

文章编号: 0258-7025(2009)03-0647-06

新型中心波长稳定的高效率 L 波段 掺铒光纤超荧光光源

王秀琳^{1,3} 黄文财² 黄晓菁³ 黄朝红² 许惠英² 蔡志平²

(¹ 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; ² 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)
³ 集美大学物理系, 福建 厦门 361021)

摘要 采用后向抽运的两级级联的掺铒光纤超荧光光源的新型结构, 运用同步抽运技术对两级光纤按比例进行后向抽运, 从而实现高效率且中心波长稳定的 L 波段超荧光光源输出。研究了光纤总长度、两级光纤长度分配以及抽运比例对超荧光光源输出特性参数的影响。结果表明, 通过采用两级级联后向结构可以将光谱从 C 波段有效地转移到 L 波段, 而且能够实现在高抽运功率下具有中心波长对抽运功率波动不敏感的特性。在 290 mW 功率 1:1 抽运下, 实验获得了输出功率 97 mW, 线宽 47.3 nm, 中心波长稳定的 L 波段超荧光光源。

关键词 光纤光学; 超荧光光纤光源; 放大自发辐射; L 波段

中图分类号 TN 253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0647

A Novel Mean Wavelength Stability and High Efficiency L-Band Superfluorescent Fiber Source

Wang Xiulin^{1,3} Huang Wencai² Huang Xiaojing³

Huang Chaohong² Xu Huiying² Cai Zhiping²

¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China
² Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China
³ Department of Physics, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract A novel two-stage cascade dual-backward pumped configuration using the synchronous pumping technique is presented to achieve a mean wavelength stable L-band superfluorescent fiber source (SFS). The effects of total fiber length, fiber length arrangement of the two-stage, and pump ratio on the output characteristics of the L-band SFS in terms of mean wavelength, linewidth, and output power are investigated. The results show that not only the output spectrum can be moved from C-band to L-band effectively but also the pump power independent mean wavelength operation can be achieved by using the two-stage cascade dual-backward pumped configuration. A SFS with linewidth of 47.3 nm, output power of 97 mW, and high mean wavelength stability is experimentally obtained with a pump ratio of 0.5 and 290 mW total pump power.

Key words fiber optics; superfluorescent fiber source; amplified spontaneous emission; L-band

1 引言

掺铒光纤超荧光光源(SFS)由于具有温度稳定性强、输出功率高、输出谱线宽、使用寿命长等特点, 在密集波分复用系统中的光器件测试、光纤传感系统和光纤陀螺中以及低成本接入网等很多领域得到

了广泛的应用^[1~4]。尤其是在高精度光纤陀螺中, 这种光源是最具潜力的候选者。光纤陀螺对光源的要求主要表现在三个参数上: 线宽、中心波长稳定性以及输出功率。宽带光源可以降低由于瑞利后向散射、偏振交叉耦合、克尔效应等引起的相干噪声; 中

收稿日期: 2008-08-13; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 福建省新世纪优秀人才项目(X07204)、厦门大学科技创新重点项目(k70007)和福建省教育厅科技项目(JA08138)资助课题。

作者简介: 王秀琳(1974—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事光纤器件与技术方面的研究。

导师简介: 蔡志平(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光器件、导波与光纤技术的研究。

E-mail: zpcai@xmu.edu.cn (通信联系人)

心波长稳定的光源可以提高光纤陀螺比例因子的稳定性;而高输出功率的光源可以提高光纤陀螺的测量灵敏度。在早期研究中,多种结构的C波段(1525~1565nm)掺铒光纤超荧光光源被相继提出并得到深入研究,理论和实验研究均认为双程后向结构的光源可以得到更高的输出功率和更好的波长稳定性^[5~9]。然而,C波段的掺铒光纤超荧光光源由于1532 nm附近的尖峰导致光源的有效线宽不大。国内中国科学技术大学钱景仁教授等曾全部采用国产元件成功研制出掺铒光纤超荧光光源。针对自然荧光谱有尖峰结构造成的线宽过窄问题,通过在光源的输出端加一段掺铒光纤,利用其在1532 nm附近的吸收峰,抑制了尖峰结构,有效扩展了线宽^[7]。近年,L波段(1565~1605nm)及C+L波段的宽带超荧光光源获得了很大进展^[10~16]。我们知道,掺铒光纤在L波段上的光谱十分平坦,但通常的单级单抽运光源结构(即双程前向结构)产生的L波段光谱强度较低,更重要的是其中心波长随抽运功率变化也不稳定。最近,我们提出采用双向同步抽运技术实现了中心波长稳定的L波段超荧光输出^[17]。然而对于稳定的L波段掺铒光纤超荧光光源的研究还刚起步,进一步深入开展相关的理论和实验研究,以获得更适合于高精度光纤陀螺应用要求的宽带新型光纤光源十分必要。

本文提出采用后向同步抽运技术的两级级联的高稳定掺铒光纤超荧光光源的新型结构,其优点在于能够实现在高抽运功率下具有中心波长对抽运功率波动不敏感的特性,同时能获得高转换效率、高输出功率和大的光源线宽。因此,这种结构的光源可以很好地满足高精度光纤陀螺对光源的要求。

2 L波段SFS产生的基本原理

利用掺铒光纤实现L波段SFS输出的原理如图1所示。L波段SFS的形成可以概述为:铒离子吸收980 nm或1480 nm抽运激光后首先在铒光纤的前端产生C波段放大自发辐射(ASE),产生的C波段ASE再被后端铒光纤吸收,作为二次抽运源从而使ASE谱位移到L波段上形成L波段ASE谱,即L波段SFS。L波段SFS的形成与C波段一样,都是由铒离子能级 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的跃迁产生的。L波段SFS是由 ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{15/2}$ 主能级的斯塔克分裂能级的低能级之间的跃迁产生的,其发射和吸收系数比C波段小3~4倍,但其增益更平坦。因此常常

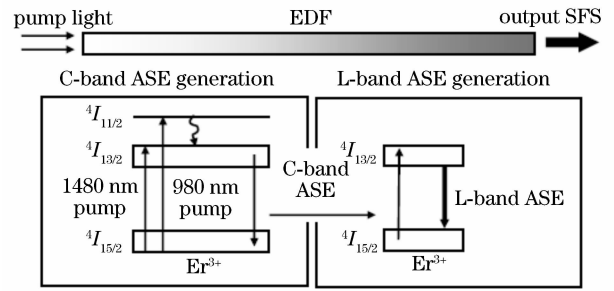


图1 掺铒光纤中L波段超荧光的形成原理示意图

使用高掺杂和低损耗的掺铒光纤,以减少获得L波段SFS所需要的光纤长度,从而降低吸收损耗和后向放大自发辐射的积累,提高抽运转换效率。

对于SFS应用于光纤陀螺中,中心波长是通过以功率谱密度作为加权因子进行加权平均的方式来定义的

$$\bar{\lambda}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot P_i}{P_{\text{total}}} \quad (1)$$

而在光纤陀螺中,输出是用平方律探测器进行测量的。由于各种机制引起的误差都随着由功率平方加权的线宽的增加而减小,因此,线宽采用的计算方法为

$$\Delta\lambda = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \Delta\lambda_i \cdot P_i \right]^2}{\sum_{i=1}^n \Delta\lambda_i \cdot P_i^2} \quad (2)$$

式中 λ_i 为第*i*段ASE的波长; P_i 为第*i*段ASE的功率; n 为ASE光谱被分割的段数; $\Delta\lambda_i$ 为第*i*段ASE的宽度。本文中的中心波长与线宽均采用以上计算方法。

掺铒光纤SFS的中心波长对于温度变化的稳定性可以表示为^[5]

$$\frac{d\bar{\lambda}_m}{dT} = \left(\frac{\partial \bar{\lambda}_m}{\partial T} \right)_{\text{int.}} + \left(\frac{\partial \bar{\lambda}_m}{\partial \lambda_p} \right) \cdot \left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \bar{\lambda}_m}{\partial P_p} \right) \cdot \left(\frac{\partial P_p}{\partial T} \right) \quad (3)$$

式中 T 为环境温度, λ_p 为抽运光波长, $\bar{\lambda}_m$ 为光源的中心波长, P_p 为抽运功率。(3)式中,第一项为光纤本身的温度对输出光源中心波长的影响,它主要与掺铒光纤的本征参数有关;第二项是由抽运光波长变化引起的,由于目前采用的980 nm抽运激光器一般都采用了光纤光栅波长稳定技术,因此这一项效应可以忽略;第三项为抽运功率变化引起的中心波长的影响。因此研究抽运功率的改变引起的光源中心波长的变化是衡量不同结构光源的波长稳定特性的主要指标。

3 双级后向同步抽运 SFS 的光源结构和原理

对单级的四种最基本的结构,双程后向结构(DPB)的转化效率最高,而且具有中心波长稳定的特性^[6]。但是单级后向抽运的结构不易得到 L 波段 SFS,所以 L 波段 SFS 的结构很少用全部后向抽运的^[9]。可以设想,如果采用两级后向抽运结构,用第一级产生的 C 波段 ASE 注入到第二级,根据图 1 的分析,那么就能产生 L 波段 SFS 输出,而且其转换效率和波长稳定性应该与单级后向结构类似。并且,两级结构中可调参数有四个,第一级的光纤长度 L_1 ,第一级的抽运功率 P_1 ,第二级的光纤长度 L_2 ,第二级的抽运功率 P_2 。通过对这四个参数的优化和调整,能够对光源的输出特性进行多方面调节,以获得满足要求的高性能超荧光光源。

本文设计的光源结构如图 2 所示,它由两段掺铒光纤(EDF),两个波分复用器(WDM),一个 980 nm 半导体抽运源(LD),一个光纤功率分配器(FPS),一个由 3 dB 耦合器构成的光纤圈反射镜(FLR)以及输出端的光纤隔离器(ISO)组成。掺铒光纤选用的是朗讯公司提供的高浓度掺铒光纤(L124301),它在 1530 nm 附近的峰值吸收为 27~33 dBm,模场半径为 5.2 μm ,截止波长为 1100~1400 nm,数值孔径为 0.25。

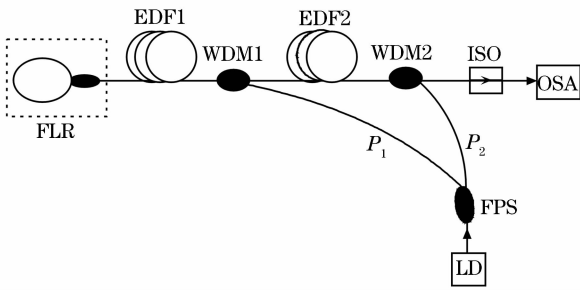


图 2 双级后向同步抽运的 L 波段掺铒光纤超荧光光源结构示意图

Fig. 2 Configuration of the two-stage backward synchronously pumped L-band SFS

4 结果与讨论

首先,确定如图 2 所示的光源结构中两级掺铒光纤的总长度。两级光纤的总长度以输出光源的线宽为标准确定。采用光放大器模拟软件 OASIX 对该光源输出特性进行仿真。OASIX 对掺铒光纤 SFS 的仿真结果已经被证明与实验十分吻合^[8,14,17]。图 3 为两级抽运功率分别为 70 mW 时,

当第一级长度 L_1 分别为 3 m, 5 m, 8 m 和 11 m 时输出光源线宽随光纤总长度的变化关系。通过图 3 可以发现,对于不同的 L_1 ,光源最大输出线宽都出现在 $L_{\text{total}} = 19$ m 附近。选择两级抽运功率比例不同时,所得到的结果与上述情况仍十分相近。因此,对于此结构要获得较大线宽的 L 波段 SFS 输出,光纤总长度选择为 19 m 为最佳。

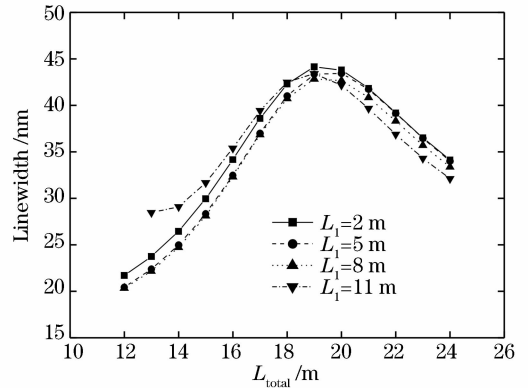


图 3 超荧光光源线宽随光纤总长度的变化

Fig. 3 Linewidth versus L_{total} for different values of L_1

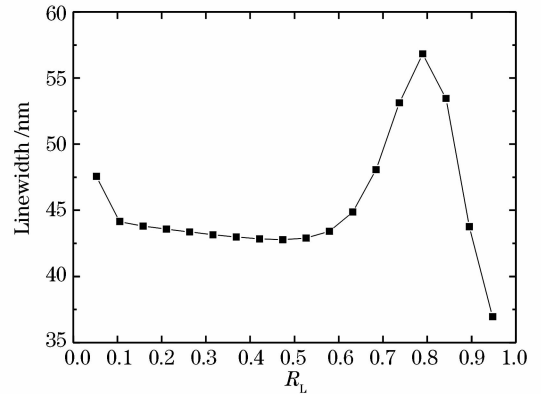


图 4 输出线宽随两级光纤长度比例 R_L 的变化曲线

Fig. 4 Curve of linewidth versus R_L

在接下来的研究中,为了方便讨论,定义抽运比例 $R_p = P_1 / (P_1 + P_2)$,光纤的长度比例 $R_L = L_1 / (L_1 + L_2)$ 。在这个结构中有四个变量,分别是光纤总长度 $L_{\text{total}} = L_1 + L_2$,总抽运功率 $P_{\text{total}} = P_1 + P_2$,抽运比例 R_p 以及光纤长度比例 R_L 。接下来固定三个变量 $P_{\text{total}} = 140$ mW, $R_p = 0.5$, $L_{\text{total}} = 19$ m 来研究光纤长度比例 R_L 对光源输出特性的影响,线宽随 R_L 变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着长度比例在 0~0.1 范围内增大,输出线宽先迅速减小,随后长度比例从 0.1 增加到 0.5 的过程中,输出线宽缓慢减小,不过总体差别不大,基本保持在 43 nm 附近。从 $R_L = 0.6$ 开始,输出线宽随着 R_L 的增加迅速增加并在 $R_L = 0.789$ 时达到最大值 56.8 nm。从

$R_L = 0.789$ 开始, 输出线宽又随着 R_L 的增加急剧减小, 从 56.8 nm 左右减小到 37 nm 附近。

图 5 给出的是超荧光光源输出的中心波长随光纤长度比例的变化曲线。通过图 5 可以发现, 当光纤长度比例从 0 变化到 0.6 时, 输出的中心波长几乎没有变化, 这是由于此时第二级光纤长度较长, 此时光谱全部位于常规的 L 波段, 如图 5 插图所示的输出光谱图。当长度比例从 0.6 开始增加时, 光源的中心波长出现明显下降, 通过图 5 插图发现这是由于输出光谱向 C 波段的扩展造成的, 在 $R_L = 0.789$ 时输出光谱十分平坦, 线宽大大地得到拓展。之后随着光纤长度比例的进一步增大, 第二级光纤的长度不断变短, 由于不能将第一级产生的 C 波段 ASE 全部转移到 L 波段, 造成中心波长的急剧下降, 而此时输出光谱的平坦性也变差, 输出线宽变窄, 如图 4 所示。

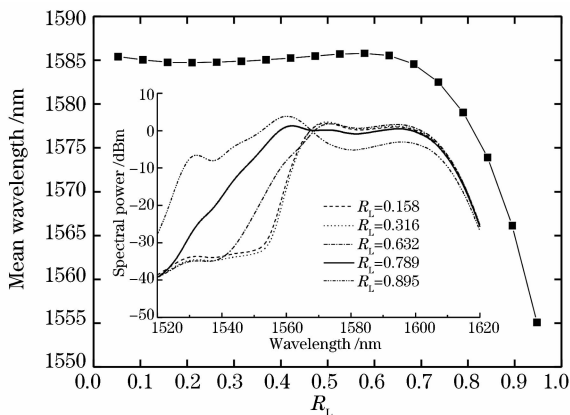


图 5 中心波长随两级光纤长度比例 R_L 的变化曲线
(插图: 不同 R_L 时的输出光谱图)

Fig. 5 Curve of mean wavelength versus R_L
(inset: output spectra of several R_L)

图 6 给出的是在相同的抽运功率 ($P_{\text{total}} = 140 \text{ mW}$) 下输出功率随光纤长度比例的变化曲线。从图中可以看出, 随着长度比例的逐渐增加, 输出功率一直呈现增加的趋势, 不过增长的速度逐渐减慢并达到饱和, 从而得出在同样的抽运功率和总光纤长度相同的情况下, 第二级即输出级光纤的长度越短, 其输出功率越高。但是, 当第二级光纤长度太短时, 比如 1 m, 此时的光纤长度不能有效利用第二级的抽运功率, 也会造成输出功率的下降。

图 7 给出了单级后向和双级级联后向结构的输出光谱图, 它表明通过采用两级级联后向的结构可以将光谱从 C 波段有效地转移到 L 波段。同时, 第二级的抽运功率主要完成对转移获得的 L 波段光谱的放大, 因此, 该结构获得的 L 波段 SFS 具有很

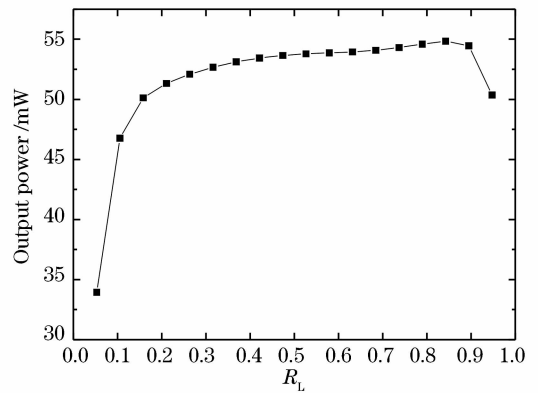


图 6 输出功率随两级光纤长度比例 R_L 的变化曲线
Fig. 6 Curve of output power versus R_L

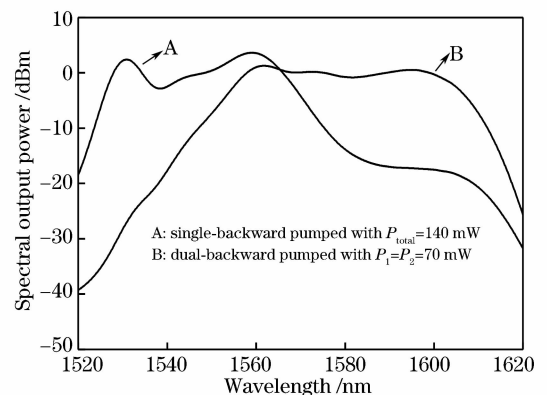


图 7 单级后向和双级级联后向结构输出的光谱图
Fig. 7 Output spectra with single and dual backward pumped configuration

高的抽运转换效率, 如图 6 所示抽运转换效率大约为 39.2%。

对于图 2 结构, 通过上述优化选择 $R_L = 0.789$, 即 $L_1 = 15 \text{ m}$, $L_2 = 4 \text{ m}$, 仿真结果表明, 当 P_1 固定在某一固定值时, 输出光谱的中心波长随着 P_2 的增大而减小; 而当 P_2 固定在某一固定值时, 输出谱的中心波长随着 P_1 的增大呈现先增大后减小的变化趋势。对此可以这样解释: 超荧光光源的输出可以认为由两部分构成, 一部分是第一级输出的 C 波段 ASE 注入到第二级作为二次抽运光产生的 L 波段光谱输出, 另一部分是第二级后向直接输出的 C 波段光谱。这两部分的比重决定了总的输出超荧光光谱的形状。如 $P_1 = 70 \text{ mW}$, $P_2 = 0 \text{ mW}$ 时, 此时为 L 波段输出。随着 P_2 的增大, 第二级的 C 波段输出比例逐渐增大, 故中心波长向短波长移动, 即中心波长逐渐减小。而当 $P_2 = 70 \text{ mW}$, $P_1 = 0 \text{ mW}$ 时, 输出为 C 波段; 随着 P_1 的逐渐增大, 输出逐渐向 L 波段移动, 中心波长不断增大; 当全部转移到 L 波段之后, 当抽运功率增大到一定程度时,

中心波长又会出现随着 P_1 的增大而减小的变化趋势,这是因为对于单级的双程后向结构,其本身随着抽运功率的增大,到一定程度时其中心波长也会呈减小的趋势。根据以上分析,如果将 P_1 的变化范围控制在使得中心波长上升的区域,并通过一个耦合器让 P_1 和 P_2 同步增大(或减小),通过分光比的选择,使得 P_1 的增长带来的中心波长的增大与 P_2 的增长带来的中心波长的减小恰好相互抵消,从而消除中心波长对总的抽运功率波动引起的变化。

图 8 给出几组不同 R_p 值时,中心波长随总抽运功率的变化曲线。通过图 8 可以看出,中心波长对抽运功率的不敏感区出现的位置与选择的 R_p 值有直接关系。 R_p 越大,中心波长的稳定区域出现在抽运功率较小时。在各个不同的 R_p 下,随着总的抽运功率的增加中心波长一般出现先增长,到达一个稳定区域后减小的变化趋势。这种变化趋势解释为:开始当 P_1 的增长带来的是中心波长增大的情况下,中心波长增大的程度大于 P_2 的增大所带来的中心波长的减小,因此中心波长逐渐增大;当两者的变化程度相当的时候,就会出现中心波长的稳定区;随后 P_1 的增长带来的中心波长的增长的程度越来越小,当小于 P_2 的增大所带来的中心波长的减小时,中心波长便开始减小,并且随着总的抽运功率的继续增加减小的幅度会越来越快。由于 R_p 不同时中心波长的稳定区域出现的抽运功率值不同,所对应的光源线宽和输出功率、输出效率也不相同,所以可以根据需要选择合适的抽运比例 R_p 来满足应用要求。

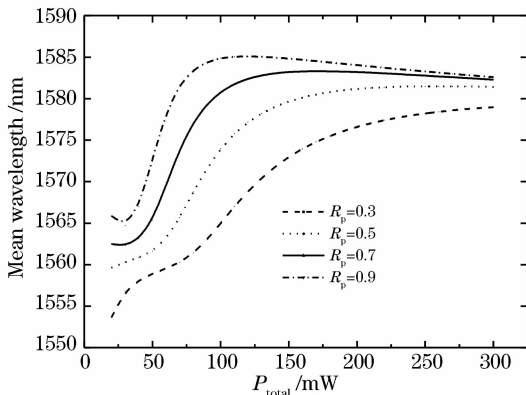


图 8 不同抽运比例下中心波长随总抽运功率的变化

Fig. 8 Mean wavelength versus P_{total} in different R_p

在上述分析的基础上,选择光源结构参数为 $L_1 = 15 \text{ m}$, $L_2 = 4 \text{ m}$,抽运比例 $R_p = 0.5$,即两级掺铒光纤按 1:1 比例进行同步抽运,对图 2 光源结构进行实验研究。输出光谱采用 Advantest 光谱仪测量,所采集到的谱被分为 1000 个数据点,中心波长

和线宽的测量分别由公式(1)和(2)计算得到。图 9 给出中心波长和输出功率随抽运功率的变化。实验中观察到与理论仿真相一致的结果,即中心波长先随抽运功率的增加而变大,当抽运功率达到一定值时,中心波长到达一个稳定区域,随后又随抽运功率的增加而逐渐减小。实验中,在抽运功率为 290 mW 时,获得了中心波长随抽运功率波动稳定的 L 波段超荧光输出(输出光谱见图 9 插图),此时输出功率约为 97 mW,光源的线宽为 47.3 nm。

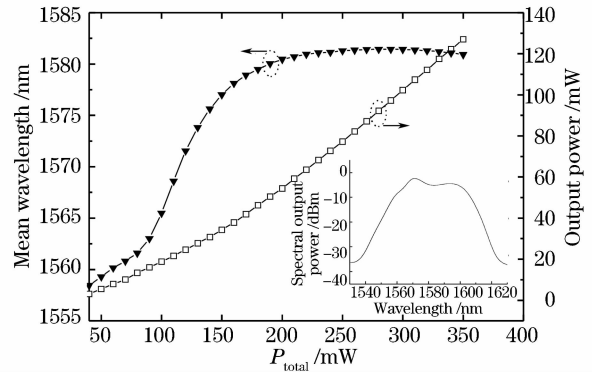


图 9 中心波长和输出功率随抽运功率变化的实验结果 (插图:抽运功率为 290 mW 时的超荧光光谱)

Fig. 9 Measured mean wavelength and output power versus P_{total} (inset: SFS spectrum for a pump power of 290 mW)

5 结 论

提出了一种新型的两级级联同步抽运结构的 L 波段超荧光光源。研究表明,后向抽运结构不但可以实现 L 波段的超荧光输出,而且通过对光源结构参数的优化,可以获得线宽拓展且具有高的抽运转换效率的光谱输出;分析表明该结构通过同步抽运方式可以实现中心波长对抽运功率波动不敏感的特性。高稳定输出的区域与光源结构参数,如抽运比例有着直接关系,因此能够通过选择合适参数,从而实现高功率下稳定的中心波长输出。本文提出的这种 L 波段超荧光光源,能同时具备高中心波长稳定输出、大的输出线宽和高的输出功率,对研制实用化高稳定超荧光光源具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 P. F. Wysocki, M. J. F. Dignonet, B. Y. Kim *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3):550~567
- 2 C. D. Su, L. A. Wang. Multiwavelength fiber sources based on double-pass superfluorescent fiber sources [J]. *J. Lightwave*

- Technol.*, 2000, **18**(5):708~714
- 3 M. E. Bray, R. T. Elliot, K. P. Jones. Comparison of erbium amplifier measurement using a high power amplified spontaneous emission source or using an ITU grid [C]. *OFC*, 2001, **3**:WI2
 - 4 Shi Guohua, Ding ZHihua, Dai Yun *et al.*. Ophthalmic imaging by optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1429~1431
史国华,丁志华,戴云等. 光纤型光学相干层析技术系统的眼科成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1429~1431
 - 5 D. C. Hall, W. K. Burns, R. P. Moeller. High stability Er-doped superfluorescent fiber source [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1452~1460
 - 6 L. A. Wang, C. D. Chen. Stable and broadband Er-doped superfluorescent fibre sources using double-pass backward configuration [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(19):1815~1817
 - 7 Qian Jingren, Cheng Xu, Zhu Bing. The experimental research of a broadband erbium-doped superfluorescent source [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(11):989~992
钱景仁,程旭,朱冰. 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11):989~992
 - 8 P. Z. Zatta, D. C. Hall. Ultra-stability two-stage superfluorescent fibre source for fibre optics gyroscope [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(9):406~408
 - 9 Ling Lei, Fu Yanfeng, Zhang Shi *et al.*. Theory model of forward amplified spontaneous emission in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double clad fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 734~738
凌磊,傅焰峰,张石等. Er/Yb共掺光纤放大器前向放大自发辐射模型[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 734~738
 - 10 S. C. Tsai, C. M. Lee, S. Hsu *et al.*. Characteristics comparison of single-pumped L-band erbium-doped fiber amplified spontaneous emission sources [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2002, **34**:1111~1117
 - 11 Jiang Qiaofeng, Liu Xiaoming, Ni Yi *et al.*. High pump conversion efficiency and broad L-band ASE source by using Sagnac feed back loop[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 709~712
蒋俏峰,刘小明,倪屹等. 采用Sagnac反馈环的高效率宽带L波段放大自发辐射源[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 709~712
 - 12 R. P. Espindola, G. Ales, J. Park *et al.*. 80 nm spectrally flattened high power erbium amplified spontaneous emission fibre source [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(15):1263~1265
 - 13 W. C. Huang, P. K. A. Wai, H. Y. Tam *et al.*. One-stage erbium ASE source with 80 nm bandwidth and low ripples [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(17):956~957
 - 14 W. C. Huang, H. Ming. Simulation analysis of one-stage C+L-band erbium-doped fiber ASE source with double-pass bi-directional pumping configuration [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):125~127
 - 15 Gu Xiaodong, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. A novel C+L band erbium-doped fiber broadband light source with high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 609~612
郭小东,乔学光,贾振安等. 一种C+L波段高功率掺铒光纤宽带光源[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 609~612
 - 16 Wang Xiulin, Ming Hai, Wang Anting *et al.*. Studies of C+L-band erbium-doped fiber broadband light source using one-stage configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 166~170
王秀琳,明海,王安廷等. 单级结构C+L波段掺铒光纤宽带光源研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 166~170
 - 17 W. C. Huang, X. L. Wang, Z. P. Cai *et al.*. A pump power insensitive high stability L-band erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(4): 179~182