

# 大功率、高效率、高消光比铒光纤多波长超荧光光源\*

李家方 陈胜平 李乙钢 吕可诚 冯 鸣 闫培光 朱剑平 张 炜  
(南开大学物理科学学院光电信息科学系,天津 300071)

**摘 要** 采用改进的反射式 Mach-Zehnder 干涉滤波器,对双程后向结构掺铒光纤超荧光光源(DPB SFS) 分别进行光谱分割和光谱预分割,构建了两种结构的多波长超荧光光纤光源(MW SFS),波长间隔为 ~0.8 nm 时,在 1550 nm 附近(1542~1559 nm)20 个波长的功率波动小于 0.5 dB. 其中前者消光比高达 27 dB;后者消光比 ~18 dB,在泵浦光功率为 72.8 mW 时,最大输出功率 25.3 mW,光光转换效率高达 34.8%. 改变 Mach-Zehnder 干涉仪的臂长差,采用光谱预分割技术,得到 1550 nm 附近波长间隔 ~0.4 nm、消光比 ~16 dB 的 50 个波长输出.

**关键词** 超荧光光纤光源(SFS);多波长;双程后向(DPB)结构;Mach-Zehnder 干涉滤波器(MZI);光谱分割;光谱预分割

**中图分类号** TN253;TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

随着大容量光纤通信网的发展,波分复用(WDM)系统得到广泛的应用,使得满足 WDM 技术要求的多波长光纤光源得到广泛深入的研究. 掺铒光纤多波长(MW)超荧光光源(SFS)<sup>[1,2]</sup>,与分布反馈式半导体激光器阵列相比,在稳定性、散热性、寿命、兼容性和价格等方面具有巨大优势;同时 MW SFS 输出光为非相干光,因此在光纤通信系统和分布式传感等方面比多波长光纤激光器具有更为广泛的用途. 在以往的研究方案中,一般都采取对宽带 SFS 进行光谱分割<sup>[3~5]</sup>来获取 MW SFS. 这种将多波长滤波器置于宽带 SFS 输出端的光谱分割技术由于结构简单和全光纤化等优点而得到广泛的研究. 但是,多波长滤波器滤去了大量的荧光,使得整体结构的功率损耗过大,导致 MW SFS 的输出功率和转换效率偏低,大大限制了其实际应用.

我们在研究掺铒光纤超荧光宽带光源和光谱分割<sup>[4,5]</sup>的基础上,设计了一种更为有效的掺铒光纤多波长光源. 本文在分析三种 Mach-Zehnder 干涉滤波器(MZI)<sup>[6,7]</sup>输出特性的基础上,采用改进的反射式 MZI(Improved Reflected MZI, IR-MZI)对自行研制的双程后向结构掺铒光纤超荧光光源(DPB SFS)<sup>[8~10]</sup>进行光谱分割,得到消光比高达 27 dB、波长间隔 ~0.8 nm 的 MW SFS,1550 nm 附近 20 个波长的功率波动小于 0.5 dB;采用这种 IR-MZI 对 DPB SFS 进行光谱预分割,构建了一个大功率、高效

率、高消光比的 MW SFS;在最大泵浦功率 72.8 mW 情况下,未经放大得到了 25.3 mW 的多波长输出,光光转换效率高达 34.8%;实验得到 1550 nm 波长附近 20 个波长的平坦输出,波长间隔 ~0.8 nm,消光比 ~18 dB,功率波动小于 0.5 dB;改变 Mach-Zehnder 干涉仪的臂长差,得到 1550 nm 波长附近波长间隔 ~0.4 nm、消光比 ~16 dB 的 50 个波长输出. 如此优良特性的 MW SFS 尚未见报道.

## 1 Mach-Zehnder 干涉滤波器特性分析

Mach-Zehnder 干涉滤波器(MZI)主要有三种结构,如图 1,分别为透射式 MZI(Transmitted MZI, T-MZI)、反射式 MZI<sup>[6]</sup>(Reflected MZI, R-MZI)和改进的反射式 MZI(IR-MZI)<sup>[7]</sup>结构示意图. T-MZI 由两个 3dB 耦合器串接而成,它有两个输入端和两个输出端,为便于分析,我们只取其中一个输入端 O 和一个输出端 P 进行研究;将 T-MZI 的两个输出端焊接起来,就构成了一个 R-MZI 结构;IR-MZI 是在 T-MZI 的一个输出端 P 焊接一个光纤反射环境(FLM)构成的,FLM 由一个 3 dB 耦合器和一段普通单模光

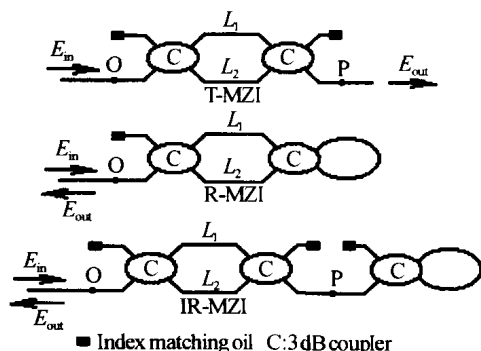


图 1 三种 M-Z 干涉滤波器结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of three MZIs

\*国家高技术研究发展计划(2003AA312100)和国家自然科学基金(60137010;60377010)资助项目

纤构成. 所有闲置端口均浸入折射率匹配液中, 以避免端口反馈对滤波器特性造成影响. T-MZI 透射率及 R-MZI、IR-MZI 反射率可表述为

$$T\text{-MZI}: T(\lambda) = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi)$$

$$R\text{-MZI}: R(\lambda) = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\Delta\phi)$$

$$IR\text{-MZI}: R(\lambda) = \frac{1}{4}(1 - \cos \Delta\phi)^2$$

式中,  $\Delta\phi = 2\pi n\Delta L/\lambda$  代表干涉仪两个干涉臂单程传输相位差,  $\Delta L$  为干涉仪臂长差,  $n$  为纤芯有效折射率,  $\lambda$  为波长. 对  $T(\lambda)$  及  $R(\lambda)$  分别进行积分运算处理可得到理想情况下 T-MZI、R-MZI、IR-MZI 插入损耗分别为 3 dB、3 dB、4.3 dB. 考虑到结构的其它损耗, 滤波器实际的插入损耗均大于相应数值.

根据  $T(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$  及  $\Delta\phi$  的表达式, 可以得到各滤波器输出波长间隔为

$$T\text{-MZI}: \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L}; \quad R\text{-MZI}: \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n\Delta L};$$

$$IR\text{-MZI}: \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L}$$

由于实验时受到光谱仪最小分辨率的影响, 不可能得到根据理论值所得的无穷大消光比, 因此我们取实验光谱仪的最小分辨带宽 (Resolution Bandwidth) 0.08 nm 为波长取样积分间隔进行了数值模拟, 得到图 2 的模拟光谱曲线, 虚线、实线、点线分别代表 T-MZI 透射谱线、R-MZI 反射谱线、IR-MZI 的反射谱线 (模拟取值  $\Delta L = 2$  mm). 可以看到, 对于相同的  $\Delta L$ , T-MZI 透射谱线和 IR-MZI 反射谱线波长间隔相同, 是 R-MZI 波长间隔的两倍. 同时, 谱线的消光比分别为 T-MZI  $\sim 20$  dB、R-MZI  $\sim 15$  dB、

IR-MZI  $\sim 40$  dB, 改进的反射式 MZI—IR-MZI 比其它两种 MZI 具有更好的滤波特性, 因此将其应用于 MW SFS 将会取得更好的效果.

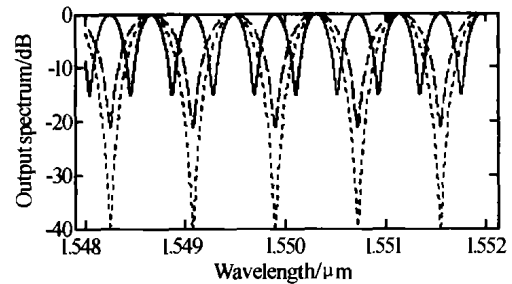


图 2 数值模拟光谱曲线 ( $\Delta L = 2$  mm)  
Fig. 2 Simulated output spectrum of MZIs

## 2 实验研究及结果

### 2.1 基于 IR-MZI 光谱分割的 MW SFS

图 3 是基于 IR-MZI 的 MW SFS 结构示意图, 此结构称为光谱分割结构. 宽带光源是一个双程后向结构的掺铒光纤超荧光光源 (DPB SFS)<sup>[8-10]</sup>, DPB SFS 的前向反射镜是一个端面镀膜的光纤反射镜 ( $R \sim 60\%$ ); 掺铒光纤 (EDF) 长 10 m, 掺杂浓度约 600 ppm; 环形器的 1 端口与 DPB SFS 输出端相连, 以阻隔不必要的反馈光. 实验采用 980 nm 的 LD 进行泵浦, 在最大泵浦功率 72.8 mW 条件下从环形器 2 端得到 25.5 mW 的超荧光输出, 输出谱线如图 4(a) 所示, 在 1550 nm 附近约有 20 nm 的光谱平坦区. 环形器的 2 端口与 IR-MZI 的 O 端焊接在一起, 光束经滤波器反射后从 3 端口输出. 波分复用耦合器对 1550 nm 光的插入损耗约为 0.3 dB; 3 dB 耦合器插入损耗小于 0.1 dB; 环形器插入损耗约 0.5 dB; 所有熔接点损耗之和估计小于 0.3 dB.

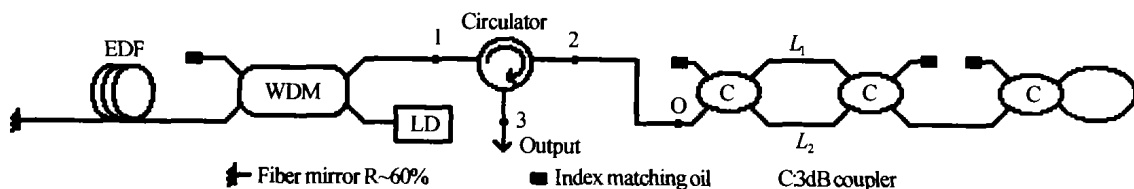


图 3 基于 IR-MZI 光谱分割的 MW SFS 结构示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of spectrum-sliced MW SFS based on IR-MZI

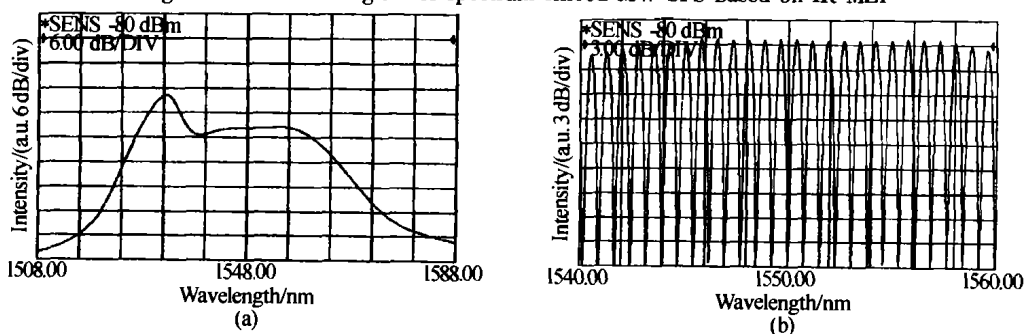


图 4 (a) DPB SFS 的输出谱线, (b) 光谱分割实验输出谱线  
Fig. 4 (a) Output spectrum of DPB SFS, (b) Output spectrum of spectrum-sliced MW SFS

为得到符合 ITU 标准 ( $\sim 0.8$  nm) 的多波长输出,我们设计干涉仪的臂长差为  $\sim 2$  mm,实验得到 1550 nm 附近的 20 个波长输出,如图 4(b) 所示,波长间隔  $\sim 0.8$  nm,消光比高达 27 dB,功率波动小于 0.5 dB. 同时,输出波长的消光比不随泵浦功率的增减而变化. 实验所用光谱仪的最小分辨带宽为 0.08 nm,如果采用更高分辨率的光谱仪,可观测到更高消光比的多波长输出.

虽然此种结构的 MW SFS 消光比十分理想,但在 72.8 mW 的泵浦功率下,该 MW SFS 的输出功率只有 8.0 mW,总的光光转换效率只有 11.0%. 为了

改进 MW SFS 的输出性能,我们设计了下文的一种新颖结构.

## 2.2 基于 IR-MZI 光谱预分割的 MW SFS

改进的基于 IR-MZI 的 MW SFS 结构如图 5 所示,我们称其为光谱预分割结构. 在整体实验器件不变的情况下改变实验结构,采用改进的反射式 M-Z 干涉滤波器 (IR-MZI) 代替 DPB SFS 的前向反射镜,前向荧光经 IR-MZI 反射并进行光谱分割后,再经 EDF 放大,最后从环行器的 2 端口直接得到多波长输出.

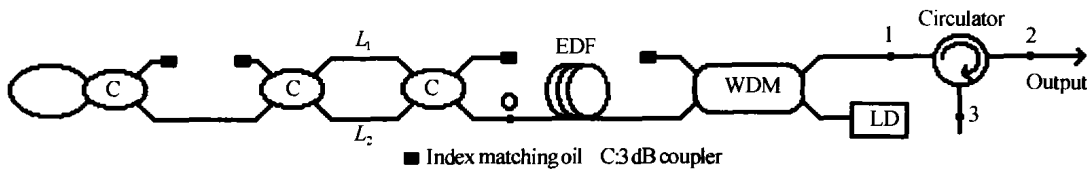


图 5 基于 IR-MZI 光谱预分割的 MW SFS 结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spectrum-presliced MW SFS based on IR-MZI

实验得到了 1550 nm 附近的 20 个波长输出,如图 6(a),波长间隔  $\sim 0.8$  nm,消光比  $\sim 18$  dB,功率波动小于 0.5 dB. 更宽范围的多波长输出见图 6(b),可以看到,在宽达 40 nm 的范围内,各波长处的消光比几乎不变.

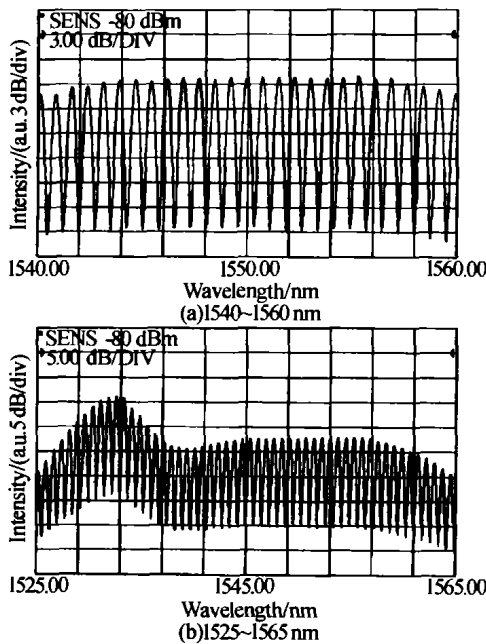


图 6 基于 IR-MZI 光谱预分割的 MW SFS 输出谱线 ( $\Delta L \sim 2$  mm)

Fig. 6 Output spectrum of spectrum-presliced MW SFS based on IR-MZI ( $\Delta L \sim 2$  mm)

利用上述 MW SFS 结构,改变 Mach-Zehnder 干涉仪的臂长差  $\Delta L$ ,可以调整波长间隔的大小,从而实现输出波长数目的调节,获得任意波长间隔的多波长超荧光光源. 图 7 是调节  $\Delta L \sim 4$  mm、泵浦光功率为 50.1 mW 时基于 IR-MZI 光谱预分割的 MW SFS 输出光谱,在 1540 ~ 1560 nm 范围内获得近 50

个波长输出,波长间隔  $\sim 0.4$  nm. 受限于实验光谱仪的分辨率 0.08 nm,我们观测到的消光比为  $\sim 16$  dB. 50 个波长的功率波动小于 1.5 dB; 其中,1546 ~ 1554 nm 范围内 20 个波长的功率波动小于 0.3 dB.

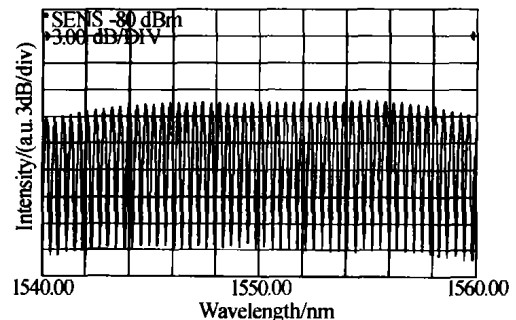


图 7 基于 IR-MZI 光谱预分割的 MW SFS 输出谱线 ( $\Delta L \sim 4$  mm)

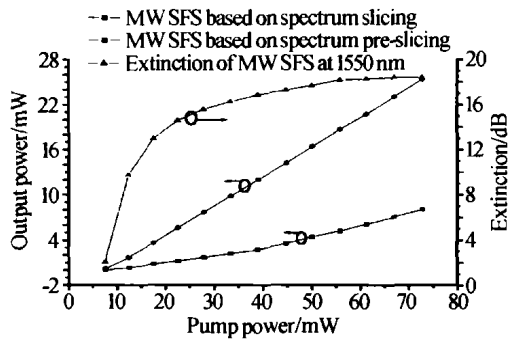
Fig. 7 Output spectrum of spectrum-presliced MW SFS based on IR-MZI ( $\Delta L \sim 4$  mm)

## 3 实验分析

如 2.1 节所述,基于 IR-MZI 光谱分割的 MW SFS 虽然在输出功率方面不是很理想,但它具有高达 27 dB 的消光比,因此在输出功率要求不是很高的情况下,它是一种优良的多波长光纤光源.

与光谱分割技术相比,基于 IR-MZI 的光谱预分割结构获得了更高功率和转换效率的多波长输出,如图 8(左)所示,在 72.8 mW 的泵浦光功率下得到 25.3 mW 的高功率多波长输出,光光转换效率达到 34.8%,其多波长输出功率几乎达到了采用光纤反射镜时 DPB SFS 的最大输出功率 25.5 mW. 这主要得益于用 IR-MZI 代替了 DPB SFS 的前向反射镜,滤波器在反射前向荧光的同时,还对前向荧光进行光谱分割,经过光谱分割后的光束再经 EDF 放大输

出,这样滤波器还起到了调整不同波长间功率分配的作用,而不是像单纯的光谱分割结构那样将部分光损耗掉,因此结构的损耗很小;同时,虽然 IR-MZI 的插入损耗大于 4.3 dB,与其对应的等效反射率小于 37.5%,低于 DPB SFS 光纤反射镜的反射率 (~60%),但我们采用了 DPB 结构和长度优化的光纤,使得由前向反射镜反射率不同引起的输出功率差别很小<sup>[1,5]</sup>.



Left: Output power versus input power of MW SFSs  
Right: Extinction versus input power of MW SFS at wavelength of 1550 nm

图 8 MW SFS 输出特性

Fig. 8 Output characteristics of MW SFS

值得注意的是,基于 IR-MZI 光谱预分割 MW SFS 输出光束的消光比与泵浦光功率的大小有关,如图 8(右),当泵浦光功率较小时几乎不能产生多波长输出;当泵浦光功率大于 12.4 mW 时消光比才达到 10 dB;泵浦光功率大于 50.1 mW 时消光比接近饱和状态,消光比的最大值为 18.4 dB. 这主要因为,当泵浦光功率较小时,只有很少量的前向荧光到达滤波器并被反射回来,滤波器几乎起不到光谱预分割的作用,也就得不到多波长输出;随着泵浦光功率的增加,越来越多的前向荧光经滤波器反射并放大后形成多波长输出,使得输出光的消光比随着泵浦光功率的增加而增大;但是,由于后向荧光的存在,输出光束的消光比不可能一直增大<sup>[1]</sup>,当泵浦光功率增加到一定程度后就达到一个饱和状态,这也正是基于光谱预分割 MW SFS 的消光比小于基于光谱分割 MW SFS 的一个重要原因.

## 4 小结

对三种 Mach-Zehnder 干涉滤波器输出特性进行了简要分析,并采用 IR-MZI 结构,对双程后向结构掺钕光纤超荧光光源(DPB SFS)进行光谱分割,得到一个消光比高达 27 dB 的 MW SFS. 运用改进方案,采用这种 IR-MZI 对 DPB SFS 进行光谱预分割,构建了一个优良特性的 MWSFS,消光比 ~18 dB,

最大输出功率 25.3 mW,光光转换效率高达 34.8%. 改变 Mach-Zehnder 干涉仪的臂长差,得到 1550 nm 波长附近波长间隔 ~0.4 nm、消光比 ~16 dB 的 50 个波长输出. 对两种光源的性能进行了分析和比较. 实验研究和结果对于掺钕光纤多波长超荧光光源的研制和应用具有重要的指导意义.

## 参考文献

- 1 Su C D, Wang L A. Multiwavelength fiber sources based on double-pass superfluorescent fiber sources. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(5): 708 ~ 714
- 2 Su C D, Wang L A. Multiwavelength fiber source by using long period fiber gratings in superfluorescent fiber source. *Electronics Letters*, 1999, **35**(11): 927 ~ 929
- 3 范小波,郝素君,陈志勋. WDM 系统中光谱可分割光纤光源的实验研究. *上海交通大学学报*, 2002, **36**(5): 675 ~ 677  
Fan X B, Hao S J, Chen Z X. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, **36**(5): 675 ~ 677
- 4 陈胜平,吕可诚,李乙钢,等. 大功率高效率掺钕超荧光光纤光源及其应用. *光子学报*, 2004, **33**(1): 17 ~ 20  
Chen S P, Lü K C, Li Y G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 17 ~ 20
- 5 李家方,陈胜平,吕可诚,等. 掺钕光纤宽带光源的优化及光谱分割实验研究. *光电子技术*, (待发表)  
Li J F, Cheng S P, Lü K C, et al. *Submitted to Optoelectronic Technology* (To be published)
- 6 An H L, Lin X Z, Pun E Y B. Multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser with a novel dual-pass Mach-Zehnder comb filter. *APCC/OECC'99*, 1999, **2**: 1495 ~ 1498
- 7 李杰,黄勇林,开桂云,等. 马赫-曾德尔干涉仪消光比和单通道光开关. *光学学报*, 2003, **23**(8): 916 ~ 919  
Li J, Huang Y, Kai G Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 916 ~ 919
- 8 Wang L A, Chen C D. Comparison of efficiency and output power of optimal Er-doped superfluorescent fibre sources in different configurations. *Electronics Letters*, 1997, **33**(8): 703 ~ 704
- 9 Wang L A, Chen C D. Characteristics comparison of Er-doped double-pass superfluorescent fiber sources pumped near 980 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(4): 446 ~ 448
- 10 沈林放,钱景仁. 高稳定宽频带掺钕光纤超荧光光源. *光学学报*, 2001, **21**(3): 300 ~ 304  
Shen L F, Qian J R. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 300 ~ 304

## Multi-wavelength Erbium-doped Superfluorescent Fiber Source with High Power, High Efficiency and High Extinction

Li Jiafang, Chen Shengping, Li Yigang, Lü Kecheng, Feng Ming, Yan Peiguang, Zhu Jianping, Zhang Wei

*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*

Received date: 2003-11-10

**Abstract** Based on an erbium-doped double pass backward (DPB) superfluorescent fiber source (SFS), by employing a improved Mach-zehnder interferometer filter (MZI) as spectrum slicing and spectrum pre-slicing component, respectively, two multi-wavelength superfluorescent fiber sources (MW SFSs) with channel spacing of  $\sim 0.8$  nm are got. For the 20 channels around 1550 nm (from 1542 to 1559 nm), the power fluctuations are less than 0.5 dB. The extinction of the former is as high as 27 dB, and the latter is  $\sim 18$  dB. With the latter schematic, output power as high as 25.3 mW with pump efficiency of 34.8% is achieved under a limited 980 nm pump power of 72.8 mW. By changing the difference of the arms of the Mach-Zehnder interferometer filter, 50 channels around 1550 nm with spacing of  $\sim 0.4$  nm are got, and the extinction is  $\sim 16$  dB.

**Keywords** Superfluorescent fiber source (SFS); Multi-wavelength; Double pass backward (DPB) configuration; Mach-Zehnder interferometer (MZI) filter; Spectrum slicing; Spectrum pre-slicing

**Li Jiafang** was born in 1980. He received B. S. degree from Nankai University in 2002. Now he is a graduate student of Institute of Physics, Nankai University. He engages in fiber laser technology and optical communications.

