

doi: 10.3788/gzxb20174601.0114002

宽光谱全正色散锁模掺镱光纤激光器

李蒙蒙^{1,2,3,4}, 侯磊^{1,2,3}, 林启蒙^{1,2,3}, 郭鸿宇^{1,2,3}, 陆宝乐^{1,2,3},
陈浩伟^{1,2,3}, 冯宏剑⁴, 白晋涛^{1,2,3,4}

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所光电技术与纳米功能材料国际联合研究中心, 西安 710069)

(2 西北大学 光子学与光子技术研究所陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

(3 西北大学 光子学与光子技术研究所陕西省光电子技术重点实验室, 西安 710069)

(4 西北大学 物理学院, 西安 710069)

摘 要:介绍了一种全正色散宽光谱被动锁模掺镱光纤激光器, 利用非线性偏振旋转技术实现全正色散掺镱光纤激光器的被动锁模。当泵浦功率输出为 500 mW 时, 激光脉冲输出功率大于 139 mW, 重复频率约为 28.1 MHz, 脉冲宽度为 3.8 ps。为了进一步研究全正色散光纤激光器的宽光谱输出特性, 在腔内熔接 50 m 单模光纤, 同时去除双折射滤波片, 在泵浦功率为 500 mW 时, 观察到稳定锁模单脉冲耗散孤子, 光谱范围为 1 005~1 140 nm, 输出激光脉冲最大平均功率为 90 mW, 重复频率为 3.58 MHz, 脉冲宽度为 519 ps。

关键词:全正色散; 掺镱光纤激光器; 宽光谱; 非线性偏振旋转; 耗散孤子

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0114002-6

Wide-spectrum All-normal-dispersion Yb-doped Fiber Laser

LI Meng-meng^{1,2,3,4}, HOU Lei^{1,2,3}, LIN Qi-meng^{1,2,3}, GUO Hong-yu^{1,2,3}, LU Bao-le^{1,2,3},
CHEN Hao-wei^{1,2,3}, FENG Hong-jian⁴, BAI Jin-tao^{1,2,3,4}

(1 *National Center for International Research of Photoelectric Technology and Functional Materials, Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(2 *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(3 *Institute of Photonics and Photon-technology, Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

(4 *Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: An all-normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser with wide spectrum was investigated. The stable mode-locking is realized based on the nonlinear polarization evolution. At the pumping power of 500 mW, the power of mode-locked laser can produce more than 130 mW output at the repetition rate of 28.1 MHz with pulse duration of 3.8 ps. In order to explore the spectral characteristics of all-normal-dispersion laser, the cavity is implemented by splicing the 50-m single mode fiber and by removing the birefringent filter. Under the pump power of 500 mW, the stable dissipative solitons are obtained with 90 mW output power, 3.58 MHz repetition rate, 519 ps pulse duration and spectrum ranging from 1 005~1 140 nm.

Key words: All normal dispersion; Ytterbium doped fiber laser; Wide spectrum; Nonlinear polarization rotation; Dissipative soliton

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61475125)和西北大学科学研究基金(No. 15NW06)资助

第一作者: 李蒙蒙(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器。Email: 2391000466@qq.com

导师: 冯宏剑(1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光伏器件载流子输运机理。Email: hjfeng@nwu.edu.cn

通讯作者: 侯磊(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为超短脉冲激光及应用。Email: lhoul@nwu.edu.cn

收稿日期: 2016-08-09; 录用日期: 2016-10-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

宽光谱锁模激光光源以高亮度、强相干性和较宽的光谱覆盖范围等优势在非线性光学^[1-2]领域快速发展. 凭借着在计量学^[3-5]、通信技术^[6-8]、测量与测试、成像学^[9-11]等方面的实际应用吸引了广大工作者的研究兴趣. 特别是在成像学研究领域中, 宽光谱锁模光源成为人体内部组织高分辨成像的有利工具. 1999年, 美国麻省理工学院 Mark E. Brezinski 等开创的光学相干层析技术^[12]可以直接检查生物体的器官, 同时可以分析被切除的组织样品用于研究人体视网膜、肠胃疾病、皮肤病以及癌细胞等. 近年来, 随着光纤技术和锁模技术的迅速发展, 宽光谱锁模光纤激光成为科学家研究的热点.

目前, 宽光谱锁模光纤激光器主要是基于掺铒光纤激光器和掺镱光纤激光器. 2012年, Vazquez-Zuniga 等利用掺铒光纤作为增益介质获得了 135 nm 的宽光谱输出^[13]. 与掺铒光纤相比, 掺镱光纤具有能级结构简单、有较宽的吸收带宽和发射带宽、同时具有较大的发射截面, 基于这样的特点, 掺镱锁模光纤激光器能够支持更宽的光谱输出. 2013年, Zaytsev 等采用非线性偏振旋转锁模机制, 在腔内加入一对光纤光栅进行色散补偿, 实现了带宽为 48.2 nm 的掺镱锁模光纤激光^[14]. 2015年, Suzuki 等在掺镱光纤激光器中进行色散管理, 利用非线性偏振演化(Nonlinear Polarization Evolution, NPE)技术在腔内色散量近似为零的情况下实现了 131 nm 光谱宽度的锁模^[15]. 由于色散管理的作用, 腔内的脉冲被周期性地展宽压缩, 形成稳定的色散管理孤子输出. 而宽光谱孤子的输出是由于腔内脉冲压缩过程中峰值功率自相位调制增强导致的. 因此对于这样的系统一般需要精细地控制色散来实现宽光谱的输出.

相比色散管理孤子, 耗散孤子是在色散、非线性效应和损耗的动态平衡上建立起来的, 系统不需要色散控制, 具有结构简单、脉冲承受能量高等特点. 2015年, Li 等利用光的双向传输结合 NPE 在全正色散掺镱光纤激光器总腔长为 11.7 m 时得到了 61.4 nm 的锁模光谱宽度^[16]. 目前, 通过增加腔长提高腔内喇曼效应来实现宽光谱全正色散掺镱锁模光纤激光输出的研究还鲜有报道.

本文采用 NPE 锁模技术, 实现了稳定的宽光谱全正色散锁模掺镱光纤激光输出. 采用标准的 NPE 装置, 腔长为 8 m 时, 获得稳定的锁模激光. 激光输出功率大于 139 mW, 重复频率约为 28.1 MHz, 脉冲宽度为 3.8 ps, 中心波长为 1028 nm, 3 dB 光谱带宽为 13.8 nm. 为进一步研究全正色散光纤激光器的宽光谱输出特性, 在增益光纤之后熔接 50 m 单模光纤, 同时去除双折射滤波片, 在泵浦功率 500 mW 时, 可以观察到稳定锁模单脉冲耗散孤子, 光谱覆盖范围为 1 005~1 140 nm, 输出激光脉冲最大平均功率为 90 mW, 重复频率为 3.58 MHz, 脉冲宽度为 519 ps.

1 实验装置及工作原理

掺镱环形光纤激光器的实验装置如图 1. 利用非线性偏振旋转技术实现全正色散掺镱光纤激光器的被动锁模, 整个激光腔由自由空间部分和光纤部分组成. 其中空间部分包括 2 个 1/2 波片(Half Wave Plate, HWP)、2 个 1/4 波片(Quarter Wave Plate, QWP)、偏振分光棱镜(Polarization beam splitter, PBS)、空间隔离器(Polarization Insensitive Isolator, ISO)、双折射滤波片(Filter)、2 个准直器(Collimator, Col). 采用 7.5 mm 厚的石英晶体作为双折射滤光片, 理论计算透射光谱半高全宽约为 8 nm. 光纤部分中, 增益光纤使用的是 CorActive 公司的 Yb 501 型单模高掺杂光纤, 吸收系数大于 250 dB/m @915 nm, 增益光纤长度大约为 60 cm; 980/1 030 nm 膜片式波分复用器(Wavelength Division Multiplexed, WDM), 尾纤采用 Corning 公司生产的 HI 1060 普通单模光纤; 光纤准直器的尾纤同样采用 HI 1060, 工作距离为 250 mm. 实验中泵浦源是输出中心波长为 976 nm、最大输出功率为 500 mW 的单模半导体二极管. 泵浦光经过 WDM 耦合进掺镱光纤中, 经过 HWP 后输出线偏振光, 通过 QWP 和 PBS 后实现线偏振光和椭圆偏振光两个偏振态之间的转化. 图 1 中 PBS 右侧的 1/2 波片主要是改变光的偏振方向, 使得透过 1/2 波片的光的偏振方向与隔离器的透射光的偏振方向相同, 左侧的 1/4 和 1/2 波片主要起幅度调节的作用.

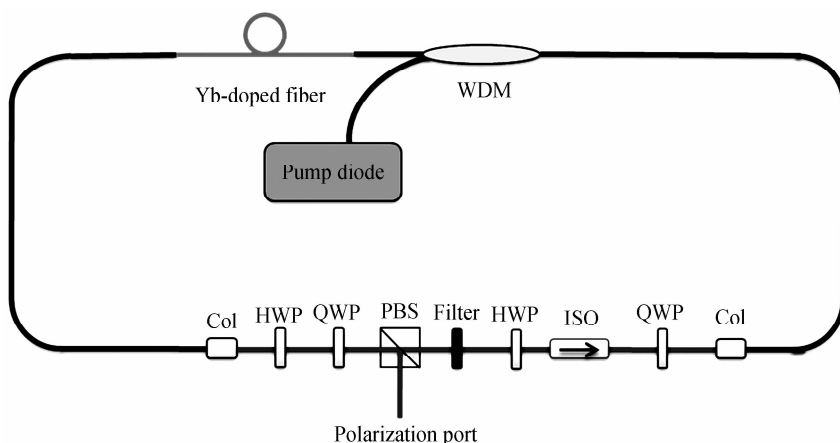


图1 掺镜环形光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic setup of Yb doped ring fiber laser

为了进一步研究全正色散光纤激光器的宽谱输出特性,在上述装置基础上去除双折射滤波片,并在增益光纤后熔接 50 m Corning 公司生产的 HI 1060 普通单模光纤。

本实验采用 NPE 锁模技术对掺镜光纤激光器进行锁模,分别通过光谱分析仪(Yokogawa AQ6370C)、示波器(Agilent Technologies DSO9104A)、频谱分析仪(Keysight N9000A)以及自相关仪(Femtochrome FR-103WS)对输出端的锁模激光特性进行监测,得出耗散孤子锁模的相关数据和图像。

2 结果与讨论

当泵浦光功率为 500 mW 时,通过仔细调节和优化波片角度,可以实现稳定的锁模运转,锁模时输出功率大于 139 mW,重复频率为 28.1 MHz,单脉冲能量为 5 nJ。图 2(a)为锁模脉冲重复频率的示波器示意图,图 2(b)为锁模脉冲重复频率的频谱图,重复频率为 28.1 MHz,频谱信号非常干净,信噪比大于 75 dB,说明锁模状态十分稳定。

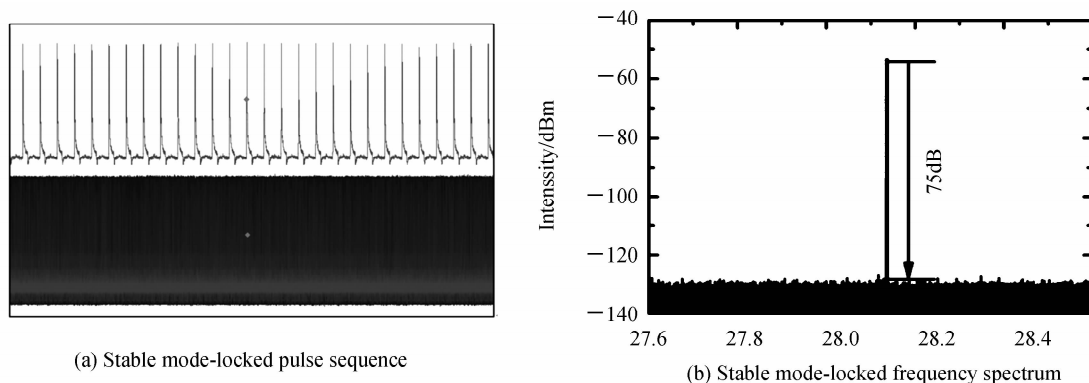


图2 稳定锁模脉冲序列和频谱图

Fig.2 Stable mode-locked pulse sequence and frequency spectrum

实验中利用光谱分析仪测量输出激光光谱,输出曲线如图 3(a),中心波长为 1 028 nm,3 dB 光谱带宽为 13.8 nm,光谱具有十分陡峭的边沿,说明腔内积累了非常大的正色散,呈现出典型的耗散孤子光谱结构。采用自相关仪对输出脉冲的宽度进行测量,结果如图 3(b),通过双曲正割脉冲进行拟合,其脉冲宽度约为 3.8 ps。由于本文采用的是全正色散锁模机制,所以输出脉冲带有很大的啁啾。

采用功率计(Gentec-EO MAESTRO)对全正色散锁模激光器进行功率稳定性测量,测量结果如图 4。结果表明在 2 个小时锁模运转中,输出功率抖动均方根为 0.4%,具有较好的环境稳定性。

由于双折射滤波片起了滤波器的作用,为了进一步研究全正色散锁模激光宽光谱的输出性能,获得更宽的光谱输出,本文去掉双折射滤波片,同时在掺镜增益光纤之后通过临时连接的方式熔接 50 m 单模光纤。50 m 单模光纤增加了激光器的总腔长,改变腔内的色散量,对于长腔和小模场直径的光纤光路来说很容易

受到喇曼效应的影响,喇曼效应的存在扰动耗散孤子的稳定锁模^[16],在四波混频和喇曼效应的共同作用下,两个相同频率光子湮灭的同时产生另外两个不同频率的光子.腔内增益与损耗的动态平衡保证了光在腔内循环过程中产生新频率光子的同时也提供了稳定的参量振荡过程,在这个过程中光纤介质本身不参与能量的净交换.由于腔内色散的存在导致相位失配,因此,在实验中通过提高泵浦功率和改变波片的角度来实现相位匹配,可以使得能量在三个不同峰值间转换,得到稳定的宽光谱输出,宽光谱的输出是非线性和色散的平衡以及损耗和增益动态平衡的结果^[17].

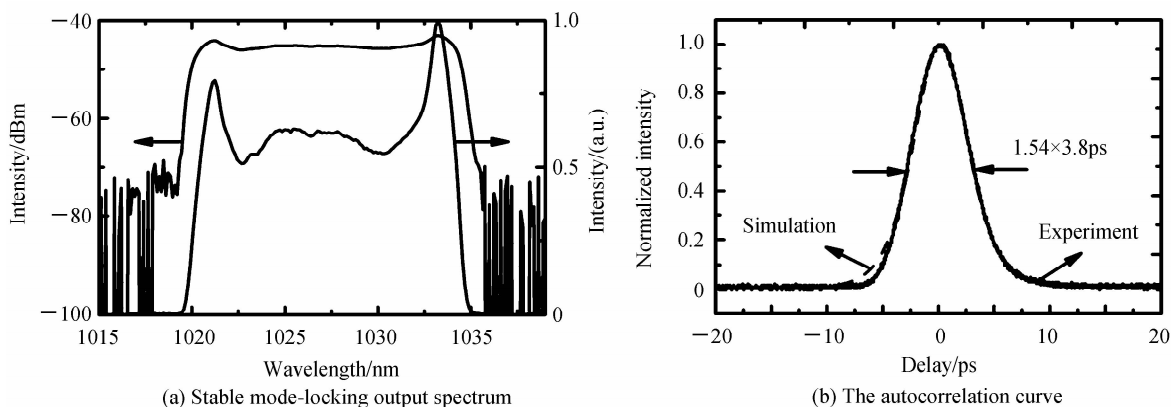


图3 稳定锁模状态下的输出光谱图和自相关曲线

Fig. 3 Stable mode-locking output spectrum and the autocorrelation curve

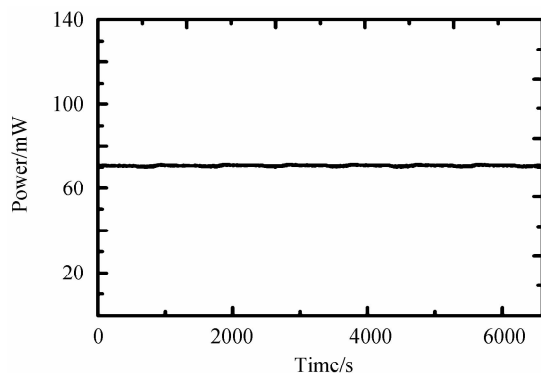


图4 功率稳定性

Fig. 4 Stability of the power

示波器上稳定的单脉冲耗散孤子锁模脉冲序列与之前锁模状态下的图像相似,稳定锁模后其对应的频谱如图5所示,可知脉冲重复频率为3.54 MHz,根据实验,光路的总腔长约为58 m,计算出激光器重复频率理论值为3.58 MHz,与实际测得数值相符,说明并无谐波锁模.泵浦功率500 mW输出时,激光器最大输出功率约为90 mW.

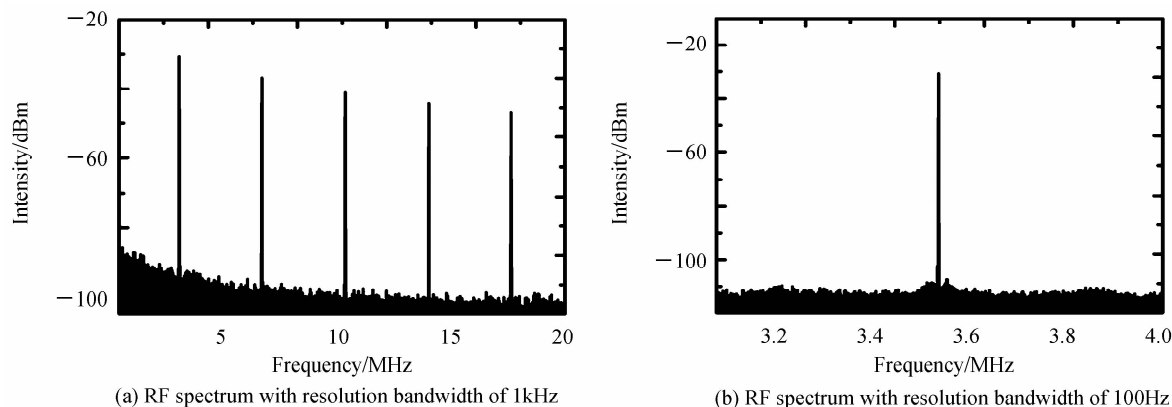


图5 稳定锁模脉冲序列频谱图

Fig. 5 RF spectra of the mode-locked pulses

在稳定锁模时测量了单脉冲耗散孤子对应的光谱如图 6(a),其光谱覆盖范围为 1 005~1 140 nm. 实验中发现对于这样宽的光谱锁模相比前面的锁模较难实现,但是一旦锁模建立,就可以长时间稳定运转. 为了进一步确定激光输出脉冲的宽度,采用高速光电二极管和高速示波器,测量的单脉冲运转时激光输出脉冲宽度为 519 ps,如图 6(b),由于加入 50 m 单模光纤,腔内具有大量的正色散,因此脉宽变宽.

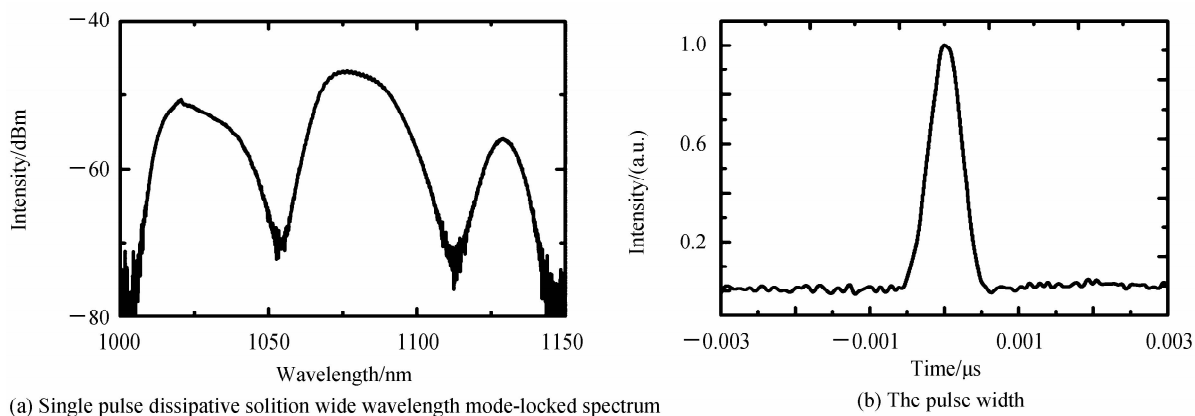


图 6 单脉冲耗散孤子宽光谱锁模光谱图和脉冲宽度

Fig. 6 Single pulse dissipative soliton wide wavelength mode-locked spectrum and the pulse width

3 结论

实验研究了一种基于非线性偏振旋转效应的宽光谱掺镱锁模光纤激光器. 分别分析了基于非线性偏振旋转效应的掺镱光纤激光器运行在被动锁模状态下不同结构对应的不同特性. 通过对波片角度的调节以及泵浦功率的控制,实现了宽光谱稳定锁模耗散孤子的输出. 脉冲的重复频率为 3.54 MHz,最大输出功率为 90 mW,光谱覆盖范围为 1 005~1 140 nm. 脉冲锁模非常稳定,可以长时间维持,具有良好的功率和波长的稳定性. 实验结果可为波分复用光传输系统、光传感、光信号处理、光学仪器测试、微波光子学、太赫兹波产生等领域提供参考.

参考文献

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics, fourth edition[M]. Singapore, Elsevier, 2009.
- [2] DUDLEY J M, TAYLOR J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. UK, Cambridge University Press, 2010.
- [3] DIDDAMS S A, BERGQUIST J C, JEFFERTS S R, *et al.* Standards of time and frequency at the outset of the 21st century[J]. *Science*, 2004, **306**(5700):1318-1324.
- [4] DEL H P, SCHLIESSER A, ARCIZET O, *et al.* Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, **450**(7173):1214-1217.
- [5] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, **416**(6877):233-237.
- [6] TAKARA H, OHARA T, MORI K, *et al.* More than 1000 channel optical frequency chain generation from single supercontinuum source with 12.5 GHz channel spacing[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(25): 2089-2090.
- [7] FUTAMI F, KIKUCHI K. Low-noise multiwavelength transmitter using spectrum-sliced supercontinuum generated from a normal group-velocity dispersion fiber[J]. *Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(1):73-75.
- [8] BOYRAZ Ö, ISLAM M N. A multiwavelength CW source based on longitudinal mode-carving of supercontinuum generated in fibers and noise performance[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(8): 1493-1499.
- [9] HARTL I, LI X D, CHUDOBA C, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(9):608-610.
- [10] LIM H, JIANG Y, WANG Y, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography with a fiber laser source at 1 μ m[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(10):1171-1173.
- [11] DREXLER W, MORGNER U, KÄRTNER F X, *et al.* In vivo ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(17):1221-1223.
- [12] BREZINSKI M E, FUJIMOTO J G. Optical coherence tomography: high resolution imaging in nontransparent tissue [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(4):1185-1192.
- [13] VAZQUEZ-ZUNIGA L A, JEONG Y. Super-broadband noise-like pulse erbium-doped fiber ring laser with a highly nonlinear fiber for Raman gain enhancement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(17):1549-1551.

- [14] ZAYTSEV A, LIN C H, YOU Y G, *et al.* High-energy noise-like pulses generated by a dispersionmapped Yb-doped fiber laser[J]. *OSA Technical Digest*, 2013.
- [15] SUZUKI M, GANEEV R A, YONEYA S, *et al.* Generation of broadband noise-like pulse from Yb-doped fiber laser ring cavity[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(5):804 - 807.
- [16] LI D J, SHEN D Y, LI L, *et al.* Raman-scattering-assistant broadband noise-like pulse generation in all-normal dispersion fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(20):25889-25895.
- [17] LV Z G, TENG H, WANG R, *et al.* Tunable triple-wavelength mode-locked ytterbium fiber laser with birefringence filter[J]. *Applied Physics B*, 2015, **121**:1-6.