

文章编号:1004-4213(2011)01-0050-5

双后向结构的线宽拓展 L 波段超荧光光源*

王秀琳

(集美大学 物理系,福建 厦门,361021)

摘 要:报道了采用两级级联双后向抽运的光源结构,实现高效率 and 线宽拓展的 L 波段掺铒光纤超荧光光源.通过数值模拟,研究了二级光纤长度分配和抽运功率比例对光源输出特性的影响.模拟表明,该结构可获得线宽拓展的平坦 L 波段光谱,相比常规 L 波段光谱线宽拓展了 15 nm,达近 60 nm.此外,抽运功率比例为 1:1 时该结构的抽运转换效率最高.利用 980 nm 半导体激光器作抽运源,在抽运总功率 206 mW 时,实验上获得了输出功率 62 mW,线宽 56.6 nm 的 L 波段光谱,抽运转换效率为 30.1%.

关键词:光纤光学;超荧光光纤光源;放大自发辐射;L 波段;线宽拓展

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0050

0 引言

基于掺铒光纤放大自发辐射的超荧光光源(Superfluorescent Fiber Source, SFS)由于它的输出光谱正好与光通信 1.55 μm 波段一致,并且具有输出光谱稳定、受环境影响小、输出功率高以及易于与光纤系统耦合等众多优点,在密集波分复用系统、光纤传感系统和光纤陀螺以及接入网中光谱分割多波长光源中得到了广泛的应用^[1-3].特别地,光通信带宽从 C 波段(1 525~1 565 nm)向 L 波段(1 565~1 605 nm)拓展,使得 L 波段 SFS 的研究日益受到重视^[4-9].我们知道,掺铒光纤在 L 波段上的光谱十分平坦,平坦光谱线宽可达近 40 nm,但是抽运转换效率较低.随着两级级联的双程前向结构和双程双向结构相继被提出^[5-7],掺铒光纤 L 波段 SFS 的抽运转换效率因此得到了有效提高.最近研究表明,通过在光源结构中引入一段非抽运光纤技术可以有效地拓展光谱的线宽^[8-9].

本文提出一种基于双后向抽运方式的两级级联的掺铒光纤 SFS 的新型结构,该结构不仅能获得具有高抽运转换效率的 L 波段 SFS 输出,而且在合适的光源结构参量配置下,其输出 L 波段光谱线宽能有效地得到拓展,L 波段平坦光谱线宽达到近 60 nm.通过对光源输出特性与光源各结构参量关系的详细研究,得到了最佳的光源结构参量配置并进行了实验测试.研究表明该结构是非常适合用来获得 L 波段 SFS,它在很大的范围内均能获得光谱

线宽拓展以及高效率的 L 波段宽带光谱输出.

1 原理与结构设计

众所周知,当掺铒光纤被 980 nm 或 1 480 nm 半导体激光抽运时,很容易产生光谱覆盖 1 525~1 565 nm 范围的宽带光谱输出,即 C 波段的 SFS.然而,为了获得光谱覆盖 1 565~1 605 nm 范围的 L 波段宽带光谱输出,其实现方式与 C 波段 SFS 有所不同.L 波段 SFS 的产生通常使用高掺杂和低损耗的掺铒光纤,所使用铒光纤长度也较长,这是因为产生 L 波段 SFS 的原理是:铒光纤中的铒离子吸收 980 nm 或 1 480 nm 抽运激光后首先在铒光纤的前端产生 C 波段放大自发辐射谱(Amplified Spontaneous Emission, 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.由于 L 波段的 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.因此,L 波段 SFS 的抽运转换效率通常较低.虽然在四种基本的超荧光光源结构中,双程后向结构具有最高的转换效率,但是 2002 年 Tsai S. C. 的研究表明单级后向抽运的结构无法实现 L 波段 SFS^[4].然而,根据 L 波段 SFS 的产生原理,可以设想,如果采用两级的后向抽运结构,用第一级产生的 C 波段 ASE 注入到第二级,那么就能产生 L 波段 SFS 输出,而且该结构将具有较高的抽运转换效率.并且,两级结构中

基金项目:福建省教育厅科技项目(JA08138)和集美大学博士启动基金(Z80180)资助

作者简介:王秀琳(1974-),女,副教授,主要研究方向为超荧光光纤光源、光纤激光器与器件. Email: wanxl@jmu.edu.cn

收稿日期:2010-04-06;修回日期:2010-06-02

可调参量有四个:第一级的光纤长度,第一级的抽运功率,第二级的光纤长度和第二级的抽运功率.通过对这四个参量的优化和调整,能够对光源的输出特性进行多方面调节,从而获得满足要求的高性能 L 波段超荧光光源.

本文设计的光源结构如图 1,它由两段掺铒光纤(Erbium-doped Fiber, EDF),两个波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM),两个 980 nm 半导体抽运源(Laser Diode, LD),一个由 3 dB 耦合器构成的光纤圈反射镜(Fiber Loop Reflector, FLR)以及输出端的光纤隔离器(Isolator, ISO)组成.显然,该结构为两级级联的双程后向抽运结构.为方便讨论,定义抽运功率比例为 $R_p = P_1 / (P_1 + P_2)$, 光纤长度比例为 $R_L = L_1 / (L_1 + L_2)$, 其中, L_1 为第一级光纤长度, P_1 为第一级抽运功率, L_2 为第二级光纤长度, P_2 为第二级抽运功率.

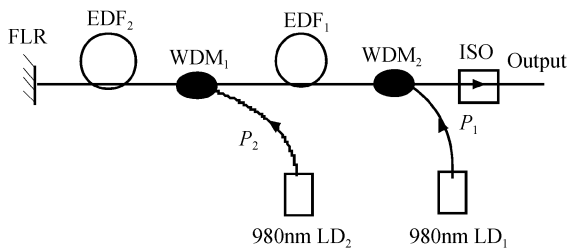


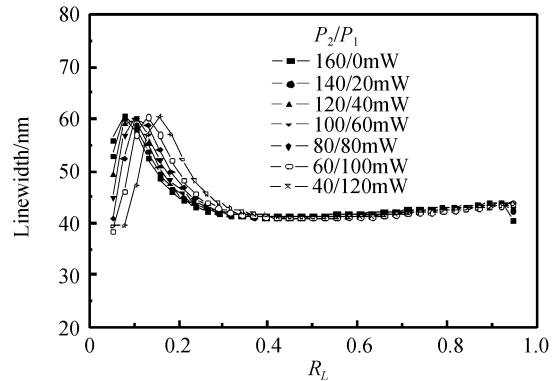
图 1 L 波段超荧光光源结构示意图
Fig. 1 Sketch of the L-band SFS

2 结果与分析讨论

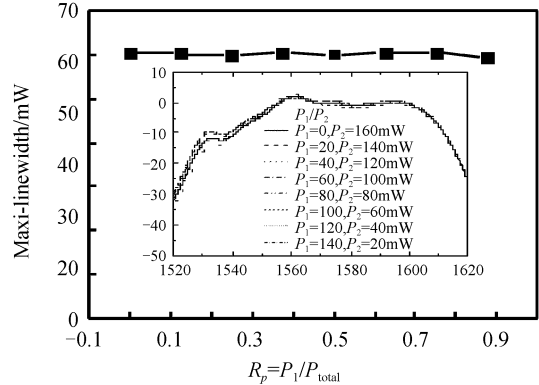
首先,需确定如图 1 的光源结构中两级掺铒光纤的总长度.两级光纤的总长度的选择以输出光源的线宽为标准来确定,并使得输出光谱为 L 波段光谱.朗讯公司基于掺铒光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)的 Giles 模型,已开发出专门用来模拟 EDFA 和超荧光光源特性的 OASIX 软件^[11],模拟结果具有很好的可靠性.采用 OASIX 模拟超荧光光源的特性与实验测量结果十分相近^[3, 7-9].因此,本文采用 OASIX 对该光源输出特性进行仿真.掺铒光纤选用的是朗讯公司提供的高浓度掺铒光纤(L124301),它在 1 530 nm 附近的峰值吸收为 27 ~ 33 dB/m, 1 200 nm 波长吸收为 10 dB/km,模场半径为 5.2 μm ,数值孔径为 0.25.通过大量仿真表明,该结构要获得较大线宽的 L 波段 SFS 输出,光纤总长度选择 19 m 最佳.

确定了最佳的光纤总长度后,研究两级光纤长度比例 R_L 对光源输出特性的影响.固定总的抽运功率为 160 mW 和光纤总长度 $L_{\text{total}} = 19$ m,对于几组不同的抽运功率分配,分别研究光源两级光纤长

度比例对光源输出特性的影响.图 2(a)给出的是输出光谱线宽随两级光纤长度比例 R_L 的变化曲线.而图 2(b)则给出了在不同抽运功率比例分配下,通过优化光纤长度比例所能得到的最大输出光谱线宽.



(a) Linewidth versus R_L with different pump power allotment



(b) The available maximum linewidth versus R_p
(Inset: output spectra)

图 2 光谱线宽与掺铒光纤两级光纤长度比例关系

Fig. 2 Linewidth vs Er-doped fiber length of the two-stage

图 2(a)表明,不论对于哪组功率分配,两级光纤长度分配比例选择对于产生的 L 波段 SFS 输出线宽均有很大影响,当光纤长度比例在 0.1~0.2 之间微小变化,对产生的超荧光光源输出线宽影响非常显著.而且,在任意不同的两级抽运功率分配情况下,线宽随两级光纤长度分配比例的变化基本相同.图 2(a)表明,光纤长度比例 $R_L > 0.3$ 的范围内,输出线宽基本保持在 42 nm 附近,随后光纤长度比例从 0.3 变得更小,输出线宽随着 R_L 的减小很快增大后到饱和值,达到约 60 nm 后又随 R_L 的进一步减小而急剧减小,从 60 nm 左右减小到 39 nm 附近.图 2(b)的结果表明,各组抽运比例下,优化光纤长度比例后达到的最大光源线宽基本一样,均约为 60 nm.而且,获得最大输出线宽时,超荧光光源输出均为线宽拓展的 L 波段光谱,如图 2(b)中插图所示.可见,对于两级级联的双后向抽运结构,不论抽运比例如何分配,通过优化两级光纤长度比例后,都能使得输出光谱为线宽拓展的 L 波段 SFS,拓展后

的 L 波段 SFS 的光谱线宽达到近 60 nm, 因此, 从输出光谱线宽的角度而言, 这种两级级联的双后向抽运结构是非常适合用来构建线宽拓展的 L 波段 SFS.

接下来, 研究该结构的抽运转换效率与光源结构参量的关系. 图 3(a) 给出的是在几组不同的抽运比例下, 理论仿真得到的输出功率随两级光纤长度比例 R_L 的变化曲线. 从图 3(a) 中可以看出, 随着 R_L 的逐渐减小, 输出功率一直呈现缓慢增加的趋势, 不过增长的速度逐渐减慢并达到饱和, 在同样的抽运功率和总光纤长度相同的情况下, 第一级即输出级光纤的长度越短, 其输出功率越高. 但是, 当第一级光纤长度太短时, 比如 1 m, 此时的光纤长度不能有效利用第一级的抽运功率, 也会造成输出功率的下降. 从图 2(a) 得到的光源输出线宽随 R_L 的变化结论, 表明当 R_L 在 0.1~0.2 附近优化时, 能够获得最大线宽的超荧光谱输出. 结合图 3(a) 的结果, 表明该两级级联的双后向抽运光源结构能够具有同时获得线宽拓展和高抽运转换效率的优点.

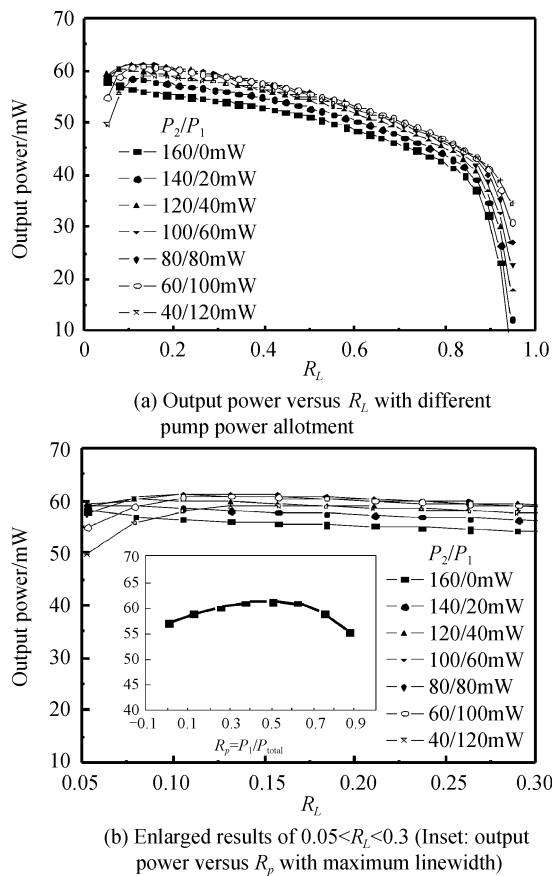


图 3 光源输出功率与掺铒光纤两级光纤长度比例关系
Fig. 3 Output power vs Er-doped fiber length of the two-stage

进一步地, 图 3(b) 给出了 $0.05 < R_L < 0.3$ 小范围内输出功率随两级光纤长度比例 R_L 的变化. 图 3(b) 的结果表明, 在 $0.05 < R_L < 0.3$ 范围内, 输出功

率随 R_L 变化很小(基本不变). 图 3(b) 插图给出了在不同抽运功率比例时, 优化 R_L 后获得最大输出线宽的超荧光光谱时, 得到的输出功率. 图 3(b) 插图表明, 获得最大输出线宽时超荧光光源其输出功率随抽运功率比例并不是呈单调变化的, 该结构获得的线宽拓展 L 波段 SFS 的输出功率开始时随抽运功率比例的增大而有所增大, 在达到饱和后随抽运功率比例的增大而减小. 在抽运功率比例 $R_p = 0.5$ 时, 级联双后向结构可以获得最高的抽运转换效率, 此时在 160 mW 的总抽运功率下, 理论上输出功率可以达到 61.2 mW. 显然, 相比于常规的双程前向结构, 输出功率从 34 mW 提高到了 61.2 mW, 输出功率提高了约为 80%.

因此, 上述优化结果表明, 对于 980 nm 抽运的级联双后向抽运的 L 波段 SFS, 最佳的光源结构参量是: 抽运功率比例选择为 0.5, 对应获得最大线宽即最平坦 L 波段光谱的光纤长度比例应为 $R_L = 0.132$, 即 $L_1 : L_2 = 2.5 \text{ m} : 16.5 \text{ m}$. 图 4 是抽运功率比例 $R_p = 0.5$ 时, 输出光谱随 R_L 的变化. 当 R_L 较大, 即第一级光纤长度较长, 此时光谱全部位于常规的 L 波段, 如图 4 中所示的几组输出光谱图 ($L_1 : L_2 = 16 \text{ m} : 3 \text{ m}$, $13 \text{ m} : 6 \text{ m}$, $7 \text{ m} : 12 \text{ m}$). 当第一级光纤长度逐渐减小 ($L_1 : L_2 = 4 \text{ m} : 15 \text{ m}$, $2.5 \text{ m} : 16.5 \text{ m}$), 图 4 结果表明光谱逐渐向 C 波段拓展, 在 $L_1 : L_2 = 2.5 \text{ m} : 16.5 \text{ m}$, 即 $R_L = 0.132$ 时输出光谱最为平坦, 线宽大大地得到拓展, 达到近 60 nm. 之后随着 R_L 的进一步减小, 即第一级光纤的长度变得非常短, 这时已不能将第二级产生的 C 波段 ASE 全部转移到 L 波段, 且输出光谱的平坦性也变差, 输出线宽变窄, 如图 4 ($L_1 : L_2 = 1 \text{ m} : 18 \text{ m}$).

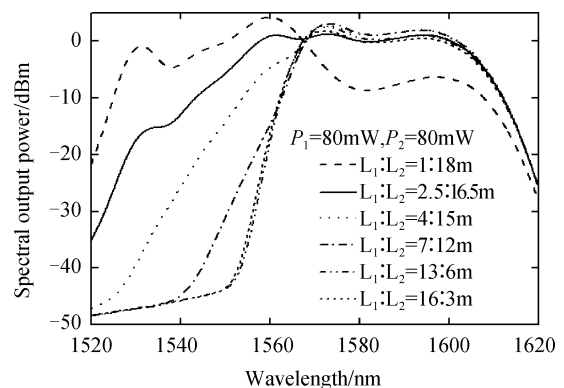


图 4 不同光纤长度分配下的输出光谱
Fig. 4 Output spectra in different fiber length allotment

根据以上的模拟研究结果给出的光源优化结构参量, 构建图 1 所示的光源结构, 进行实验测量. 两级掺铒光纤分别为 2.5 m 和 16.5 m, 抽运比例设置为 $R_p = 0.5$. 其中, 图 5 中曲线 a 是在总抽运功率为

206 mW, 即第一级和第二级分别用 103 mW 功率抽运时测量得到的输出光谱, 此时输出光谱最为平坦, 而随着抽运功率的进一步增加, 光源的输出功率也增大, 但是光谱平坦性变差, 线宽变小. 图 5 中曲线 b 是 19 m 掺铒光纤长度下, 利用常规双程前向结构获得的 L 波段 SFS 输出光谱. 对比两组测量得到的输出光谱, 相比于常规的双程前向结构产生的 L 波段 SFS, 采用本文设计的两级级联的双后向光源结构, 其输出的 L 波段 SFS 明显地向 C 波段拓展, 而且光谱也非常平坦. 在抽运功率为 206 mW 时, 采用两级级联的双后向结构获得的 L 波段 SFS 的输出功率为 62 mW, 光谱线宽为 56.6 nm, 光源的抽运转换效率约为 30.1%. 而采用双程前向结构只能获得输出功率为 26 mW, 光谱线宽为 41.3 nm 的 L 波段 SFS.

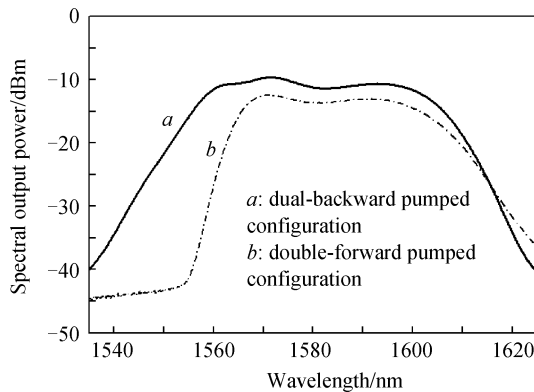


图 5 实验测量得到的两种不同光源结构输出的 L 波段光谱
Fig. 5 Measured output L-band spectra obtained by two different SFS configurations

虽然, 文献[8]利用在双程前向光源结构中引入非抽运光纤获得线宽拓展的 L 波段 SFS, 但其抽运转换效率只有 22.1%. 文献[9]利用非抽运光纤实现一种改进型双程双向光源结构, 采用 1 480 nm 激光器作为抽运源, 抽运转换效率达 47.5%, 线宽为 52.6 nm. 相比于文献[8, 9], 级联双后向抽运的新型光源在 980 nm 激光器抽运下可获得 56.6 nm 的线宽和 30.1% 的抽运转换效率, 若采用 1 480 nm 激光器作为抽运源, 将获得更高的转换效率. 本文模拟和实验都表明, 双后向抽运方式的两级级联掺铒光纤 SFS 的新型结构, 不仅能获得 L 波段 SFS, 而且同时具有提高抽运转换效率和拓展光谱线宽的优点.

3 结论

本文报道了一种采用级联双后向结构构建的 L 波段超荧光光源. 研究表明: 对于双程双后向光源结

构, 不论抽运比例如何分配, 通过优化两级光纤长度比例后, 都可以获得线宽拓展的 L 波段 SFS, 拓展后获得的平坦的 L 波段 SFS 其光谱线宽可达到近 60 nm, 而且该结构还具有很高的抽运转换效率; 在抽运功率比例选择为 0.5 时, 即对两级掺铒光纤按 1:1 抽运功率进行抽运, 能够获得最高的抽运转换效率. 从实验上获得了高效率线宽拓展的 L 波段超荧光光源输出, 在抽运总功率为 206 mW 下, 输出 L 波段光谱线宽为 56.6 nm, 输出功率为 62 mW, 抽运转换效率为 30.1%. 本文研究表明, 这种级联的双后向抽运光源结构是非常适合用来构建性能优良的 L 波段 SFS, 其优点在于能够同时能获得高抽运转换效率、大输出功率和大的光谱线宽.

参考文献

- [1] ZIRNGIBL M, DOERR C R, STULZ L W. Study of spectral slicing for local access applications[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(5): 721-723.
- [2] SU C D, WANG L A. Multiwavelength fiber sources based on double-pass superfluorescent fiber sources [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2000, **18**(5): 708-714.
- [3] ZATTA P Z, HALL D C. Ultra-stability two-stage superfluorescent fiber source for fiber optics gyroscope[J]. *Electron Lett*, 2002, **38**(9): 406-408.
- [4] HSU S, LIANG T C, CHEN Y K. Optimum configuration and design of L-band erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2002, **41**(1): 3724-3729.
- [5] TSAI S C, TSAI T C, LAW P C, *et al.* High-power flat L-band erbium-doped fiber ASE source using dual forward-pumping scheme[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2003, **35**(2): 161-167.
- [6] TSAI S C, TSAI T C, LAW P C, *et al.* High pumping efficiency L-band erbium doped fiber ASE source using double pass bidirectional pumping configuration[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(2): 197-199.
- [7] WANG X L, HUANG W C. Wavelength stability optimization of L-band superfluorescent fiber source[J]. *Opt Eng*, 2005, **44**(6): 060504.
- [8] WANG H, LI Y G, CHEN S P, *et al.* Bandwidth broadening and efficiency enhancement of a double-pass forward L-band erbium-doped superfluorescent fibre source[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2006, **8**(10): 897-902.
- [9] HUANG W C, WANG X L, ZHENG B R, *et al.* A stable and wideband L-band erbium superfluorescent fiber source using improved bi-directional pumping configuration [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9778-9783.
- [10] MI Jian, ZHANG Chun-xi, LI Zheng, *et al.* Experimentally research on temperature stability of the mean wavelength of erbium-doped fiber super fluorescent source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 825-829.
米剑, 张春熹, 李铮, 等. 掺铒光纤超荧光光源平均波长温度稳定性实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 825-829.
- [11] OASIX v3. 0: Lucent Technologies erbium doped fiber devices simulation software.

Linewidth Broadening L-band Superfluorescent Fiber Source by Using Dual-backward Pumped Configuration

WANG Xiu-lin

(Department of Physics, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: A linewidth broadening and high efficiency erbium-doped superfluorescent fiber source (SFS) by using the cascaded dual-backward pumped configuration is proposed. The effects of fiber length arrangement and pump power ratio on the output characteristics of the L-band SFS are investigated by simulation. The simulational results show that the linewidth broadening L-band SFS can be achieved by the proposed design. The spectral linewidth is over 15 nm broader compared with the conventional L-band SFS, up to 60 nm. Further more, the design gives the highest pump efficiency at pump power ratio of 0.5. An L-band SFS of 62 mW output power, 30.1% pump efficiency and 56.6 nm linewidth is experimentally achieved with 206 mW pump power of a 980 nm LD.

Key words: Fiber optics; Superfluorescent fiber source (SFS); Amplified spontaneous emission (ASE); L-band; Linewidth broadening