

# 一种新型的专用于光学相干层析系统的 宽带光纤光源\*

梁艳梅<sup>1)†</sup> 周大川<sup>2)</sup> 孟凡勇<sup>2)</sup> 王明伟<sup>1)</sup>

1) 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) 天津爱天光电子科技有限公司, 天津 300384)

(2006 年 5 月 31 日收到, 2006 年 10 月 23 日收到修改稿)

报道了一种新型的专用于光学相干层析系统的输出光谱为准高斯型的宽带超荧光光纤光源. 该光源采用掺铒光纤作为增益介质. 其关键技术是在抽运源的输出端增加了光耦合器, 并在光源输出端插入多级长周期光纤光栅对铒离子的自发光谱进行调制和整形, 同时采用光控器和温控器来控制抽运源的输出以提高光源输出功率的稳定性. 该光源的中心波长为  $1.57 \mu\text{m}$ , 输出光谱的 3 dB 带宽大于 75 nm, 输出功率为 27 mW. 实验结果表明, 该光源输出光谱的自相关函数的旁瓣峰被大大削弱, 可以满足光学相干层析系统的应用.

关键词: 光学相干层析术, 超荧光光纤光源, 长周期光纤光栅, 光耦合器

PACC: 4255N, 4260F, 4225K, 4260B

## 1. 引言

光学相干层析术(optical coherence tomography, 简称 OCT)是一种获得被测物质表面或内部断面结构的成像方法<sup>[1]</sup>. 其中, 光源是 OCT 系统一个极其重要的部件. 除了要求它有宽的光谱宽度(3 dB 带宽), 以获得高的纵向分辨率外, 还希望它的输出光谱是高斯型. 这是由于光源的光谱与其自相关函数(即干涉信号)是傅里叶变换关系<sup>[2]</sup>. 只有高斯型光谱, 其自相关函数才是高斯型, 而对于非高斯型的光谱, 其自相关函数往往会出现旁瓣峰, 这样在 OCT 的组织成像中会产生虚假的信息而掩盖样本的真实信息. 另外在临床使用中还要考虑它的输出功率、价格、使用方便性及对环境的要求等.

OCT 技术中常用的光源有: 基于飞秒激光技术的激光器, 如掺钛蓝宝石激光器<sup>[3,4]</sup>、飞秒光纤激光器<sup>[5]</sup>等; 超辐射发光二极管(superluminescent diode, SLD)<sup>[6]</sup>; 超荧光光纤光源(superfluorescent fiber source, SFS)<sup>[7,8]</sup>等. 采用飞秒激光器作为 OCT 光源,

可以获得几微米的分辨率. 但是, 这种激光器结构复杂、制造成本昂贵, 而且其对环境的要求比较苛刻, 因此, 不适用于广泛的临床应用. 采用 SLD 作为光源通常可以获得 10—15  $\mu\text{m}$  的纵向分辨率, 但是它的波长稳定性差, 而且功率一般比较小, 当其功率提高时, 往往会产生调制峰, 变成多模, 使得谱型变坏. 掺铒超荧光光纤光源(Erbium doped SFS, EDSFS)具有温度稳定性强、荧光谱线宽、输出功率高、使用寿命长及价格低廉等优点. 采用 EDSFS 作为 OCT 系统的光源, 可以利用光通信领域的现有先进技术, 建立全光纤式的 OCT 系统, 降低整个系统的成本. 但是该类光源获得的光谱往往不是高斯型, 因而在自相关函数中会出现旁瓣峰.

为了获得宽带、输出光谱为高斯型的光纤光源, 我们自行设计并研制出一种新型结构的超荧光光纤光源. 其输出光谱接近单高斯型, 中心波长为  $1.57 \mu\text{m}$ , 输出光谱宽度大于 75 nm, 输出功率为 27 mW. 根据理论公式<sup>[1]</sup>计算, 采用该光源的 OCT 系统可以获得小于 15  $\mu\text{m}$  的纵向分辨率.

\* 科技部重大基础研究前期研究专项基金(批准号 2002CCA01700)、国家自然科学基金(批准号 60378007)和光电信息技术科学教育部重点实验室(批准号 2005-07)资助的课题.

† E-mail: ymliang@nankai.edu.cn

## 2. 仪器设计思想及仪器结构

为了获得中心波长在  $1.55 \mu\text{m}$  附近、宽带及光谱谱型为高斯型的光源,我们在光源的结构设计中采取了几个措施(1)采用两个抽运源,980 nm 激光二极管(LD)和 1480 nm 激光二极管(LD)(2)在抽运光进入抽运介质之前,接光耦合器(3)在光源的输出端插入长周期光纤光栅(4)采用光控器对抽运源的输出功率进行精确控制。

我们设计的 EDSFS 系统的结构框图如图 1。抽运源 980 nm LD 和 1480 nm LD 的输出光通过光耦合器进入波分复用器 WDM,从 WDM 输出的抽运光分别抽运掺铒光纤产生 C 波段和 L 波段的光,980 nm LD 和 1480 nm LD 的控制端分别接光控器和温控器。光控器可以对抽运源输出功率进行精确控制,温控器控制抽运源的工作温度,以减小温度变化对抽运源输出波长和功率稳定性的影响,并防止温度过高影响抽运源的使用寿命。接光耦合器的目的是可以使光在传输通道内互补,从而达到调整光的谱型的目的,同时,增加光功率的稳定性。

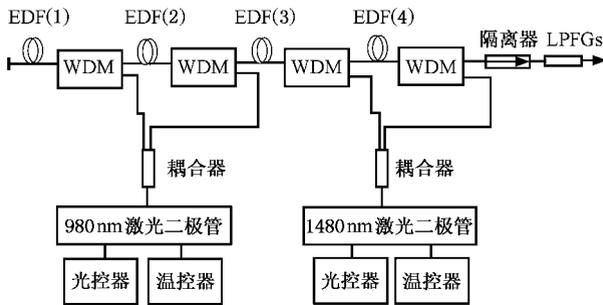


图 1 本文设计的 EDSFS 系统的结构框图

980 nm LD 和 1480 nm LD 的抽运光分别从 WDM 输入到掺铒光纤。抽运光在掺铒光纤(EDF)中被吸收,导致 1550 nm 自发辐射光的产生并放大。另外,在 EDF(1)的另一端镀金属反射膜,使其对 980 nm 和 1550 nm 的光均反射,从而可以使 980 nm 的抽运光在光纤中得到充分吸收,以提高抽运光的利用率,增大自发辐射的光功率。在输出端放置了光隔离器,其作用是衰减返回的光,以避免引起光源工作的不稳定,产生频率的漂移和幅度的变化。由于长周期光栅具有带阻滤波的作用,可以将相应波长的光散射到光纤包层中去,达到衰减该波长处输出光的作用,因此在光源的输出端插入专门设计的长周期光纤光

栅(LPFG)对光谱进行调制和整形。

## 3. 实验结果

### 3.1. 光源的光谱输出

实验中,分别调整 980 nm LD 和 1480 nm LD 的输出功率可以得到不同功率和谱型的输出光。当 980 nm LD 和 1480 nm LD 的输出功率分别设定为 250 和 140 mW,耦合器的分束比为 85/15 时,获得如图 2 接近平坦的输出光谱。但是,在光源输出谱线上 1531 nm 和 1571 nm 附近还有两个大峰,这是由于掺铒光纤本身特性造成的,可以用长周期光纤光栅(LPFG)将其衰减。

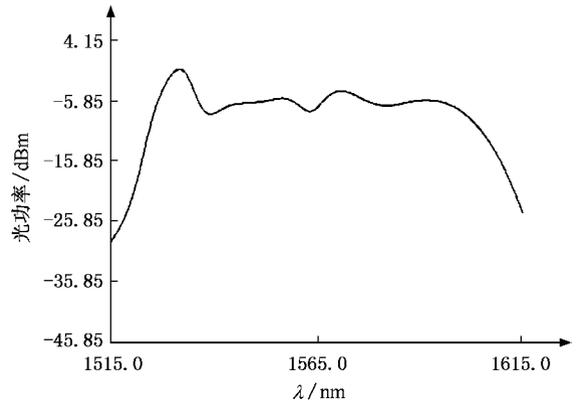


图 2 EDSFS 掺铒光纤直接输出的光谱图

为此,要求 LPFG 的衰减特性与要衰减的峰的特性正好互补。但是 LPFG 制作有一定难度,当衰减幅度增大时,带宽就比较窄,滤波后出现马鞍形状,因此,用一个 LPFG 很难达到目的,常常需要串接多个以满足深度和宽度的要求。根据输入光谱的谱型和输出光谱的要求,我们在光源输出端插入三个直接串接的 LPFG,其透射谱分别如图 3(a)~(c),它们分别在 1578,1572 及 1531 nm 附近衰减光谱,其损耗分别约为 5,14,13 dB。经过 LPFG 后的输出光谱如图 4。由光谱仪测得输出光谱的 3 dB 带宽为 76.7 nm,输出功率为 27 mW,输出功率稳定性为 0.17%(8 h)。

### 3.2. 光源自相关函数的测试

为了测试该光源在 OCT 系统中应用的可行性,我们采用如图 5 所示的迈克耳逊干涉仪来测试其输出光的自相关函数。从 EDSFS 光源发出的光,经过光隔离器后经 50/50 光纤耦合器分束,分别进入参

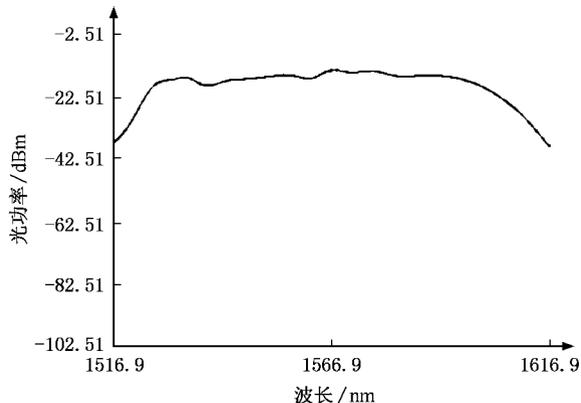
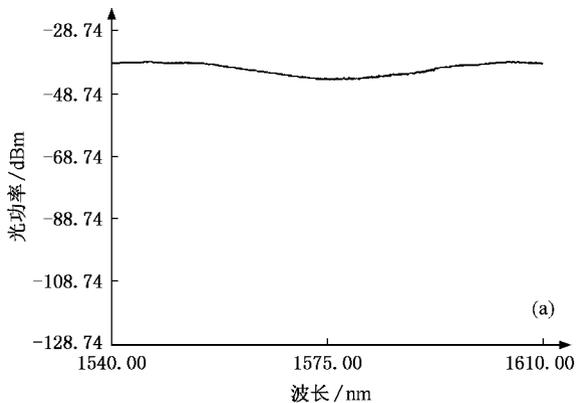


图 4 经过长周期光纤光栅后的光谱图

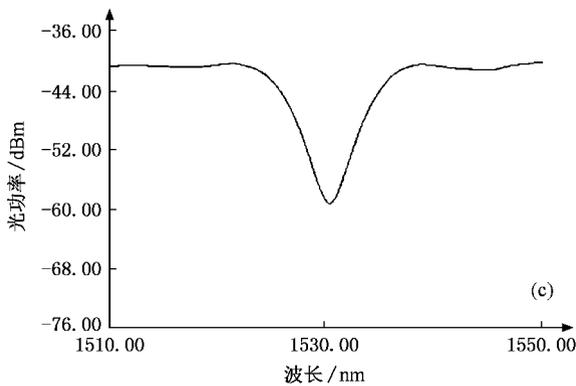
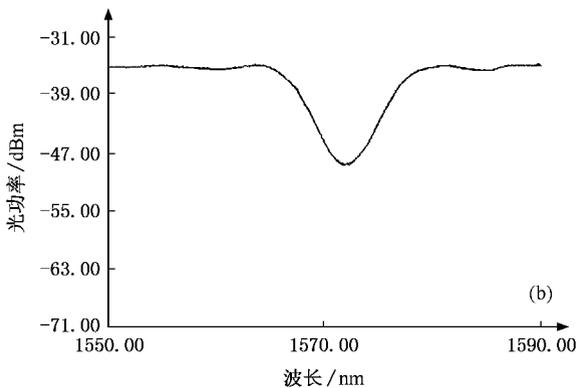


图 3 长周期光纤光栅透射谱图

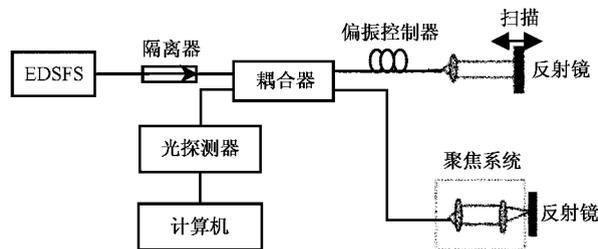


图 5 自相关函数测试原理图

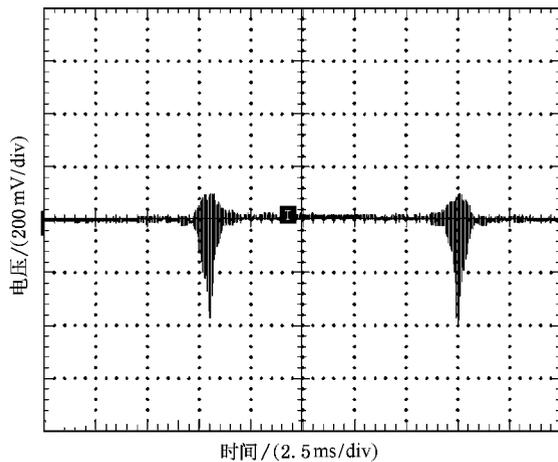


图 6 本文研制的光源光谱的自相关函数曲线

考臂和样品臂,参考臂和样品臂端均采用镜面反射.两臂反射的光经光纤耦合器后发生干涉,用探测器探测.参考臂前后扫描,获得具有时间延迟的干涉信号.另外,采用偏振控制器来提高干涉信号的强度.

图 6 为经过对数放大、直流滤波后光源输出光谱的自相关函数曲线.从图中可以看出,经过长周期光纤光栅调制和整形后的光源,其输出光谱的自相关函数的旁瓣峰被削弱.

作为对比,图 7 列出 JDS Uniphase 公司的光源 (BNS1415 型)的光谱图及其实测的自相关函数曲

线.该光源的 3 dB 带宽为 30 nm,输出功率为 11 mW.从图中看出,由于其光谱谱型不是高斯型,因而它的自相关函数中有较大的旁瓣峰.

### 4. 结 论

由上述实测结果看出,通过合理匹配 980 nm LD

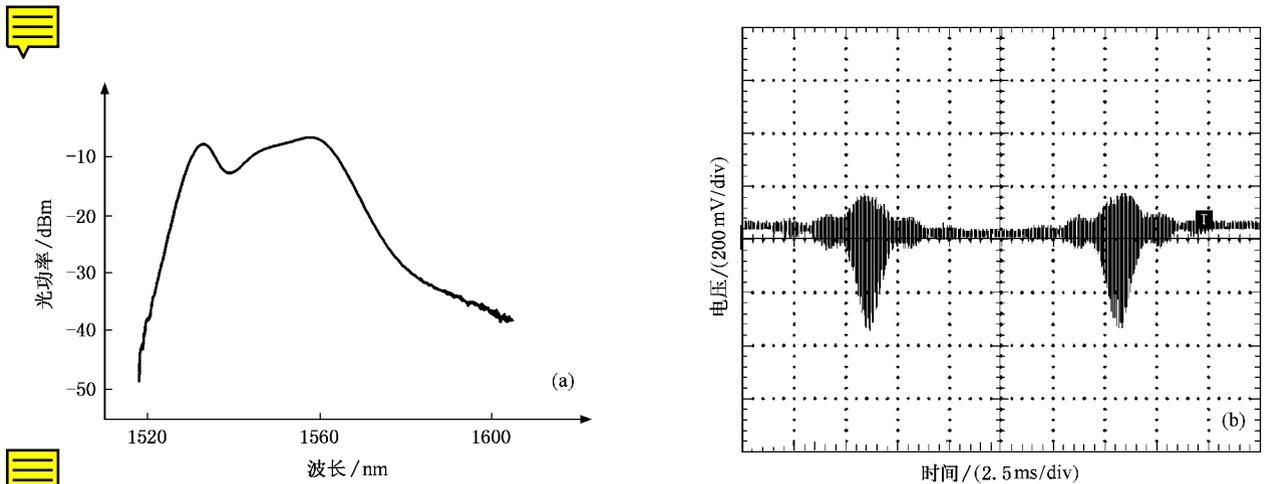


图 7 BNS1415 光源的光谱图 (a) 及其自相关函数曲线 (b)

和 1480 nm LD 的输出功率,选择光耦合器的分束比,并采用文中刻写的多级长周期光纤光栅对钕离子自发光谱进行调制和整形后可以输出宽带准高斯型的光谱,很好地抑制了其自相关函数的旁瓣峰,可以满足 OCT 系统的需要.下一步的工作是优化刻写光栅的参数,使刻写结果更加符合理论计算的要求,从而进一步优化长周期光纤光栅的透射谱,如增大

波长为 1530 nm 附近的光谱衰减幅度(图 3(c)),这样可以使光源的输出光谱更接近单高斯谱,从而可以进一步减小其自相关函数的旁瓣峰.

感谢南开大学特聘教授朱晓农教授和天津爱天光电子科技有限公司董苏珊教授在本文的研究中所给予的亲切指导.

- |  |   |
|--|---|
| <p>[ 1 ] Brezinski M E , Fujimoto J G 1999 <i>IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronic</i> <b>5</b> 1185</p> <p>[ 2 ] Fercher A F , Drexler W , Hitzenberger C K , Lasser T 2003 <i>Rep. Prog. Phys.</i> <b>66</b> 239</p> <p>[ 3 ] Bouma B E , Tearney G J , Boppart S A , Hee M R , Brezinski M E , Fujimoto J G 1995 <i>Opt. Lett.</i> <b>20</b> 1486</p> <p>[ 4 ] Drexler W , Morgner U , Kärtner F X , Pitris C , Boppart S A , Li X D , Ippen E P , Fujimoto J G 1999 <i>Opt. Lett.</i> <b>24</b> 1221</p> | <p>[ 5 ] Nishizawa N , Chen Y , Hsiung P , Ippen E P , Fujimoto J G 2004 <i>Opt. Lett.</i> <b>29</b> 2846</p> <p>[ 6 ] Choi B , Milner T E , Kim J , Goodman J N , Vargas G , Aguilar G , Nelson J S 2004 <i>J. of Biomedical Optics</i> <b>9</b> 282</p> <p>[ 7 ] Bouma B E , Nelson L E , Tearney G J , Jones D J , Brezinski M E , Fujimoto J G 1998 <i>J. of Biomedical Optics</i> <b>3</b> 76</p> <p>[ 8 ] Espindola R P , Ales G , Park J , Strasser T A 2000 <i>Electronics Letters</i> <b>36</b> 1263</p> |
|--|---|

# A new broadband fiber light source for optical coherence tomography<sup>\*</sup>

Liang Yan-Mei<sup>1)†</sup> Zhou Da-Chuan<sup>2)</sup> Meng Fan-Yong<sup>2)</sup> Wang Ming-Wei<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China*

<sup>2)</sup> *Tianjin Ai Tian Photonics Science & Technology Corporation, LTD, Tianjin 300384, China*

( Received 31 May 2006 ; revised manuscript received 23 October 2006 )

## Abstract

A new type of Gaussian-like broadband superfluorescent fiber light source suitable for optical coherence tomography (OCT) is introduced in this paper. Erbium-doped optical fiber simultaneously pumped by 980 nm laser diode (LD) and 1480 nm LD is used as the gain medium. Both optical controllers and temperature controllers are employed to adjust the output of LDs and to improve the stability of output power of light source. A fiber coupler with a specific splitting ratio plus multi-stage long period fiber gratings are used to modulate the output spectrum so that the spectral profile of the broadband light source is near Gaussian. The output power is about 27 mW with center wavelength at 1.57  $\mu\text{m}$  and the bandwidth over 75 nm. The experiment results reveal that the sidelobes of the autocorrelation function of the output spectrum are effectively suppressed, which can meet the need of optical coherence tomography.

**Keywords** : optical coherence tomography, superfluorescent fiber source, long period fiber grating, fiber coupler

**PACC** : 4255N 4260F 4225K 4260B

<sup>\*</sup> Project supported by the Special Program for Key Basic Research of the Ministry of Science and Technology of China ( Grant No. 2002CCA01700 ), the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60378007 ) and the Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, China ( Grant No. 2005-07 ).

<sup>†</sup> E-mail : ymliang@nankai.edu.cn