而反射,也会被掺镱光纤重新吸收,因此不会

从反向 ASE 输出光谱中得到 976 nm 波长。

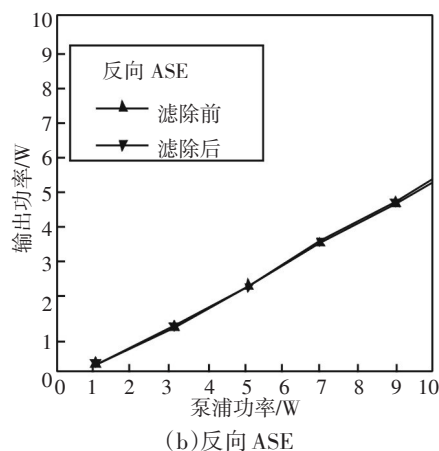
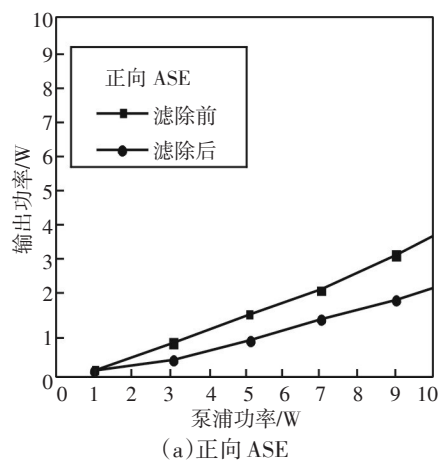
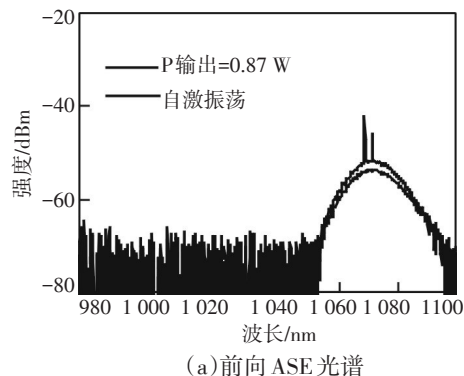
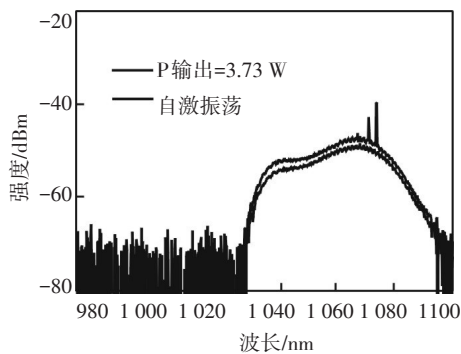


图4 包层光滤除处理前后,正、反向 ASE 输出功率随泵浦光功率的变化

为了得到掺镱双包层光纤长度对输出正、反向超荧光光源的影响,且确保泵浦光功率能被完全吸收,实验中又采用了另一段长度为 16 m 相同参数的掺镱双包层光纤作为对比。随着泵浦功率的增大,正、反向 ASE 输出功率也在不断增加,但其产生寄生振荡的泵浦光阈值功率比 4.7 m 增益光纤时低,仅为 5.16 W。最大输出功率及开始出现寄生振荡所对应的输出光谱如图 5a 和图 5b 所示。





(b)反向 ASE 光谱

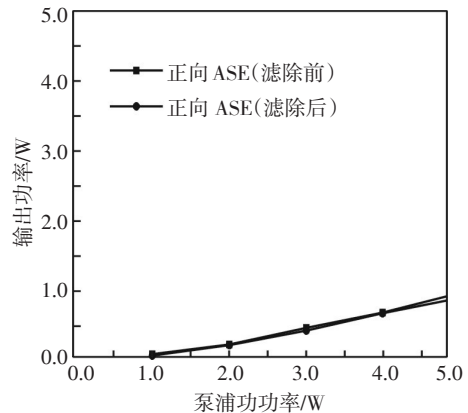
图5 光纤长度为 16 m 时,最大输出功率及开始出现寄生振荡时的正向和反向 ASE 谱

泵浦光功率为 5.16 W 时,得到的最大正向输出为 0.87 W,最大反向输出为 3.73 W。当泵浦光功率继续增大,正向及反向输出光谱中均出现了自激振荡。图 5a 中,当正向 ASE 输出功率最大时,其中心波长为 1 071.72 nm,3 dB 带宽为 14.93 nm,光谱中不再有 976 nm 波长光存在。图 5b 中,反向 ASE 功率最大时,其中心波长为 1 065.64 nm,3 dB 带宽为 18.45 nm。同样,在正向 ASE 输出端做包层光滤除处理,正、反向 ASE 输出功率在不同泵浦功率下的变化情况如图 6 所示。

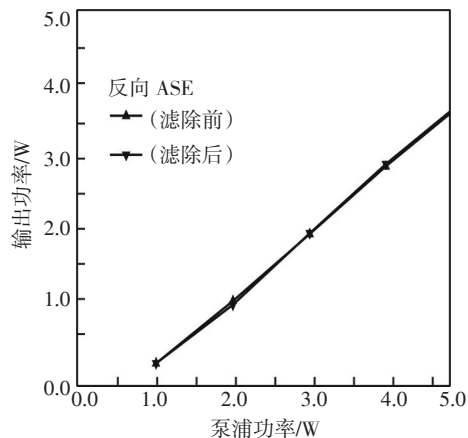
由图 6 可知,包层光滤除处理前后的两个方向输出 ASE 功率基本没有变化,说明在长度为 16 m 的掺镱光纤中,泵浦光在达到产生激光阈值前能够被完全吸收。

图 7 是对应两段不同长度增益光纤,前向与后向 ASE 输出最大功率时,输出光谱的变化情况。从图 7a 可以看出,当光纤长度由 4.7 m 增加到 16 m,正向 ASE 光谱的中心波长由 1 039.34 nm 频移至 1 071.72 nm,3 dB 带宽由 13.79 nm 变为 14.93 nm。图 7b 反映的是反向 ASE 输出光谱的变化情况,其中心波长由 1 034.50 nm 向长波长移至 1 065.64 nm,3 dB 带宽从 13.26 nm 增大到 18.45 nm。随着光纤长度增加,ASE 谱中心波长将向长波长移动,3 dB 带宽将增宽。究其原因,主要是受二次吸收的影响,泵浦光在刚进入光纤时功率是最大的,绝大部分光子被增益光纤吸收产生 ASE;随着泵浦光向前传输被不断吸收,能够产生的 ASE 光密度也越来越小,此时 ASE 中的短波长光作为二次泵浦光被重新吸收,所以产生了中心波长向长波长移动的现象。另外,3 dB 带宽均有不同程度的展宽,由镱离子的吸收、发射谱可知,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。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,吸收光子能力较弱的则在泵浦光沿光纤传播到一定长度后,才能吸收泵浦光而发生放大自发辐射。对于短光纤(4.7 m)而言,镱离子的发射谱上存在一定波长未能产生 ASE,而对于长光纤(16 m),镱离子的发射谱上有更多的波长能吸收到泵浦光而产生 ASE,于是实现了带宽的增加。

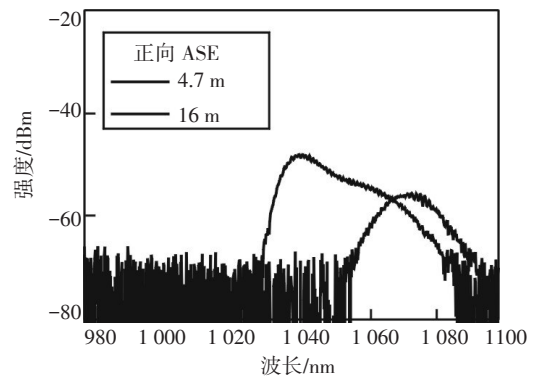


(a)正向 ASE

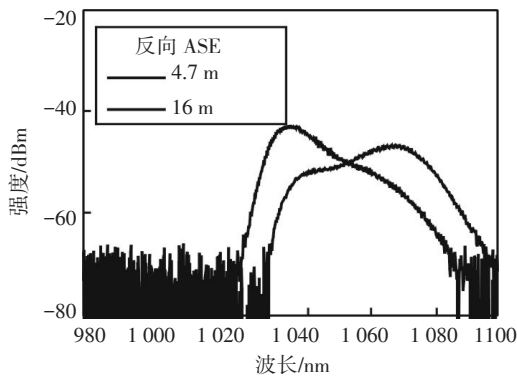


(b)反向 ASE

图6 输出端包层光滤除前后,正、反向 ASE 输出功率随泵浦光功率的变化



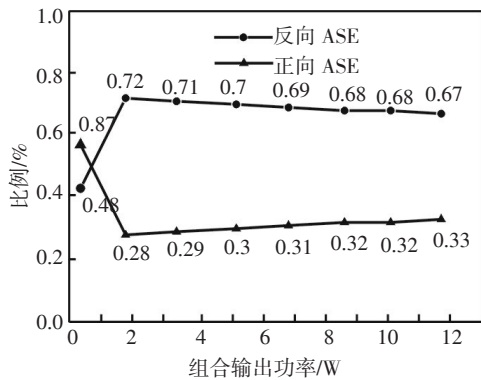
(a)正向光谱



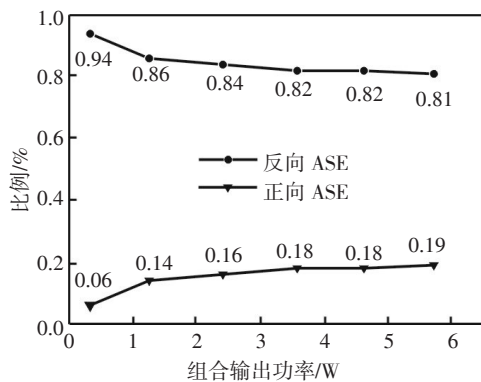
(b)反向光谱

图7 光纤长度从4.7 m到16 m时,其正向、反向光谱变化

对比两段不同长度光纤得到的输出功率,如图8所示。



(a)4.7 m



(b)16 m

图8 掺镱光纤为4.7 m和16 m时两方向输出 ASE 功率与总输出功率比值变化

由图可见,反向 ASE 输出功率占总输出功率比例均大于正向 ASE 输出功率。图 8a 中,光纤长度为 4.7 m 时,反向 ASE 输出功率与正向 ASE 随泵浦功率增大而渐趋稳定,两者比值约为 2:1。图 8b 中,当光纤长度为 16 m 时,两个方向 ASE 输出功率比值约为 4:1。虽然反向 ASE 光在增益光纤初始端产生的最少,但随着泵浦光不断向前传播被吸收,反

向 ASE 实现了放大,而正向 ASE 中还有部分短波长光作为二次泵源被重吸收而降低了功率。因此,当光纤长度变长,除了泵浦光激光阈值降低外,反向 ASE 光表现出了比正向 ASE 更高的输出效率。

3 结论

建立了全光纤结构的正向泵浦单程双向输出掺镱超荧光光纤光源,通过实验研究了掺镱超荧光光纤光源系统的性能和不同长度的增益光纤对其性能的影响。在光纤长度为 4.7 m 时,经包层光滤除处理后得到的最大正、反向 ASE 输出功率分别为 2.75 W、5.57 W;3 dB 带宽分别为 13.79 nm 和 13.26 nm。当光纤长度增加到 16 m 时,得到的最大正、反向 ASE 输出功率分别为 0.87 W、3.73 W,3 dB 带宽分别为 14.93 nm 和 18.45 nm。研究结果表明,当采用增益光纤长度较短时,其激光振荡阈值更高,可以产生更高的输出功率;而增益光纤长度增加后,虽然最大输出功率下降,但其 3 dB 带宽有所增加,可以产生更宽的超荧光光谱。另外反向输出的超荧光光源具有比正向输出光更高的效率和更宽的带宽。由于文中对于抑制由光纤端面反射引起的寄生振荡,只采取了对光纤端面做角度切割处理的方法,输出功率低,欲进一步提高输出功率可以采用加入放大级,来获得更高功率的掺镱超荧光光纤光源输出。

参考文献

- [1] 韩旭,冯国英. 3 dB 带宽达 80 nm 的双包层掺镱超荧光光纤光源[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 3040-3043.
- [2] Hsu Z C, Peng Z S. Gamma ray effects on double pass backward superfluorescent fiber sources for gyroscope applications[J]. Proc. SPIE 7004, 2008, 70044M.
- [3] Park H G, Digonnet M. Er-doped superfluorescent fiber source with a ± 0.5 -ppm long-term mean-wavelength stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3427-3433.
- [4] Bashkansky M, Duncan M D. Characteristics of a Yb-doped superfluorescent fiber source for use in optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 1998, 3: 305-310.
- [5] Trifanov I, Caldas P. Combined Neodymium Ytterbium-doped ASE fiber-optic source for optical coherence tomography applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23

- (1):21-23.
- [6] Levit B, Bekker A. Amplified-spontaneous-emission pumped raman fiber laser[J]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest Series, 2009, JThE73.
- [7] Wysocki P F, Digonnet M J F. Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(3):550-567.
- [8] Wang P, Sahu J K. Power scaling of Ytterbium-doped fiber superfluorescent sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3):580-587.
- [9] Liu J, Liu K. High-power Thulium-doped all-fiber superfluorescent sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5):3100306.
- [10] Duling I N, Burns W K. High-power superfluorescent fiber source[J]. Optics Express, 1990, 15(1):33-35.
- [11] Honzatko P, Baravets Y. Wideband thulium holmium-doped fiber source with combined forward and backward amplified spontaneous emission at 1 600-2 300 nm spectral band[J]. Optics Letters, 2014, 39(12):3650-3653.

(上接第13页)

的一系列包含数据信息的光谱位移就能被探测到。这种利用光谱位移构建的新的信息传输方法,和传统的通信系统相比有许多优点。因为,这种信息的编码使用光谱位移的新方法,不会因为光强的减弱而导致传输过程中的误码。

4 结 论

研究了多色部分相干光衍射诱导的光谱变化和光谱开关现象。研究表明,多色部分相干光经四缝后,不仅可以产生光谱变化现象,还可以产生比多色部分相干光经杨氏双缝更加明显的光谱开关现象,并且光谱变化和光谱开关现象随着观测位置的改变而改变。

波带片的设计与制作正在发展成为一项专门的技术,随着科技的进步,波带片的应用一定会越来越广泛。而完全相干光经菲涅耳波带片的光谱变化和光谱开关也成为其研究的一个方面,所以研究激光束经菲涅耳波带片聚焦后的光谱变化和光谱开关,对现代光学理论激光技术的发展有着重要的意义。

参考文献

- [1] Wolf E. Invariance of the spectrum of light on propagation. [J]. Phys Rev Lett., 1986, 56:1370-1372.
- [2] Foley J T, Wolf E. Phenomenon of spectral switches as a new effect in singular optics with polychromatic light[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19:2510-2516.
- [3] Pu J, Zhang H, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. Opt Commun, 1999, 162:57-63.
- [4] Kandpal H C, Vaishya J S, Joshi K C. Wolf shift and its application in spectroradiometry[J]. Opt Commun, 1989, 73:169-173.
- [5] Pu J, Nemoto S. Spectral changes and $1 \times N$ spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19:339-344.
- [6] Anand S, Yadav B K, Kandpal H C. Experimental study of the phenomenon of $1 \times N$ spectral switch due to diffraction of partially coherent light[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19:2223-2228.
- [7] Anand S, Kandpal H C. Experimental study of spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. J Opt A Pure Appl Opt, 2004, 6:177-179.
- [8] 张军. 菲涅耳波带片的制作和验证[J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2005, 5:1-3
- [9] Wolf E, James D F V. Correlation-induced spectral changes[J]. Rep Prog Phys, 1996, 59:771-818.
- [10] Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics [M]. UK:Cambridge University Press, 1995.
- [11] 吕百达. 激光光学 [M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [12] Collins S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. J Opt Soc Am, 1970, 60:1168-1177.
- [13] 渠彪, 蒲继雄. 菲涅耳波带片衍射产生的光谱奇异现象[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 28:1-25.
- [14] 潘留占, 吕百达. 杨氏实验远场的光谱位移和光谱开关[J]. 光学学报, 2003, 6:707-711.