

# 基于 45° 倾斜光纤光栅辐射模的线偏振 调谐光纤激光器

邢志坤<sup>1,2,3</sup>, 宋青果<sup>1,2,3</sup>, 牟成博<sup>4,5,6</sup>, 闫志君<sup>1,2,3\*</sup>, 孙琪真<sup>1,2,3</sup>, 刘德明<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>3</sup>华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>4</sup>上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

<sup>5</sup>上海大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444;

<sup>6</sup>上海大学特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

**摘要** 提出一种基于 45° 倾斜光纤光栅 (45°-TFG) 辐射模的线偏振光纤激光器。利用环形谐振腔结构和光纤布拉格光栅, 搭建了基于 45°-TFG 辐射模的线偏振调谐光纤激光器, 首次实现了基于 TFG 辐射模的全光纤单偏振激光输出。实验结果显示, 当输入泵浦光功率大于 24 mW 时, 可实现稳定的激光输出, 输出激光的中心波长为 1553.45 nm, 3 dB 带宽为 0.05 nm, 偏振度高达 99.8%, 激光器系统的斜率效率为 10.79%。同时, 利用布拉格光纤光栅的温度敏感特性, 实现了激光器波长输出从 1553.21 nm 到 1554.03 nm 的调谐, 调谐灵敏度为 11.37 pm/°C。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 光纤光栅; 辐射模; 线偏振光纤激光器

中图分类号 TN248; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201007

## Linear Polarized Tunable Fiber Laser Based on Radiation Mode of 45°-Tilted Fiber Grating

Xing Zhikun<sup>1,2,3</sup>, Song Qingguo<sup>1,2,3</sup>, Mou Chengbo<sup>4,5,6</sup>, Yan Zhijun<sup>1,2,3\*</sup>,  
Sun Qizhen<sup>1,2,3</sup>, Liu Deming<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>3</sup>National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>5</sup>Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>6</sup>Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication,  
Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** In this study, we propose a linear polarized fiber laser based on the radiation mode of a 45°-tilted fiber grating (45°-TFG). The laser is constructed using a ring resonator structure and a fiber Bragg grating, and an all-fiber single-polarized laser output based on the radiation mode of the TFG is realized for the first time. The experimental results show that when the input pump light power is greater than 24 mW, a stable laser output can be

收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-08-04; 录用日期: 2020-08-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2100902)、湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA053, 2018AAA040)、湖北省自然科学基金创新群体(2018CFA004)、中央高校基本研究基金(2019kfyRCPY095)

\* E-mail: yanzhijun@gmail.com

achieved. The central wavelength of the output laser is 1553.45 nm, that of a 3-dB bandwidth is 0.05 nm, degree of polarization is up to 99.8%, and slope efficiency of the laser system is 10.79%. Simultaneously, with the help of the temperature sensitivity of the fiber Bragg grating, the central wavelength of the output can be continuously tuned from 1553.21 nm to 1554.03 nm, and the tuning sensitivity is 11.37 pm/°C.

**Key words** lasers; fiber laser; fiber grating; radiation mode; linear polarized fiber laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3600; 050.2770

## 1 引 言

早在1990年, Meltz等<sup>[1]</sup>首次提出了倾斜光纤光栅。由于倾斜的栅面结构, 倾斜光纤光栅具有独特的模式耦合方式, 具体可以分为包层模耦合和辐射模耦合。包层模对外界环境变化敏感, 耦合的倾斜光纤光栅吸引了大量研究者的关注, 被广泛地应用在各种光纤传感器中, 如折射率传感器、表面等离子体共振传感器、气体传感器及生化传感器等<sup>[2-9]</sup>。而辐射模耦合的倾斜光纤光栅也凭借能直接将纤芯能量辐射到自由空间的特性, 在光纤链路的光功率监测和能量分束、自由空间光通信、光学成像及光谱分析等领域得到应用<sup>[10-14]</sup>。

由于光纤光栅制备工艺的限制, 光栅光诱导折射率变化在 $10^{-3}$ 量级, 根据布儒斯特定律, 45°是光纤光栅的布儒斯特角, 45°倾斜光纤光栅(45°-TFG)可以使s偏振光辐射出光纤, 而p偏振光在纤芯中几乎无损耗地传输, 因此45°-TFG可以用作一种理想的光纤起偏器<sup>[15]</sup>。前期研究显示, 45°-TFG拥有低插入损耗、宽工作带宽及全光纤结构等优势, 作为全光纤起偏器, 其优异性能已在被动锁模光纤激光器和全光纤滤波器等多个领域得到验证<sup>[16-25]</sup>。但是目前关于45°-TFG的研究和应用还均集中在沿着纤芯传输的透射光, 透射光的偏振特性取决于45°-TFG的偏振相关损耗, 偏振相关损耗越大, 透射光才越接近全p偏振光。而辐射光为单偏振的s偏振光, 其偏振特性与偏振相关损耗的大小无关, 可以同时兼顾性能和成本优势。同时, 当光栅面倾斜角度为45°时, 辐射模沿着垂直于光纤轴线的方向向外耦合, 此时倾斜光纤光栅的辐射效率也最大。综合评价辐射模的偏振特性, 45°-TFG亦可在光纤起偏器的基础上发展为一种可广泛应用于光纤系统的光纤偏振分束器。

本文实现了基于45°-TFG辐射模的线偏振光纤激光器。其中, 腔内45°-TFG作为偏振分束器, 可实现高偏振度激光输出, 偏振度高达99.8%; 光纤布拉格光栅作为温度敏感型光纤滤波器, 可同时实现滤波及波长连续可调谐, 调谐范围为

1553.21~1554.03 nm。激光器的阈值为24 mW, 光光转换效率为10.79%。

## 2 激光器实验装置

图1为基于45°-TFG辐射模的线偏振调谐光纤激光器的实验装置。整个激光器实验系统采用环形谐振腔结构, 其中, 增益介质是长度为1.5 m的掺铒光纤(EDF; I-25, FIBERCORE), 其在1531 nm波长处的峰值吸收为45 dB/m; 973 nm半导体激光模块用作掺铒光纤激光器的泵浦源, 泵浦光源的最大功率为420 mW; 波分复用器(WDM; 980/1550 nm 复用)将泵浦光耦合至激光器内; 一个标准光纤布拉格光栅用作激光器腔内滤波器, 其透射谱如图1插图所示, 中心波长约为1553.4 nm, 反射率大于99%。将光纤布拉格光栅与一个环形器相连接, 实现滤波功能, 一方面进行波长选择, 决定激光器输出激光的波长, 保证激光器的稳定运转, 另一方面保证激光器单向运转。光纤布拉格光栅的高反射率保证了腔外的低损耗滤波。

根据45°-TFG的基本工作原理, 在实验系统中, 选取长度为5 mm, 1550 nm波长处偏振相关损耗为4 dB的45°-TFG用作光纤偏振分束器, 通过调节偏振控制器(PC)改变进入45°-TFG的光的偏振态, 当进入45°-TFG中的为全s偏振光时, 最高可达60%的光通过辐射模实现高偏振度激光输出, 辐射输出效率很高。

## 3 实验结果和分析

在实验中, 调节980 nm泵浦激光器的泵浦输出功率, 调节圆柱透镜和偏振控制器, 使输出的光功率达到最大。当泵浦功率大于阈值24 mW时, 腔内的增益大于损耗, 激光起振。在前面的研究中, 已经从理论仿真和实际测量角度对45°-TFG辐射模进行了全面系统的研究<sup>[26]</sup>, 研究结果表明, 45°-TFG辐射模沿光纤径向呈近高斯分布, 沿光纤轴向呈类指数衰减分布。用偏振控制器调节入射到45°-TFG的光的偏振态, 保证辐射输出光强足够。利用透镜组对45°-TFG辐射模进行准直, 并用光斑分析仪记录

光斑。聚焦后的光斑沿光纤径向依然呈高斯分布，其径向分布的底部与高斯拟合存在一定差异的原因是输出光中依然存在 p 偏振分量，导致光斑能量扩

散，这与理论仿真的结果也是一致的，如图 2 所示；聚焦后的光斑能量沿光纤轴向依然存在一定程度的衰减，拖尾能量明显。

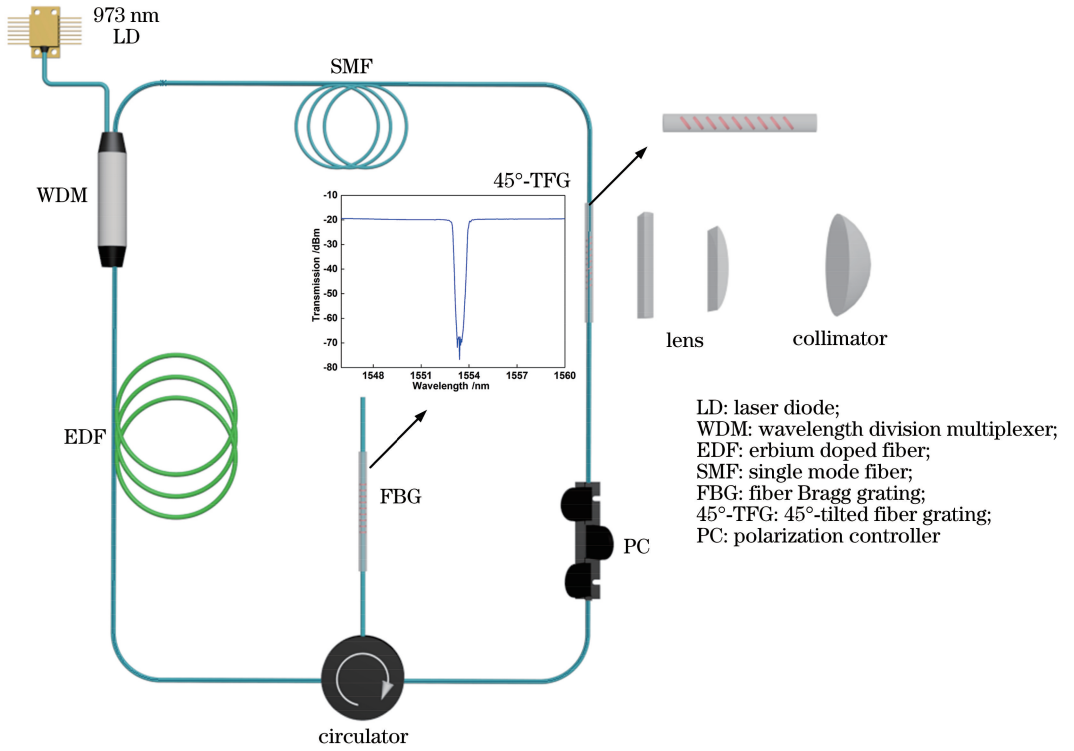


图 1 基于 45°-TFG 辐射模的线偏振光纤激光器装置图

Fig. 1 Configuration of linear polarized fiber laser based on radiation mode of 45°-TFG

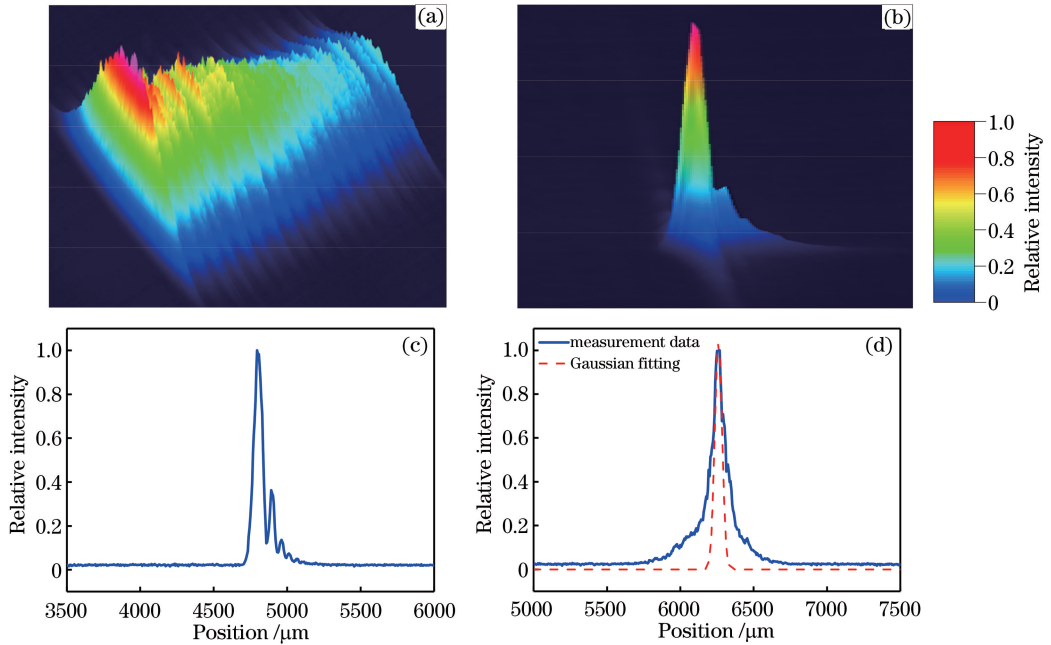
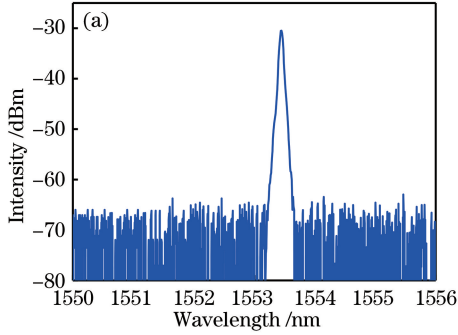


图 2 光斑分布。(a) 聚焦前；(b) 聚焦后；(c) 聚焦后纵向分布；(d) 聚焦后横向分布

Fig. 2 Distribution of laser beam. (a) Before focusing; (b) after focusing; (c) longitudinal distribution after focusing; (d) transverse distribution after focusing

实验中使用光纤光谱仪测量光谱,因此在测量光谱的过程中,首先需要通过光纤准直镜对辐射输出的光进行准直,准直后的光经空间光耦合进入光纤。聚焦后光斑沿光纤径向和轴向的分布在一定程度上会影响能量经过光纤准直镜向光纤中的耦合。输出光功率可以直接由光功率计记录



测量。给定不同泵浦输出功率,功率计接收到的输出激光功率不同,输出激光的光谱如图 3(a)所示。当泵浦功率( $P_{\text{pump}}$ )超过阈值后,输出功率( $P_{\text{out}}$ )呈线性增加趋势,输出激光的功率随泵浦输出功率的变化曲线如图 3(b)所示,可以得出斜率效率约为 10.79%。

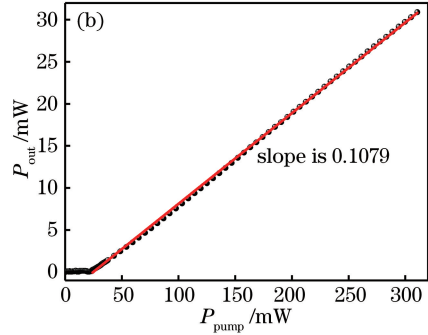


图 3 实验结果。(a)光纤激光器的输出光谱;(b)不同泵浦功率下的输出功率

Fig. 3 Experimental results. (a) Optical spectrum of proposed fiber laser; (b) output power under different pump power

前期的研究表明,45°-TFG 辐射模具备良好的偏振特性,其辐射模输出为单偏振 s 偏振。实验中,进一步测量激光器输出的偏振分布,利用可旋转线偏振片和大有效面积光功率计测量。通过旋转调节偏振片的透光轴方向,以 10°为间隔,从 0°调节至 360°,获得具有不同起偏角的光强输出,得到的偏振分布结果如图 4 所示,输出激光的偏振分布呈现完美的“8”字型。光功率在 90°和 270°附近达到最大,在 0°和 180°方向最小,输出激光以垂直于光纤轴向的偏振方向出射。通过偏振分布的测量结果,可以计算出输出激光的偏振度(DOP)为 99.8%。这也进一步证明,45°-TFG 具有良好的偏振特性,可以在光纤激光系统中用作理想的偏振分束器,实现线偏振激光输出。

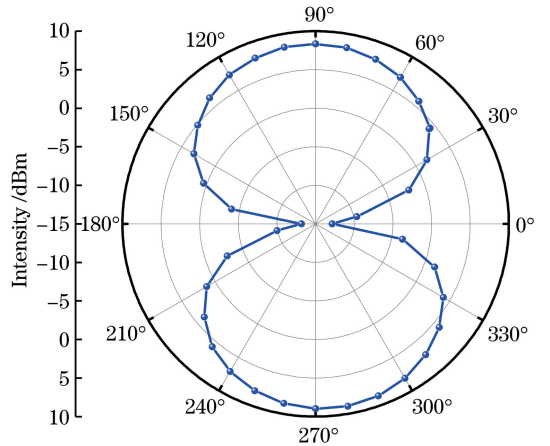


图 4 激光输出偏振分布测量结果

Fig. 4 Polarization distribution measurement result of laser output

此外,光纤布拉格光栅具有很好的温度和应变波长调谐特性,实验中,利用其温度调谐特性实现了激光器输出波长调谐。光纤布拉格光栅放置在温度

控制平台上,当温度从 0 °C 变化到 70 °C 的过程中,输出激光的中心波长也由 1553.21 nm 变化到 1554.03 nm,如图 5 所示。随着温度的升高,输出

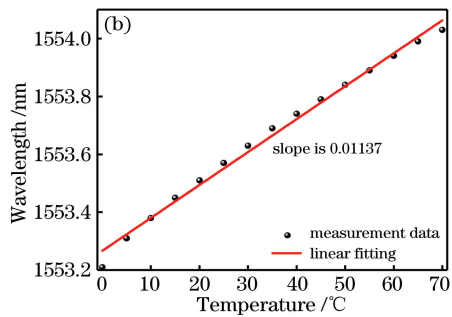
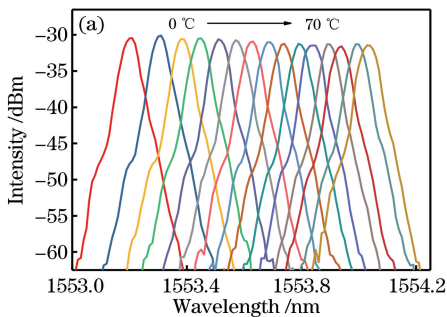


图 5 温度调谐。(a)不同温度条件下的光谱;(b)不同温度条件下中心波长的变化

Fig. 5 Thermal tuning. (a) Optical spectra under different temperatures; (b) central wavelength versus temperature



激光的中心波长发生红移,随温度的改变呈线性变化,温度调谐灵敏度为 11.37 pm/°C。

## 4 结 论

提出基于 45°-TFG 的具有辐射偏振分光特性的全光纤型偏振分束器。将其首次应用在光纤激光器领域,实现了高偏振度光纤激光输出,输出激光的偏振度高达 99.8%。同时,利用光纤布拉格光栅的温度敏感特性,实现输出激光中心波长从 1553.21 nm 到 1554.03 nm 的调谐,调谐灵敏度为 11.37 pm/°C,验证了基于 45°-TFG 辐射模的线偏振调谐光纤激光器的各项性能。在本方案中,并未对 45°-TFG 的辐射模进行优化,导致激光器的输出功率和偏振分布并未达到最优,同时增加了实际应用的难度。后期的工作是对 45°-TFG 进行优化设计,对其辐射模进行整形,以提高激光器的输出功率,拓展应用领域。

## 参 考 文 献

- [1] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. In-fiber Bragg grating tap [C] // Optical Fiber Communication, January 22, 1990, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 1990: TUG1.
- [2] Chen X Y, Xu J, Zhang X J, et al. Wide range refractive index measurement using a multi-angle tilted fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(9): 719-722.
- [3] Liu Z, Shen C, Xiao Y, et al. Liquid surface tension and refractive index sensor based on a tilted fiber Bragg grating [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(6): 1282-1287.
- [4] Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 83-108.
- [5] Zhang Y J, Wang M, Wang Z F, et al. Research progress of tilted fiber Bragg gratings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070005. 张宇菁, 王蒙, 王泽锋, 等. 倾斜光纤光栅研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070005.
- [6] Lao J, Sun P, Liu F, et al. *In situ* plasmonic optical fiber detection of the state of charge of supercapacitors for renewable energy storage [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 34.
- [7] Guo T, Liu F, Guan B O, et al. Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 19-33.
- [8] Luo B B, Xu Y F, Wu S X, et al. A novel immunosensor based on excessively tilted fiber grating coated with gold nanospheres improves the detection limit of Newcastle disease virus [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 100: 169-175.
- [9] Huang M, Gu C S, Sun B, et al. Refractive index sensor based on tilted-fiber Bragg grating coated with graphene [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210001. 黄梦, 顾昌晟, 孙兵, 等. 基于石墨烯涂覆倾斜光纤光栅的折射率传感 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1210001.
- [10] Zhou K M, Chen X F, Yan Z J, et al. Optical spectrum analyzer using a 45° tilted fiber grating [C] // Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, June 17-20, 2012, Colorado Springs, Colorado. Washington, D.C.: OSA, 2012: BW2E.7.
- [11] Wang G, Habib U, Yan Z, et al. Highly efficient optical beam steering using an in-fiber diffraction grating for full duplex indoor optical wireless communication [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4618-4625.
- [12] Wang G Q, Wang C, Yan Z J, et al. Highly efficient spectrally encoded imaging using a 45° tilted fiber grating [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2398-2401.
- [13] Remund S, Bossen A, Chen X F, et al. Cost-effective optical coherence tomography spectrometer based on a tilted fiber Bragg grating [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8938: 89381E.
- [14] Qin H, He Q, Moreno Y, et al. Compact linear polarization spectrometer based on radiation mode shaped in-fiber diffraction grating [J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5129-5132.
- [15] Yan Z J, Mou C B, Zhou K M, et al. UV-inscription, polarization-dependant loss characteristics and applications of 45° tilted fiber gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(18): 2715-2724.
- [16] Zhang Z X, Mou C B, Yan Z J, et al. Switchable dual-wavelength Q-switched and mode-locked fiber lasers using a large-angle tilted fiber grating [J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1353-1360.
- [17] Dai L L, Zou C H, Huang Q Q, et al. Continuously tunable mode-locked fiber laser based on tilted fiber grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508026. 戴礼龙, 邹传杭, 黄千千, 等. 基于倾斜光纤光栅的连续可调谐锁模激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508026.
- [18] Mou C, Zhou K, Zhang L, et al. Characterization of 45°-tilted fiber grating and its polarization function in

- fiber ring laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1905-1911.
- [19] Yan Z J, Zhou K M, Zhang L. In-fiber linear polarizer based on UV-inscribed 45° tilted grating in polarization maintaining fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3819-3821.
- [20] Wang T X, Yan Z J, Mou C B, et al. Narrow bandwidth passively mode locked picosecond erbium doped fiber laser using a 45° tilted fiber grating device [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16708-16714.
- [21] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0314003.  
杨锦民, 林彦吕, 黄千千, 等. 基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0314003.
- [22] Li J F, Yan Z J, Sun Z Y, et al. Thulium-doped all-fiber mode-locked laser based on NPR and 45°-tilted fiber grating [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31020-31028.
- [23] Liu X L, Wang H S, Yan Z J, et al. All-fiber normal-dispersion single-polarization passively mode-locked laser based on a 45°-tilted fiber grating [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19000-19005.
- [24] Yan Z J, Wang H S, Zhou K M, et al. Broadband tunable all-fiber polarization interference filter based on 45° tilted fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 94-98.
- [25] Xing Z K, Guo X, Qin H B, et al. A simple all-fiber solc filter based on 45°-tilted fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(20): 1631-1634.
- [26] Qin H B, He Q Y, Xing Z K, et al. Numerical and experimental characterization of radiation mode of 45° tilted fiber grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3777-3783.