

930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器的研制

沈 默, 孙若愚, 金东臣, 刘 伟, 洪 畅, 刘 江, 王 璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124

摘要 报道了一种紧凑型 930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器, 该激光器由掺钕全光纤振荡器和一级掺钕全光纤放大器构成。振荡器采用线性腔结构, 增益介质为长度 8 cm 的高掺杂掺钕石英光纤, 抽运源为一个最大功率为 200 mW 的 808 nm 单模半导体激光器, 利用半导体可饱和吸收镜实现被动锁模, 获得超短脉冲激光输出。振荡器输出平均功率为 1 mW, 重复频率为 28.2 MHz, 脉冲宽度为 8.8 ps, 3 dB 光谱宽度为 0.37 nm。为抑制掺钕光纤放大器中 1060 nm 波段激光的竞争, 采用长度为 10 m 的 W 型掺钕光纤作为增益介质进行功率放大, 很好地抑制了 1060 nm 波段激光, 最终实现了平均功率为 117 mW, 中心波长为 930 nm, 单脉冲能量为 4.15 nJ, 重复频率为 28.2 MHz, 脉冲宽度为 8.8 ps, 10 dB 光谱宽度为 2.98 nm 的脉冲激光输出。

关键词 激光器; 掺钕全光纤激光器; 被动锁模; 光纤放大器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0601006

Design of 930 nm Passive Mode-Locking Nd-Doped All-Fiber Laser

Shen Mo, Sun Ruoyu, Jin Dongchen, Liu Wei, Hong Chang, Liu Jiang, Wang Pu

Beijing Research Center of Laser Application and Engineering, Institute of Laser Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract We report a compact 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber laser for the first time. The laser consists of a Nd-doped all-fiber oscillator and a Nd-doped all-fiber amplifier. The oscillator uses the linear cavity structure. The gain medium is an 8 cm highly Nd-doped silica fiber, and the pump source is a semiconductor laser with the central wavelength of 808 nm and the maximum output power of 200 mW. By using a semiconductor saturable absorber mirror as saturable absorber to realize passive mode-locking, the ultrashort pulse laser is achieved. The laser generates 8.8 ps pulse width with the average power of 1 mW and the repetition rate of 28.2 MHz. The spectrum has sharp edge with the 3 dB spectral width of 0.37 nm. To avoid the competition from 1060 nm wavelength, we make use of a 10 m W-typed Nd-doped fiber as the gain medium. As a result, the 1060 nm wavelength during the amplification is effectively suppressed. Finally, we achieve a laser output with the average power of 117 mW, the center wavelength of 930 nm, the repetition rate of 28.2 MHz, and the single pulse energy of 4.15 nJ. The pulse width is 8.8 ps and the 10 dB spectrum width is 2.98 nm.

Key words lasers; Nd-doped all-fiber lasers; passive mode-locking; fiber amplifier

OCIS codes 140.3510; 140.3538; 140.3530; 140.4050

1 引 言

900~1000 nm 波段激光经频率转换后可产生蓝光, 在水下通信探测、激光显示、生物医疗等领域具有重大应用价值。光纤激光器与传统的固体激光器相比, 具有电光转换效率高、体积小、光束质量好等优点, 因此 900~1000 nm 波段光纤激光器的发展格外引人注目。目前, 980 nm 波段的掺镱光纤激光器的发展较为全

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61235010, 61307054, 61527822)

作者简介: 沈 默(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: shenmobjut@163.com

导师简介: 王 璞(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器和光纤放大器方面的研究。

E-mail: wangpumail@bjut.edu.cn(通信联系人)

面,包括高功率连续激光器^[1]、单频激光器^[2]、调 Q 激光器^[3]和锁模脉冲激光器^[4]。但 980 nm 波段的掺镱激光器经二倍频后只能产生 490 nm 的蓝绿光,影响使用效果。运转在三能级结构的掺钕激光器可产生 930 nm 波段的激光输出,其经频率转换后可产生 465 nm 的激光,可实现纯蓝光输出^[5]。通常情况下,在掺钕激光器中更易实现四能级系统^[6-8],此时只需粒子数反转达到 10%~20%,而三能级系统抽运功率要求较高,需粒子数反转达到 50%。同时,来自四能级 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 的 1060 nm 波段竞争非常强且三能级系统存在基态吸收效应(GSA),难以实现单纯的 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 的三能级运转,不易获得稳定的 930 nm 波段激光输出。为解决以上问题,在掺钕光纤中掺杂特殊离子如铝离子和锗离子,可以大幅度提高三能级运转效率^[6,9]。在液氮中冷却掺钕光纤^[10]也可产生 930 nm 波段的激光,这是因为在超低温状态下 GSA 效应明显减弱,斯塔克能级的热粒子数减小,掺钕光纤可实现 930 nm 波段处四能级系统的运转。但由于工作条件特殊,激光器应用范围受到很大的限制。另外,使用特殊结构设计的掺钕光纤如光子晶体带隙光纤和 W 型双包层掺钕光纤^[8,11-12],也能有效地抑制掺钕光纤中四能级系统的竞争,并增强三能级的辐射跃迁。光子晶体带隙光纤通过带隙结构设计来决定其导光波段,从而实现对 0.9 μm 波段激光的增强;W 型掺钕光纤通过对纤芯、内包层和外包层三者折射率的特殊设计,以及全反射原理,定义出截止波长,使大于 1 μm 波长的激光从外包层泄漏出去,实现掺钕光纤中三能级系统的稳定运转。其中 W 型掺钕光纤以其优异的性能以及较低的价格,广泛应用于 930 nm 波段掺钕激光器及放大器中。

Qian 等^[13]报道了基于空间非线性偏振旋转(NPR)锁模技术的 930 nm 被动锁模掺钕激光器,实现了脉冲宽度为 4.5 ps,重复频率为 13 MHz,平均功率为 24 mW 的脉冲输出。Gao 等^[14]报道了纤芯抽运全正色散锁模掺钕激光器,其中心波长为 910 nm 和 935 nm,输出脉冲被压缩到 198 fs,单脉冲能量为 1.3 nJ,并将此款激光器用于双光子荧光成像。Fang 等^[15]报道了 930 nm 单频分布式布拉格反射掺钕光纤激光器,实现了平均功率为 1.9 mW 的激光输出。Chen 等^[16]报道了基于啁啾脉冲放大技术的掺钕光纤激光器,经压缩后可实现中心波长为 930 nm,平均功率为 500 mW,脉冲宽度为 220 fs 的飞秒脉冲输出。

此前报道的 930 nm 掺钕锁模激光器多采用空间非线性偏振旋转锁模技术,本文报道了一种全光纤结构的 930 nm 被动锁模掺钕光纤激光器。该激光器以掺钕光纤作为增益介质,利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收体实现振荡器锁模脉冲输出。激光器谐振腔由窄带光纤布拉格光栅(FBG)和 SESAM 构成,在抽运功率为 182 mW 时,实现了稳定的锁模脉冲输出,且脉冲宽度为 8.8 ps,重复频率为 28.2 MHz,光谱中心波长为 929.8 nm。经一级 W 型掺钕全光纤放大器后激光平均输出功率为 117 mW,10 dB 光谱宽度为 2.98 nm。该激光器结构简单、稳定性高、光束质量好,在诸多领域具有重大应用价值。

2 实验装置

图 1 为 930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器装置图。振荡器采用线型腔结构设计,利用 SESAM(980-50-0-500 fs,BATOP 公司,德国)实现被动锁模,如图 1(a)所示。SESAM 的高反波段为 925~1020 nm,调制

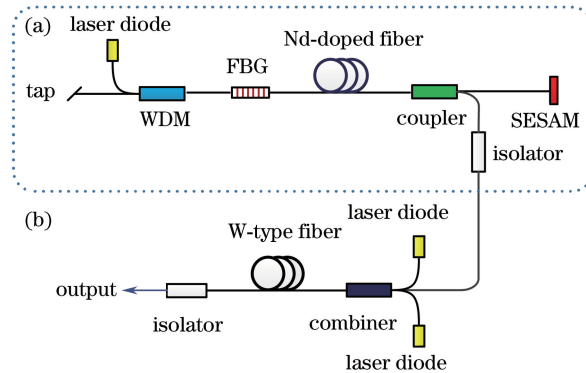


图 1 930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器装置图。(a) 930 nm 被动锁模掺钕全光纤振荡器;(b)掺钕全光纤放大器

Fig. 1 Schematic of the 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber laser. (a) 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber oscillator; (b) Nd-doped all-fiber amplifier

深度为 30%，非饱和损失为 20%，消光比为 50%，弛豫时间常数为 500 fs。振荡器的抽运源为光纤耦合输出的单模半导体激光器，其中心波长为 808 nm，最大输出功率为 200 mW；抽运激光通过一个 808/930 nm 的波分复用器(WDM)耦合进入 FBG，其中心波长为 930 nm，反射率为 99.63%，带宽为 0.42 nm，此 FBG 与 SESAM 构成谐振腔，可有效定义振荡器起振波长，很好地抑制了掺钕光纤中四能级辐射跃迁，实现稳定的三能级系统运转。增益介质采用长为 8 cm 的双包层掺钕光纤(PM-NDF-5/125, Nufern, 美国)，纤芯直径为 5 μm，包层直径为 125 μm，该光纤对 808 nm 激光的包层吸收系数为 1.1 dB/m，对应的纤芯吸收系数为 687.5 dB/m。用 WDM 的 930 nm 端作为振荡器的监测端，锁模激光脉冲从激光分束器的 30% 端输出，70% 端反馈回激光腔内。

锁模脉冲经隔离器后进入掺钕光纤放大器，如图 1(b)所示。该放大器使用的抽运源为两个多模 808 nm 半导体激光器，输出功率为 3.5 W；增益介质为一段长 10 m 的 W 型双包层掺钕光纤(IXF-2CF-ND-O-5-125-D, IX-blue, 法国)，该光纤在 808 nm 处的包层吸收率为 0.15 dB/m，纤芯与包层直径分别为 5 μm、125 μm，锁模脉冲由功率放大器放大后经隔离器进行输出。激光器中使用的无源光纤型号皆为 HI780，纤芯和包层直径分别为 4 μm、125 μm，此款光纤可保证 930 nm 波段激光单模传输。

3 实验结果与分析

为优化振荡器中增益光纤的长度，绘制掺钕双包层光纤的正向自发辐射放大(ASE)特性曲线，如图 2 所示。在半导体单模激光器(中心波长为 808 nm)纤芯抽运功率为 200 mW 时，测得 7 种不同长度的光纤 ASE 特性曲线。由图 2 可知，掺钕光纤中三能级辐射(900~940 nm)与四能级辐射(1050~1080 nm)存在明显竞争。当抽运功率不变时，减小增益光纤长度，三能级的 ASE 向短波长方向漂移，中心波长由 925 nm 移动到 905 nm，且强度逐渐增强。当增益光纤长度为 5 cm 时，930 nm 波段的 ASE 强度最大，当增益光纤长度为 3 cm 时 ASE 强度大幅减弱，这是由于增益过低所致。在振荡器中，增益光纤长度在 5~12 cm 间锁模状态均稳定，即增益光纤长度较短时，光子重吸收较弱，易达到 50% 以上的粒子数反转，实现掺钕光纤 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 的三能级运转。虽然当增益光纤长度为 5 cm 时 ASE 强度最强，但振荡器输出功率较低，为 0.5 mW，不利于后续功率放大。当光纤长度为 8 cm 时，振荡器输出功率最高为 1 mW，进一步增加光纤长度时输出功率反而下降。综合考虑输出功率及 ASE 强度等问题，使用 8 cm 的增益光纤作为振荡器增益介质。此长度不仅有利于实现掺钕光纤 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 的三能级运转，还可输出高功率 930 nm 波段的锁模脉冲，有利于后续功率放大。当光纤长度为 50 cm 时，1060 nm 处 ASE 强度远远大于 930 nm 处强度，所以此款光纤不适合于用作放大级中的增益光纤，故放大器中增益介质使用 W 型双包层掺钕光纤。该 W 型掺钕光纤通过特殊的纤芯包层折射率设计，利用全反射原理，定义截止波长，使大于 1 μm 波长的激光从外包层泄漏出去，只允许基模模式的光传输，从而实现掺钕光纤中 930 nm 波段激光的稳定运转。

谐振腔中使用窄带 FBG 定义起振波长，有效地抑制了四能级竞争，但是大幅限制了输出脉冲的光谱宽度。图 3 为 930 nm 掺钕全光纤振荡器输出的脉冲光谱，通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(AQ6370 B, Yokogawa 公司, 日本)测得中心波长为 929.8 nm，3 dB 光谱带宽为 0.37 nm。光谱中脉冲的凹陷是由 FBG

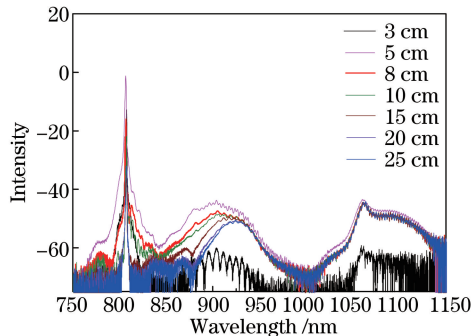


图 2 不同长度掺钕光纤正向 ASE 特性光谱图

Fig. 2 Forward ASM spectrum of the Nd-doped fiber with different lengths

的多峰结构反射谱所致。图 3 中插图显示了振荡器的指数坐标输出光谱图。

如图 4 所示,使用自相关仪 (FR-103 XL, Femtochrome Research 公司, 美国) 测得脉冲宽度为 8.8 ps, 没有出现脉冲分裂现象, 时间带宽积为 1.129, 表明该脉冲中所含啁啾较小。当抽运功率为 182 mW 时, 锁模激光器脉冲输出稳定, 能够自启动, 抽运功率增加至 190 mW 时出现脉冲分裂现象。

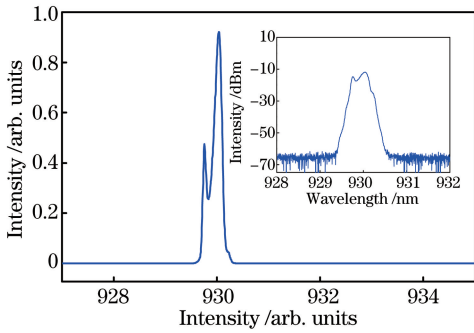


图 3 930 nm 被动锁模掺钕全光纤振荡器的线性坐标输出光谱图

Fig. 3 Linear coordinate optical spectrum of the 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber oscillator

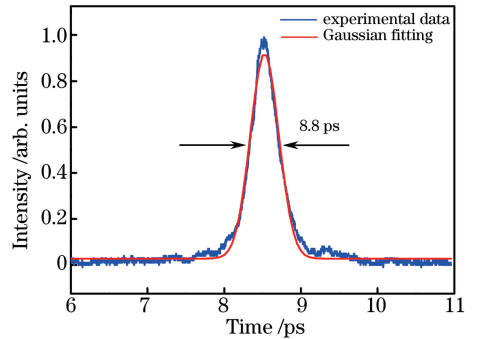


图 4 930nm 被动锁模掺钕全光纤振荡器的自相关信号

Fig. 4 Autocorrelation trace of the 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber oscillator

采用 25 GHz 光电探头和 25 GHz 示波器 (DSO-X 92504 A, Agilent Technologies 公司, 美国) 检测稳定锁模激光脉冲串, 如图 5 所示。脉冲间隔为 35.4 ns, 对应重复频率为 28.2 MHz, 与振荡器 3.55 m 的腔长相符合。

如图 6 所示, 用带宽为 7.5 GHz 的频谱仪 (N9030 A, Agilent Technologies 公司, 美国) 测得锁模激光脉冲在基频为 28.2 MHz 时的信噪比 (SNR) 为 52 dB, 表明该锁模激光器稳定性较高。

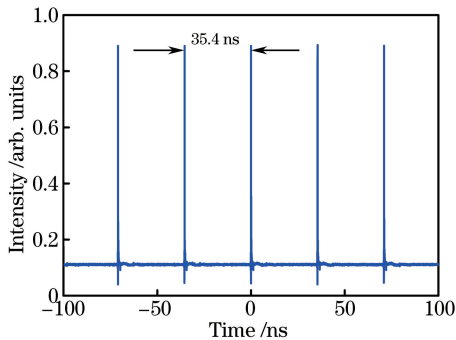


图 5 930 nm 被动锁模掺钕全光纤振荡器的脉冲串
Fig. 5 Pulse train of the 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber oscillator

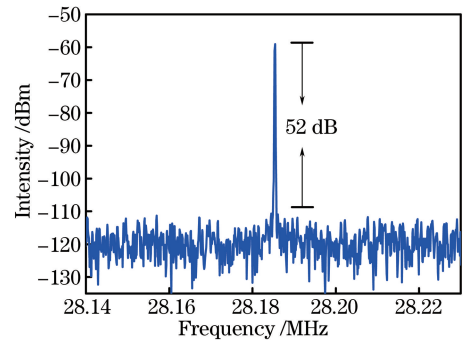


图 6 930 nm 被动锁模掺钕全光纤振荡器的信噪比
Fig. 6 SNR of the 930 nm passive mode-locking Nd-doped all-fiber oscillator

图 7 为掺钕全光纤放大器的效率图。由图 7 可知, 当抽运功率为 7 W 时, 锁模脉冲输出为 117 mW, 所得输出功率为放大器输出脉冲经 900 nm 高通空间滤波片后测得 (1060 nm 波段激光的 ASE 强度可忽略不计), 斜效率仅为 1.9%。由于使用的光纤总增益过低, 仅为 1.5 dB, 与一般光纤放大器中所需增益 15~20 dB 相差过大, 大部分抽运光没有被吸收, 导致放大器的放大效率过低。但是, 该激光器实现了从 1 mW 到 117 mW 的功率放大, 放大倍率超过 100 倍, 所以增加增益光纤长度, 可提供更大的增益, 使其放大效率进一步提高。若需更高功率的激光输出, 也可通过增加放大级数实现。

由 930 nm 掺钕全光纤放大器输出光谱图 (图 8) 可见, 930 nm 处激光强度比 1060 nm 处 ASE 高出 30 dB, 可见输出中 1060 nm 波段激光被很好地抑制, 930 nm 波段激光得到了放大。插图显示了光谱仪测得的波峰 930 nm 处 10 dB 光谱图, 谱宽为 2.98 nm。放大器输出光谱获得了展宽, 这是因为放大器中增益光纤长度较长, 引入了自相位调制效应。930 nm 被动锁模掺钕全光纤激光器中均使用小纤芯尺寸光纤, 所以放大器输出激光光束质量因子应当处于 1.0~1.1。图 8 中插图显示了 930 nm 处波峰光谱图。

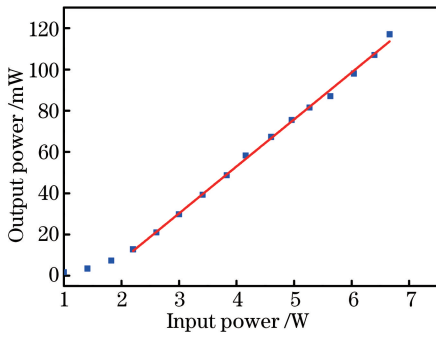


图 7 930 nm 掺钕全光纤放大器的转换效率
Fig. 7 Conversion efficiency of the 930 nm Nd-doped all-fiber amplifier

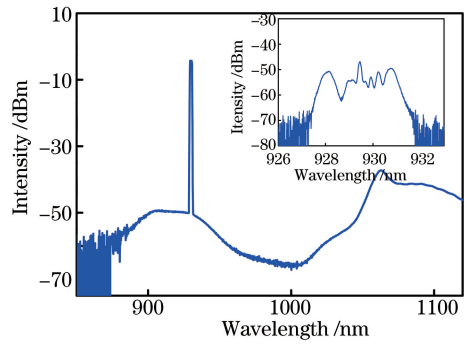


图 8 930 nm 掺钕全光纤放大器的输出光谱
Fig. 8 Optical spectrum of the 930 nm Nd-doped all-fiber amplifier

4 结 论

报道了 930 nm 波段全光纤 SESAM 锁模掺钕超短脉冲振荡器及其放大器。激光器结构紧凑,稳定性高,光路中不含空间元器件,易于实现 930 nm 波段超短脉冲激光器商业化应用。被动锁模掺钕全光纤振荡器输出脉冲平均功率为 1 mW,经一级掺钕全光纤放大器放大后实现了中心波长为 930 nm,脉宽为 8.8 ps,重复频率为 28.2 MHz,10 dB 光谱宽度为 2.98 nm,平均功率为 117 mW 的稳定锁模脉冲输出。该激光器一端的腔镜为窄带 FBG,导致其输出光谱较窄,受时间带宽积限制无法获得更窄脉宽的输出,若采用全光纤环形腔结构设计可解决这一问题,实现 930 nm 飞秒脉冲激光输出。该激光器还可经多级功率放大后获得瓦级功率输出,倍频后实现 465 nm 波段超短脉冲,在生物医疗、水下通信等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Roeser F, Jauregui C, Limpert J, *et al.* 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17310-17318.
- [2] Zhu X S, Shi W, Zong J, *et al.* 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4167-4169.
- [3] Lhermite J, Lecaplain C, Machinet G, *et al.* Mode-locked 0.5 μ J fiber laser at 976 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3819-3821.
- [4] Bouillet J, Dubrasquet R, Médina C, *et al.* Millijoule-class Yb-doped pulsed fiber laser operating at 977 nm[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1650-1652.
- [5] Bartolacci C, Laroche M, Gilles H, *et al.* Generation of picosecond blue light pulses at 464 nm by frequency doubling an Nd-doped fiber based master oscillator power amplifier[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5100-5105.
- [6] Cook A L, Hendricks H D. Diode-laser-pumped tunable 896-939.5 nm neodymium-doped fiber laser with 43 mW output power[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3276-3281.
- [7] Bufetov I A, Dudin V V, Shubin A V, *et al.* Efficient 0.9 μ m neodymium-doped single-mode fibre laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 33(12): 1035-1037.
- [8] Soh D B S, Yoo S, Nilsson J, *et al.* Neodymium-doped cladding-pumped aluminosilicate fiber laser tunable in the 0.9- μ m wavelength range[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(9): 1275-1282.
- [9] Hofer R, Hofer M, Reider G A, *et al.* Modelocking of a Nd-fiber laser at 920 nm[J]. *Optics Communications*, 1997, 140(4-6): 242-244.
- [10] Dawson J W, Liao Z M, Beach R J, *et al.* High power 938 nanometer fiber laser and amplifier: US7038844[P]. 2006-05-02.
- [11] Wang A, George A K, Knight J C. Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1388-1390.
- [12] Yoo S, Soh D B S, Kim J, *et al.* Analysis of W-type waveguide for Nd-doped fiber laser operating near 940 nm[J]. *Optics Communications*, 2005, 247(1): 153-162.
- [13] Qian K, Wang H, Laroche M, *et al.* Mode-locked Nd-doped fiber laser at 930 nm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2):

267-270.

- [14] Gao X, Zong W, Chen B, *et al.* Core-pumped femtosecond Nd: fiber laser at 910 and 935 nm[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4404-4407.
- [15] Fang Q, Xu Y, Fu S, *et al.* Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1829-1832.
- [16] Chen B Y, Wang A M, Wang Y D, *et al.* 500 mW 930 nm femtosecond Nd: fiber laser for two-photon microscopic imaging[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016: JW2A. 1.