

多波长掺铒光纤激光器的研究进展

苏伟跃^{1,2} 吴锐欢^{1,2}

¹华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006

²华南师范大学广东省光电信息实验教学示范中心, 广东 广州 510006

摘要 多波长掺铒光纤激光器(MW-EDFL)在密集波分复用(DWDM)系统中具有重要作用,是近年来光纤通信领域的研究热点。回顾了多波长掺铒光纤激光器的发展历史,介绍了多波长掺铒光纤激光器的工作原理,包括其抑制模式竞争、实现多波长输出的方式,着重介绍了多种梳状滤波器的原理,包括 Lyot 滤波器、Sagnac 干涉环、Mach-Zehnder 干涉仪。综述了近年来实现多波长掺铒光纤激光器的研究成果,分析了各个实现方案的优劣特性,并对其应用和发展前景进行了展望。

关键词 激光器; 多波长; 掺铒光纤; 梳状滤波器

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.090004

Research Progress of Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Lasers

Su Weiyue^{1,2} Wu Ruihuan^{1,2}

¹School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

²Education Center of Optoelectronic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Multi-wavelength erbium-doped fiber lasers (MW-EDFL), which play an important role in dense wavelength division multiplexing (DWDM), have been the focus of optical communications in recent years. The history of MW-EDFL is reviewed briefly. The operating principle of MW-EDFL is reviewed, including the suppression of mode competition to obtain the multi-wavelength output. The principle of comb filters, including the Lyot filter, Sagnac interference loop and Mach-Zehnder interferometer, is discussed in detail. The recent research achievements of MW-EDFL are introduced and their pros and cons are analyzed. Moreover, their promising future is presented.

Key words lasers; multi-wavelength; erbium-doped fiber; comb filter

OCIS codes 140.3500; 140.3510; 060.2410; 060.3510

1 引言

随着大容量光纤通信网的发展,密集波分复用(DWDM)技术得以广泛应用,DWDM技术的飞速发展促进了多波长光纤激光器技术的进一步发展^[1]。目前,中心局端及光网络单元大量光源的高昂成本,已经严重阻碍了波分复用无源光网络的快速发展^[2]。适用于该系统的激光光源——多波长激光器,可以同时为多个信道提供所需光源,使光发射端的成本大幅度降低,为实现 DWDM 低成本传输提供了理想的解决方案。

多波长激光器可以用半导体激光器阵列来实现,也可以用掺稀土元素的光纤激光器来实现。由于光纤激光器应用于光纤通信系统中具有插入损耗小等优点,并且掺铒光纤的增益范围对应着光纤通信的低损窗口,因而满足 DWDM 要求的多波长掺铒光纤激光器日益成为国内外学者研究的重点。此外,多波长光纤激光器还广泛应用于光传感^[3-5]、光信息处理^[6]等方面。

收稿日期: 2014-03-13; 收到修改稿日期: 2014-04-09; 网络出版日期: 2014-08-06

基金项目: 华南师范大学国家级创新训练实践项目(1057413088)

作者简介: 苏伟跃(1992—),男,本科生,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: su_wy@outlook.com

2 发展历史

随着长距离波分复用系统的发展,人们需要能够同时产生多种波长的激光器。以前获得多波长激光的方法是在每个频道用独立的增益介质来获得精确的波长,但是这样系统过于复杂,成本较高。

光纤激光器发明之后,常被用作产生连续光信号的光源,在稀土掺杂光纤放大器或激光器中^[7],抽运光激发稀土离子的集居数反转,通过受激辐射使信号波长光放大。它具有高增益和高效的能量转换。与半导体激光器相比,掺稀土光纤具有更高的信噪比,半导体激光器的相对强度噪声在 -125 dB/Hz左右,而光纤激光器则小于 -160 dB/Hz^[8]。激光器的工作波长由掺杂离子决定,掺铒光纤激光器对应的波段对应于光纤通信的低损窗口^[9-10],因此多波长光纤激光器大多集中于掺铒光纤作为增益介质的研究。

掺铒光纤能够产生较宽的增益带宽,但是,掺铒光纤在增益频谱上具有均匀的展宽特性,很难获得多波长的输出。由于激光线之间有着很强的模式竞争,需要合适的腔体结构来抑制模式竞争,产生多波长输出。最初的研究发现在液氮冷却下能降低掺铒光纤的均匀加宽线宽同时获得多波长输出^[11-12],然而这种方法的低温要求在很多应用中受到限制。近年来,人们发现了使用非线性偏振旋转型光纤激光器中非线性损耗引起的峰值限制效应可以有效地抑制激光器的模式竞争,在腔内梳状滤波器的共同作用下实现常温下稳定的多波长输出^[13]。

3 工作原理

多波长光纤激光器的工作原理与其具体实现方案有关。产生多波长输出的基础是增益介质能实现宽频带上的激光增益,就此而言,目前掺铒光纤激光器的研究最为集中^[10]。在此基础上,采用不同方式抑制模式竞争,使多个波长选择性振荡,是实现光纤激光器多波长输出的关键。目前,主要的方式有基于保偏光纤的Lyot滤波器^[14]、Sagnac干涉环^[15]和具有两干涉臂的马赫-曾德尔(M-Z)滤波器^[16]等。

3.1 Lyot滤波器

Lyot滤波器结构简单,由两个偏振控制器(PC)和保偏光纤(PMF)组成,如图1所示。在第一个偏振控制器的作用下,线偏振光入射到保偏光纤中,以 θ_1 角将入射光投影到保偏光纤的两个正交轴上进行传输,在输出端保偏光纤快慢轴与第二个偏振控制器对准成 θ_2 角。

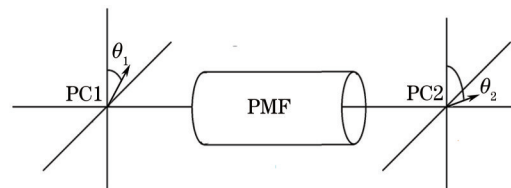


图1 Lyot滤波器示意图

Fig.1 Schematic of Lyot filter

通过琼斯矩阵可计算得出传输函数为

$$|T|^2 = \cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2 + 0.5 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\Delta\phi + \Delta\phi'), \quad (1)$$

式中 T 表示传输函数, $\Delta\phi$ 是由偏振控制器引入的沿保偏光纤两正交双折射轴 u 和 v 光分量的相位差, $\Delta\phi'$ 是两正交偏振分量在保偏光纤中传输而产生的线性相移差。由(1)式可以看出,Lyot滤波器的输出是波长的周期性函数,改变坐标轴之间的夹角可以调整输出的对比度。

3.2 Sagnac干涉环

单个保偏光纤Sagnac干涉环结构如图2所示,通常由一个3 dB光纤耦合器(coupler)、一个偏振控制器(PC)和一段保偏光纤(PMF)构成。当入射光从耦合器1端注入分成两路光,这两路光将沿顺时针和逆时针两方向在光纤环内运转,偏振控制器等效于两个 $\lambda/4$ 波片和一个 $\lambda/2$ 波片,分别为这两路光引入一些固定的快慢轴相位差,同时光场经过保偏光纤时也将产生另一快慢轴相位差,这两束光最终又回到耦合器并干涉形成梳状滤波器。

Sagnac干涉环的梳状滤波自由频谱范围为 $\Delta\lambda = \lambda^2/(\Delta n \cdot l)$ (式中 Δn 和 l 分别为保偏光纤的模式双折射性和长度)^[17],可见滤波峰波长间隔随保偏光纤的折射率差 Δn 和长度 L 变化而变化,由于 Δn 在保偏光纤选定后一般不可变,经常通过改变保偏光纤的长度来实现波长间隔的可调谐。

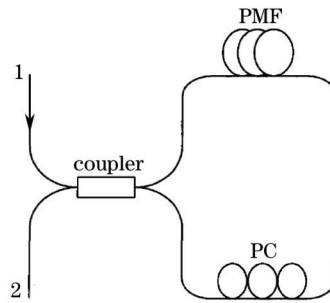


图2 Sagnac干涉环示意图

Fig.2 Schematic of Sagnac interference loop

3.3 M-Z滤波器

M-Z滤波器主要由两个3 dB光纤耦合器通过两个不等长的干涉臂连接而成。当入射光从输入端注入,经过3 dB光纤耦合器后分为两路光分别在两干涉臂中传输,由于两干涉臂不等长导致这两路光形成了一定的相位差,相互干涉后最终输出。

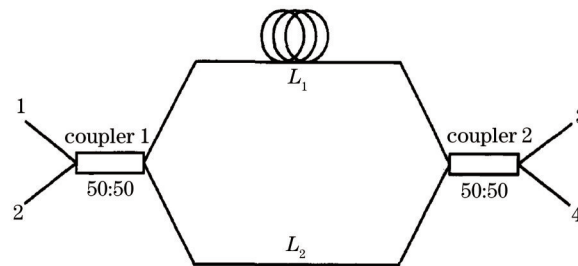


图3 M-Z滤波器示意图

Fig.3 Schematic of M-Z filter

因为不同波长光注入所引入的相位差不同,有些波长构成干涉加强,而有些波长构成干涉减弱,因此在输出端可以观察到规律的梳状滤波。波长间隔可通过改变两干涉臂长差或改变折射率而改变。

4 最新进展

4.1 基于非线性放大环形镜的多波长掺铒光纤激光器

基于非线性放大环形镜(NALM)的多波长掺铒光纤激光器(EDFL)^[18]主要由两部分构成,如图4所示,右侧的主体是一个NALM。NALM作为一种传统的类可饱和吸收体可以用于脉冲整形及锁模。通过NALM里另外两个PC的调整能够选定它的传输特性,这种传输特性是和强度相关的。NALM作为快捷可饱和吸收体以及偏振均衡器来抑制掺铒光纤激光器中的模式竞争。与非线性偏振旋转(NPR)^[19]和非线性光纤环形镜(NOLM)^[20]相比,NALM本身是激励成分,所以激光器不需要另外的增益介质,并且激光器的阈值非常低。另外,NALM的传输函数 T 与增益系数 G 是相关联的。

$$T = G\{1 - 0.5[1 + \cos\{0.5(1 - G) \cdot 2\pi n_2 P_{in} L / (\lambda A_{eff}) + \phi_d\}]\}, \quad (2)$$

式中 n_2 为非线性系数, λ 为工作波长, A_{eff} 为有效的纤芯面积, L 为单模光纤的长度, ϕ_d 是由为PC1控制的双折射感应相位。由于 λ 、 n_2 、 A_{eff} 的变化非常小,可以被视为常数,取 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$, $L = 5 \text{ km}$, $\lambda = 1590 \text{ nm}$,传输函数是关于 G 的函数,意味着改变增益系数 G 就能改变NALM的传输特性。

装置左边的主体是环形器、一段未抽运的掺铒光纤和一个带有保偏光纤的Sagnac环形镜。未抽运的掺铒光纤有两个作用,1) 吸收不希望发生的自发辐射,增大激光器的信噪比,抑制模式竞争;2) 引入合适的额外腔损耗,能够相应地提高NALM的增益系数 G ,从而间接地优化了多波长产生机制。该装置用到的梳状滤波器实际上是左侧的Sagnac滤波器,其频谱范围见3.2节所述。

当抽运功率只有70 mW时,该装置能够得到0.45 nm波长范围内,多于62个波长的带宽为6 dB的激光输出或者是51个波长的带宽为3 dB的激光输出。另外,该激光器还被尝试并验证了在通信频道波长内优良的可调谐性和功率稳定值。然而,使用NALM与使用NPR或者NOLM有着类似的缺点,激光器的多波长

输出完全依赖于NALM的锁模特性,谐振腔的参数如腔损耗、偏振态等需要十分细微地调节,否则很难实现多波长的输出,这一方面使用可饱和吸收体会更有优势。

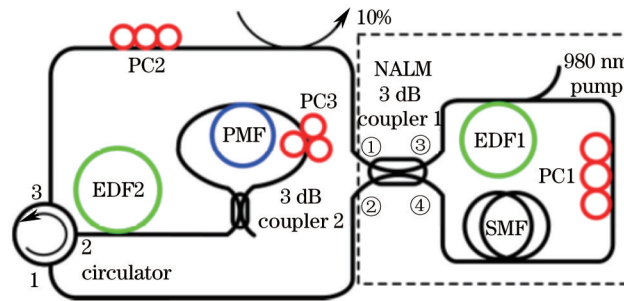


图4 基于NALM的多波长掺铒光纤激光器示意图

Fig.4 Schematic of multi-wavelength EDFL based on NALM

4.2 基于半导体可饱和吸收镜和PMF的可谐调多波长被动锁模光纤激光器

被动锁模光纤激光器能够获得满足锁模条件的激光波长,并且不需要外加调幅器,因而结构更加简单,损耗更小。但是,常用的两种技术NPR和NALM在实现过程中,腔的系数如腔损耗和偏振设置需要很精确的设置,这在实际操作中有一定困难。通过引入半导体可饱和吸收镜(SESAM),可以更容易地实现被动锁模^[21]。

图5是一种基于SESAM^[22]和Lyot梳状滤波器的可谐调多波长被动锁模光纤激光器,其中偏振隔离器(PD-ISO)除了能够保证单向传播外还有两个作用,1)与PMF连接形成时延梳状滤波器,同时作为波长选择的机制;2)与PC连接,作为与波长相关的损耗机制。SESAM由一个环形器连入腔中,SESAM加入后,只要发射的激光波长在SESAM的高反射带内,即使不用很精确地去调节PC也能得到锁模,并且得到的多波长输出的波峰能量更大,脉冲由于NPR和SESAM的双重作用也变得更加陡峭。虽然具有可谐调优势,但是该激光器的脉冲基本重复频率是7.44 MHz,与使用主动锁模技术相比较低,也意味着将携带的通信信息更少。若使用高掺杂光纤^[23],可以减少谐振腔长度,从而提高重复频率^[24]。

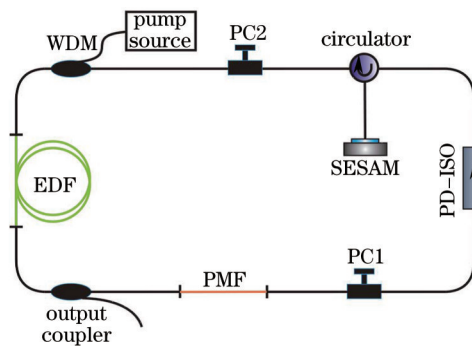


图5 基于SESAM的多波长被动锁模光纤激光器示意图

Fig.5 Schematic of multi-wavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM

4.3 基于改进M-Z滤波器的多波长EDFL

标准的M-Z梳状滤波器并不能在一个输出端口上对不同波长的激光输出作动态的切换,用位于其中一臂的PC来实现切换功能效率较低,因而出现了一种基于偏振分束器的M-Z梳状滤波器^[25],通过调节进入偏振分束器的光偏振方向,使得光在两臂中各自的强度发生改变,从而实现波长的切换。

如图6所示,由压电式转换器覆盖的单模光纤(SMF)作为相位调制器来抑制模式竞争。多波长的梳状滤波器由可旋起偏器、光纤偏振分束器、3 dB的光纤耦合器组成。

首先分析该滤波器的传输函数,由于可旋起偏器位于偏振分束器(PBS)之前,输入光经过起偏器后形成线偏振光,与PBS主轴形成 α 夹角。之后,输入光被分成偏振方向正交的两部分分别在两臂传输,并最后在输出耦合器发生干涉。两输出端的传输函数为

$$T_1 = \cos^2 \alpha - c \cos 2\alpha + \sqrt{c(1-c)} \sin 2\alpha \sin \phi, \quad (3)$$

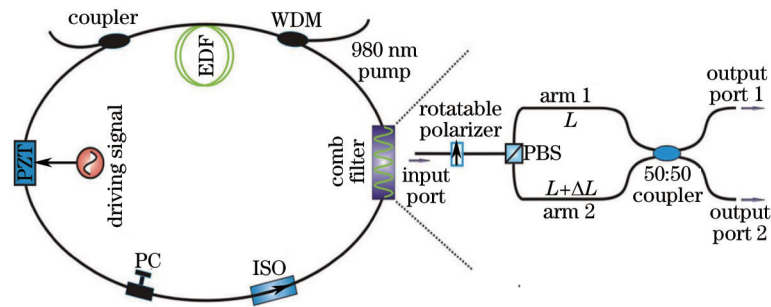


图6 基于改进M-Z滤波器的多波长掺铒光纤激光器的示意图

Fig.6 Schematic of multi-wavelength EDFL based on M-Z filter

$$T_2 = \sin^2 \alpha - c \cos 2\alpha - \sqrt{c(1-c)} \sin 2\alpha \sin \phi, \quad (4)$$

式中 c 为光纤耦合器的耦合系数, ϕ 为频道间隔决定的相位差。与标准的 M-Z 滤波器相比,该滤波器两输出端口相互间有着切换关系,其特性不仅和 α 有关,还取决于 c 和 ϕ 。对于固定的装置, ϕ 为定值,取 $c=0.5$, 可认为传输函数是关于 α 的函数。那么,简单地旋转起偏器即可以改变其传输特性,从而实现动态的波长切换功能。目前,该装置在实验中激光输出的对比度较低,激光器仅能实现两个频道间隔之间的转换,还需要进一步的改进措施,如在其中一个衍射臂中插入可调节的延迟器件能使激光输出的调节更加灵活。

5 展 望

为了进一步提高通信容量,现代光纤通信系统正朝着信道数越来越多的方向发展。单纯地增加光源数量来实现多路信号输入,势必会增加成本,因此应考虑选择性能稳定、低阈值、高效率、窄线宽、可调谐的多波长 EDFL。

关于多波长掺铒光纤激光器的研究重点在于其梳状滤波器的研究。未来在材料方面选择合适的可饱和吸收体作为锁模器件实现多波长被动锁模具有广阔的前景,如近期报道的直接带隙半导体黑磷等^[26],具有用作可饱和吸收体的潜能。

多波长掺铒光纤激光器未来将朝着波长数越来越多、线宽越来越窄、重复频率越来越高的方向发展,需要更深入地研究模式竞争和线宽理论,探索实现单纵模多波长激光器的其他形式,如短直腔串联式激光器、复合腔实现单纵模以及外部激光诱导实现单纵模等。再者,性能优良的多波长光源在激光测距、光谱分析和光纤传感等领域中也有极大的应用价值,因此,多波长 EDFL 的研制具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Elmirghani J M H, Mouftah H T. All-optical wavelength conversion: Technologies and applications in DWDM networks [J]. Communications Magazine, IEEE, 2000, 38(3): 86-92.
- 2 Wu Chongqing, Hu Weisheng. Project introduction of fiber optics and optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0000.
吴重庆, 胡卫生. 光纤光学与光通信专题前言[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0000.
- 3 Han Y G, Tran T V A, Kim S H, *et al.*. Multiwavelength Raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Opt Lett, 2005, 30(11): 1282-1284.
- 4 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang, *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205001.
孙 浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205001.
- 5 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. All-fiber temperature sensor based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706004.
- 6 Fujiwara M, Goodman M S, O'Mahony M J, *et al.*. Guest editorial multiwavelength optical technology and networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 932.

- 7 Wang Junli, Lü Zhiguo, Bo Xiangbao. Recent progress on rare earth doped femtosecond fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100006.
王军利, 吕志国, 卜祥宝. 稀土离子掺杂飞秒光纤激光器最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100006.
- 8 Ajiya M, Almansoori M H, Mahdi M A. Widely tunable linear-cavity multiwavelength fiber laser with distributed Brillouin scattering[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 8(3): 51-53.
- 9 Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang, *et al.*. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602010.
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602010.
- 10 Chow J, Town G, Eggleton B, *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *Photon Technol Lett*, 1996, 8(1): 60-62.
- 11 Miyazaki T, Edagawa N, Yamamoto S, *et al.*. A multiwavelength fiber ring-laser employing a pair of silica-based arrayed-waveguide-gratings[J]. *Photon Technol Lett*, 1997, 9(7): 910-912.
- 12 Zhao Y, Shu C. A fiber laser for effective generation of tunable single- and dual-wavelength mode-locked optical pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(13): 1556-1558.
- 13 Zhang Z, Zhan L, Xu K, *et al.*. Multiwavelength fiber laser with fine adjustment, based on nonlinear polarization rotation and birefringence fiber filter[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(4): 324-326.
- 14 Sova R M, Kim C S, Kang J U, *et al.*. Tunable dual- λ fiber ring laser based on 2nd λ order Sagnac-Lyot fiber filter[C]. *Lasers and Electro-Optics, IEEE*, 2002. 444-445.
- 15 Yu X, Liu D, Dong H, *et al.*. Temperature stability improvement of a multiwavelength Sagnac loop fiber laser using a high-birefringent photonic crystal fiber as a birefringent component[J]. *Opt Engng*, 2006, 45(4): 044201.
- 16 An H L, Lin X Z, Pun E Y B, *et al.*. Multi-wavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter[J]. *Opt Commun*, 1999, 169(1): 159-165.
- 17 Shu X, Jiang S, Huang D. Fiber grating Sagnac loop and its multiwavelength-laser application[J]. *Photon Technol Lett*, 2000, 12(8): 980-982.
- 18 Liu X, Zhan L, Luo S, *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a nonlinear amplifying loop mirror assisted by un-pumped EDF[J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 7088-7094.
- 19 Feng X, Tam H, Wai P K A. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Opt Express*, 2006, 14(18): 8205-8210.
- 20 Feng X, Tam H, Liu H, *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser employing a nonlinear optical loop mirror[J]. *Opt Commun*, 2006, 268(2): 278-281.
- 21 Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Tunable and switchable multiwavelength passively mode-locked fiber laser based on SESAM and inline birefringence comb filter[J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2011, 3(1): 64-70.
- 22 Ji F, Xin L, Ming H. Passively mode-locked fiber laser using SESAM[C]. *SPIE*, 2007. 6838: 683807.
- 23 McFerran J J, Nenadovic L, Swann W C, *et al.*. A passively mode-locked fiber laser at 1.54 μm with a fundamental repetition frequency reaching 2 GHz[J]. *Opt Express*, 2007, 15(20): 13155-13166.
- 24 Zhao L M, Lu C, Tam H Y. High fundamental repetition rate fiber lasers operated in strong normal dispersion regime[J]. *Photon Technol Lett*, 2009, 21(11): 724-726.
- 25 Luo Z C, Luo A P, Xu W C. Tunable and switchable all-fiber comb filter using a PBS-based two-stage cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(18): 4167-4170.
- 26 Li L, Yu Y, Ye G J, *et al.*. Black phosphorus field-effect transistors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(5): 372-377.