

复合滤波结构的窄线宽高频微波信号产生装置

贾青松¹, 徐丹锋¹, 徐雨萌², 雷昊¹, 刘建旭¹

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 为了在较低泵浦功率下实现单纵模双波长激光信号的输出, 进而获得窄线宽的高频微波信号, 设计并实验了一种基于复合滤波结构的窄线宽高频微波信号产生装置。通过 8 字腔结构布里渊增益腔和反射式光纤光栅构成的波长选择滤波器实现了 4 倍布里渊频移间隔的双波长斯托克斯光信号输出, 采用 200 m 长单模光纤作为增益介质, 同时与 50 m 长单模光纤构成级联光纤环结构, 采用三端口耦合器与 2 m 长未泵浦的保偏掺铒光纤构成萨格纳克环结构, 利用级联光纤环结构和萨格纳克环结构的复合滤波作用实现了斯托克斯光信号模式的选择, 使输出的斯托克斯光信号由多纵模运行状态变为单纵模运行状态。实验证明: 通过对输出的单纵模双波长斯托克斯光信号进行拍频检测可得 42.85 GHz 的高频微波信号产生, 线宽为 38 kHz; 通过改变可调谐泵浦激光器的输出波长, 可实现 42.25~43.51 GHz 范围内的频率调谐; 通过稳定性测试, 产生的 42.85 GHz 高频微波信号的频率变化在 0.83 MHz 内, 峰值功率变化在 ± 0.8 dB 内, 稳定性良好, 满足实际应用需求。

关键词: 光纤光学; 高频微波信号; 级联光纤环; 萨格纳克环

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210074

Narrow linewidth high frequency microwave signal generator based on composite filter structure

Jia Qingsong¹, Xu Danfeng¹, Xu Yumeng², Lei Hao¹, Liu Jianxu¹

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Institute Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to realize the output of single longitudinal mode dual-wavelength laser signal at lower pump power and obtain the high frequency microwave signal with narrow line width, the narrow linewidth high frequency microwave signal generator based on multiple filter compound structure was proposed and demonstrated. The dual-wavelength Stokes optical signal with four times Brillouin frequency shift interval was realized through the eight shaped Brillouin cavity structure and the wavelength selective filter composed by reflective fiber grating. The 200 m length single mode fiber was used as gain medium, and it forms a cascaded fiber ring structure with 50 m long single-mode fiber. A three-port coupler and 2 m long unpumped polarization-maintaining erbium-doped fiber was used to form a Sagnac ring structure. The cascaded fiber ring configuration and Sagnac ring configuration were designed to select mode for single longitudinal mode Stokes optical signal. The experiment proves that the high-frequency microwave signal of 42.85 GHz can be generated by the beat frequency detection of the output single-longitudinal-mode dual-wavelength Stokes optical signal, and the line width is 38 kHz; Changing the output wavelength of the tunable pump laser, frequency tuning in the range of

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-04-25

作者简介: 贾青松, 男, 博士, 主要从事微波光子学中高频微波信号产生方面的研究。

42.25-43.51 GHz can be achieved; Through the stability test, the frequency change of the 42.85 GHz high-frequency microwave signal is in the range of 0.83 MHz, and the peak power change is in the range of ± 0.8 dB. It has good stability and meets the actual application requirements.

Key words: fiber optics; high frequency microwave signal; cascaded fiber ring; Sagnac ring

0 引言

优质的高频微波信号在雷达、光载无线通信、遥感测控等领域具有巨大的应用前景,吸引了国内外学者的广泛研究^[1-3],高频微波信号的产生主要包括电生微波和光生微波两类,而光生微波与电生微波相比,具有转换效率高、成本低廉和抗干扰能力强等优点,成为当前的研究热点^[4-6]。光生高频微波的方法主要包括多波长激光器、光调制、注入式锁定等,Zhang Yao 等人利用光调制技术产生频率为 26 GHz 的高频微波信号^[7],Jiang Yang 等人利用基于布里渊(Brillouin)散射效应的全光微波振荡器产生 10.8 GHz 的高频微波信号^[8],Wang Zhen 等人利用多波长 Brillouin 光纤激光器产生频率为 31.77 GHz 的高频微波信号^[9]。上述方法中,利用多波长 Brillouin 光纤激光器结合外差法产生高频微波信号具有可调谐、频率高、稳定性好等优点,是理想的光生高频微波信号产生方法^[10-11]。张鹏等人基于多波长 Brillouin 光纤激光器产生高频微波信号,增益光纤选取 10 km 长的单模光纤(SMF),其优点是在较低泵浦功率下即可实现多波长斯托克斯(Stokes)光信号的输出,但缺点是较长的增益光纤导致多波长 Stokes 光信号为多纵模输出,其产生的高频微波信号线宽高达 2 MHz,实用价值很低^[12]。而为了获得窄线宽的高频微波信号产生,Liu Jinmei 等人采用 11 m 长 SMF 作为增益介质,由于采用短增益光纤,保证了在一个 Brillouin 增益带宽内仅有一个纵模运行,可产生窄线宽的高频微波信号,但其缺点同样明显,由于采用的增益光纤较短,导致所需的泵浦功率高达 1 600 mW,实用价值依旧较低^[13]。因此如何在较低泵浦功率下实现单纵模激光信号的输出,进而获得高质量的微波信号是迫切需要解决的问题。

为了在较低泵浦功率下实现单纵模激光信号的输出,进而获得窄线宽的高频微波信号,提出了一种结构新颖的复合滤波结构的窄线宽高频微波信号产生装置,在 104 mW 泵浦功率下,通过 8 字腔结构增益腔和波长选择滤波器实现了 4 倍 Brillouin 频移间

隔的双波长 Stokes 光信号输出,利用级联光纤环结构和萨格纳克环结构的复合滤波作用实现了单纵模双波长 Stokes 光信号的输出,拍频检测可得 42.85 GHz 的高频微波信号产生,线宽为 38 kHz,频率变化和峰值功率变化分别在 0.83 MHz 和 ± 0.8 dB 范围内。

1 实验装置的构成及其工作原理

复合滤波结构的窄线宽高频微波信号产生装置如图 1 所示,其包括具有波长调谐功能的泵浦激光器(Tektronix OM2210)、掺铒光纤放大器(HOYATEK HY-EDFA)、偏振控制器、光环行器、耦合器、光衰减器、保偏掺铒光纤、反射式光纤光栅、低噪声放大器(HOYATEK)、光电探测器、光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370D)和频谱分析仪(Agilent N9010A)。

首先,设计具备多波长 Stokes 光信号输出的 Brillouin 光纤激光器;其次,通过复合滤波结构实现单纵模双波长激光信号的输出;最后,利用外差法实现高频微波信号的产生。具体实验过程及原理如下:

在室温条件下,可调谐泵浦激光器经过掺铒光纤放大器放大后通过偏振控制器和环行器 1 沿逆时针进入 Brillouin 增益腔,在 Brillouin 增益腔中产生沿顺时针方向传输的第一阶 Stokes 光信号,产生的第一阶 Stokes 光信号一部分从环行器 1 的三端口输出,另一部分再次进入布里渊增益腔,产生反向传输的第二阶 Stokes 光信号,依次类推,进而产生多阶 Stokes 光信号的输出^[14],该装置在 3 dB Coupler 1 的右侧端口设计断点,并对其做斜面处理以减少瑞利散射。这种设计可有效阻止泵浦光和偶数阶 Stokes 光信号的输出,实现双倍 Brillouin 频移间隔的奇数阶 Stokes 光信号输出,Brillouin 增益腔由级联光纤环结构组成,环 1 由 3 dB 耦合器 1(Coupler1)和 200 m 长 SMF1 组成,环 2 由 3 dB Coupler 2 和 50 m 长 SMF2 组成,级联光纤环结构可用于在较低泵浦功率下实现多波长 Stokes 光信号的输出和激光信号模式的选择。输出的双倍 Brillouin 频移间隔的奇数阶 Stokes 光信号经过环形

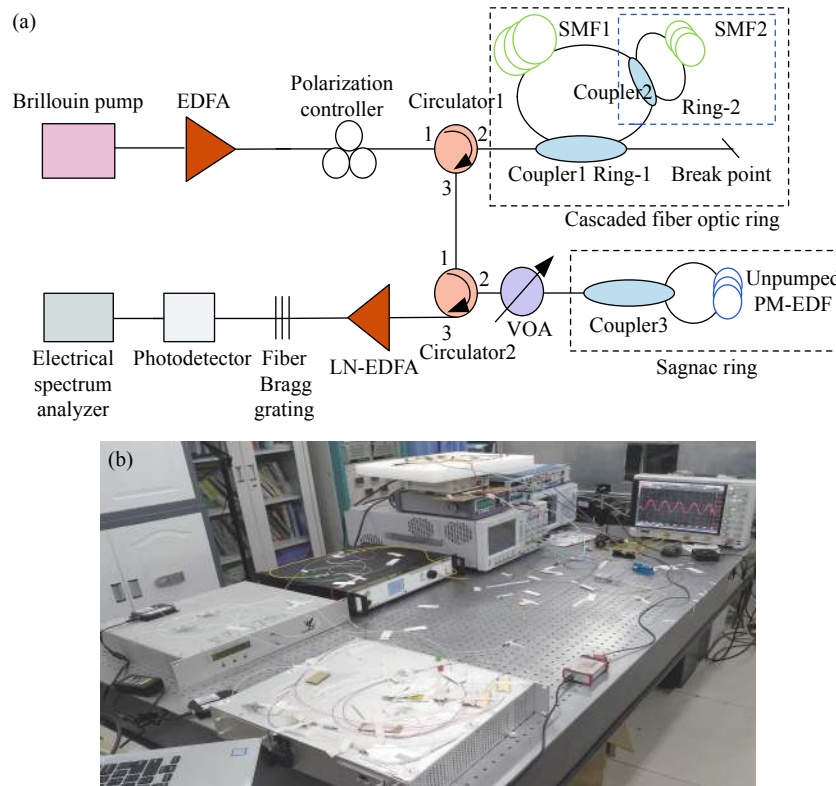


图 1 (a) 高频微波信号产生装置; (b) 测试场景图

Fig.1 (a) High frequency microwave signal generator; (b) Test scene diagram

器 2 和衰减器后进入萨格纳克环滤波结构, 萨格纳克环滤波结构由 3 dB Coupler 3 和 2 m 长未泵浦的保偏掺铒光纤构成, 可使通过它的 Stokes 光信号处于单纵模运行状态, 随后经低噪声放大器放大后进入反射式光纤光栅, 反射式光纤光栅被用作波长选取滤波器, 其滤波中心波长为 1 550.18 nm, 用于对输出波长进行选取。通过级联光纤环结构、萨格纳克环结构和反射式光纤光栅滤波之后的双波长单纵模 Stokes 光信号通过光电探测器进行拍频检测。

2 测量实验与结果

为了获得窄线宽的高频微波信号, 在实验结构中 加入级联光纤环结构和萨格纳克环结构, 利用复合滤波的方式实现单纵模 Stokes 光信号的输出。级联光纤环结构中, 环 1 是主环, 环 2 是子环, 根据维纳效应, 级联环法布里-珀罗的有效自由光谱范围 (FSR) 为:

$$FSR = n_1 FSR_1 = n_2 FSR_2 \quad (1)$$

式中: n_m ($m=1, 2$) 为整数; $FSR_m = c/nL_m$ 为增益带宽; L_m 为长度。已知 Brillouin 增益带宽为 20 MHz, 对应的 SMF 长度为 10 m, 因此通过公式 (1) 可得环 1 和环 2

的 Brillouin 增益带宽分别为 1 MHz 和 4 MHz。图 2(a) 和图 2(b) 分别为单个环 1 和级联光纤环的零差检测频谱, 级联光纤环结构与单环结构相比, 可增大纵模间隔, 使其由 1 MHz 增大至 4 MHz。但 Brillouin 增益带宽内依然有多个模式的存在, 无法保证 Stokes 光信号的单纵模输出, 因此需对其做进一步滤波处理。在级联光纤环结构之后加入萨格纳克环滤波结构, 由于未泵浦的保偏掺铒光纤对 Stokes 光信号的饱和吸收效应, 在萨格纳克环结构中顺时针和逆时针方向传输的相同阶次 Stokes 光信号会在其内部形成自写入式的窄带布拉格光栅滤波器, 其滤波带宽为:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda_B} k \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_B}{2n_0 L_g}\right)^2} \quad (2)$$

式中: 真空中的光速 $c=3 \times 10^8$; 窄带布拉格光栅的中心波长 $\lambda_B=1 550$ nm; 光纤介质的平均折射率 $n_0=1.45$; 未泵浦的保偏掺铒光纤长度 $L_g=2$ m。自引入光栅的耦合系数为 $k = \pi \frac{\Delta n}{\lambda_B}$, 折射系数与入射光功率有关, 调节衰减器使折射系数 $\Delta n=3 \times 10^{-8}$ [15], 可计算出自写入式窄带布拉格光栅的半高全宽为 3.145 MHz, 小于两个

纵模间隔 8 MHz, 因此在自写入式布拉格光栅滤波器的滤波带宽内只存在一个模式, 实现了单纵模 Stokes 光信号的输出。图 2(c) 为级联光纤环结构和萨格纳克环结构复合滤波时的零差检测频谱, 从图中可知输出的 Stokes 光信号为单纵模运行状态。

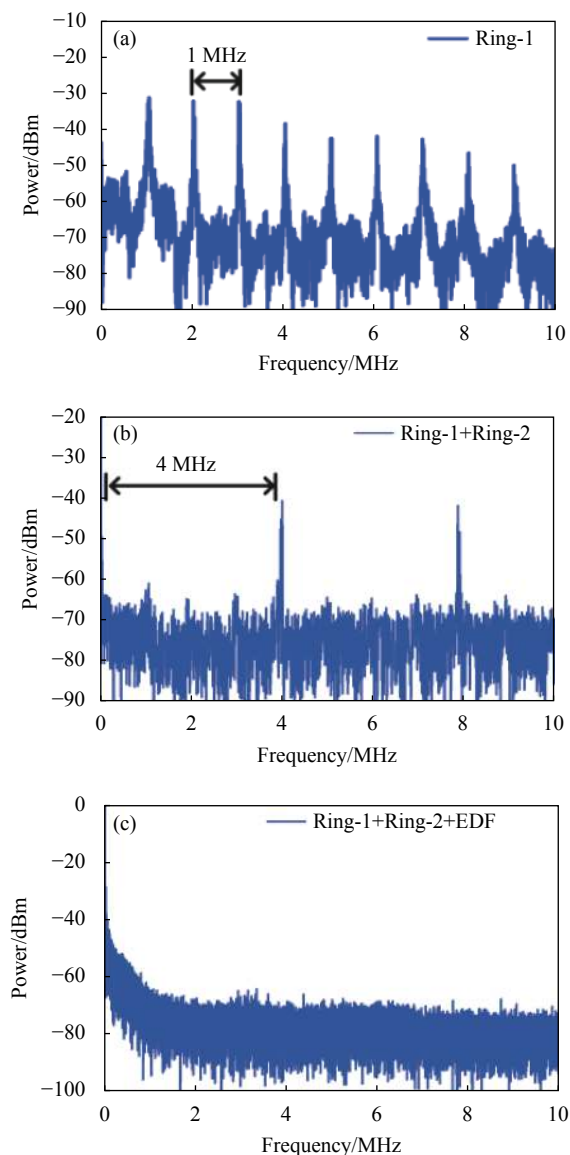


图 2 (a) 环 1 零差检测频谱; (b) 级联光纤环零差检测频谱; (c) 级联光纤环和萨格纳克环零差检测频谱

Fig.2 (a) Homodyne detection spectrum of ring-1; (b) Homodyne detection spectrum of cascade optical fiber ring; (c) Homodyne detection spectrum of Cascade optical fiber ring and Sagnac ring

调节掺铒光纤放大器的输出功率, 当功率增加至 104 mW 时, 光谱分析仪上可观测到第一阶、第三阶和第五阶 Stokes 光信号的输出。调节泵浦光信号的

输出波长使其产生的第三阶 Stokes 光信号波长与反射式光纤光栅的滤波中心波长对应, 进而滤除第三阶 Stokes 光信号的输出, 可得具有 4 倍 Brillouin 频移间隔的第一阶和第五阶 Stokes 光信号输出光谱如图 3 所示。

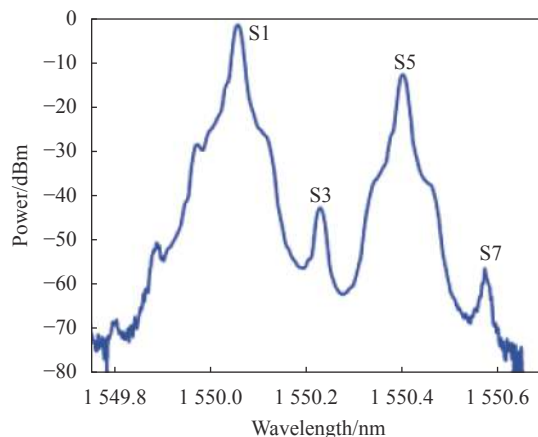


图 3 双波长激光信号输出光谱

Fig.3 Spectrum of dual-wavelength laser signal output

把图 3 中输出的 4 倍 Brillouin 频移间隔的单纵模双波长 Stokes 光信号输入光电探测器进行拍频检测, 通过频谱分析仪观测到信噪比达 19 dB 的 42.85 GHz 高频微波信号产生, 如图 4 所示。每间隔 10 min 记录一次输出频谱的变化情况, 从图 5 中可知, 产生的 42.85 GHz 高频微波信号的频率变化在 0.83 MHz 范围内, 峰值功率变化在 ± 0.8 dB 范围内。

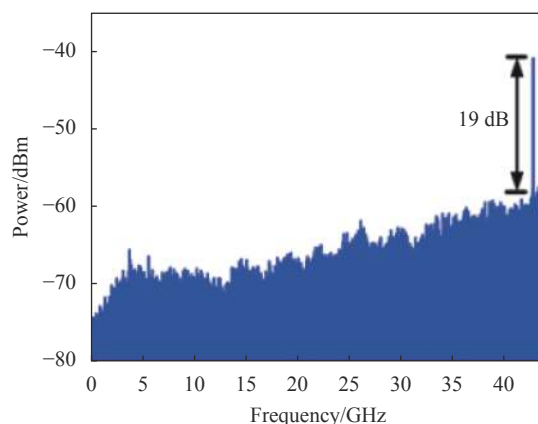


图 4 高频微波信号输出频谱

Fig.4 High frequency microwave signal output spectrum

通过 Origin 软件对产生的 42.85 GHz 高频微波信号进行非线性拟合, 可得 42.85 GHz 高频微波信号的半高全宽为 38 kHz, 如图 6 所示。

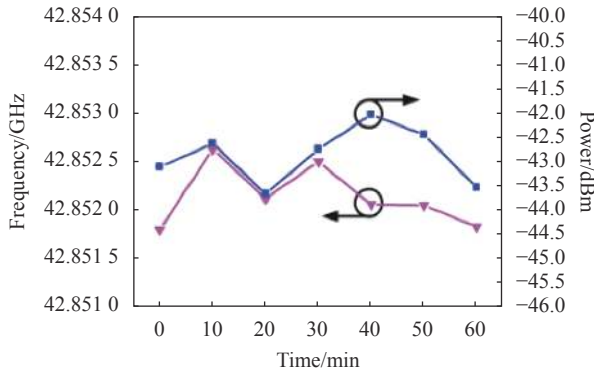


图 5 高频微波信号的频率漂移和功率变化

Fig.5 Frequency drift and power changes of high frequency microwave signals

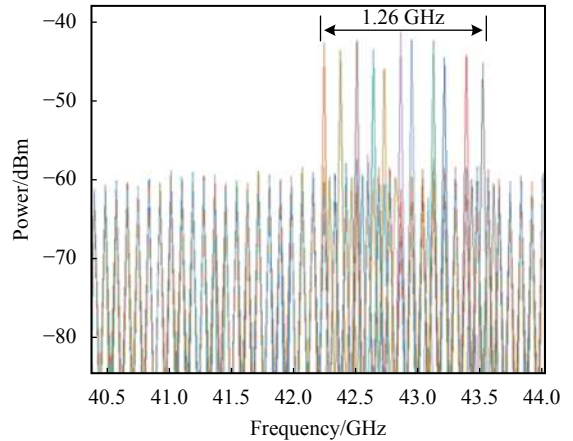


图 7 高频微波信号调谐范围

Fig.7 Tuning range of high frequency microwave signal

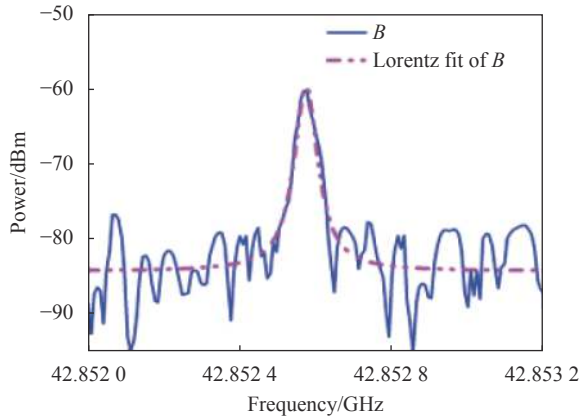


图 6 高频微波信号线宽拟合

Fig.6 Line width fitting of high frequency microwave signal

Brillouin 频移公式可表示为:

$$V_B = \frac{2nV_a}{\lambda_p} \quad (3)$$

式中: n 为光纤介质的折射率; V_a 为光纤中的声波速度; λ_p 为泵浦激光器波长。通过公式 (3) 可知, 由于 n 和 V_a 是固定不变的, 因此通过调谐泵浦激光器的波长即可实现高频微波信号的频率调谐。通过调谐泵浦激光器波长, 可实现高频微波信号在 42.25~43.51 GHz 范围内的频率调谐, 如图 7 所示。

该实验结构可在较低泵浦功率下实现窄线宽的高频微波信号产生, 具有很高的实用价值。此外, 通过增加泵浦功率和反射式光纤光栅的滤波范围, 可获得更高频率的微波信号产生, 由于实验所用的频谱分析仪最高频率范围只能到 44 GHz, 因此最多观测到 43.51 GHz 的高频微波信号产生。

3 结 论

文中设计并实验了一种结构新颖的复合滤波结构的窄线宽高频微波信号产生装置, 在 104 mW 泵浦功率下即可实现单纵模双波长激光信号的输出, 进而获得窄线宽的高频微波信号。通过 8 字腔结构增益腔和波长选择滤波器实现了 4 倍布里渊频移间隔的双波长斯托克斯光信号输出, 通过级联光纤环结构和萨格纳克环结构的复合滤波作用使输出的双波长斯托克斯光信号处于单纵模运行状态, 对输出的单纵模双波长斯托克斯光信号进行拍频检测可得频率为 42.85 GHz, 线宽为 38 kHz 的高频微波信号产生, 其频率变化和峰值功率变化分别在 0.83 MHz 和 ± 0.8 dB 范围内, 通过调谐泵浦激光器波长, 可实现 42.25~43.51 GHz 范围内的频率调谐。此外, 该实验装置可以通过增加泵浦功率和反射式光纤光栅的滤波范围, 获得更高频率的超窄线宽高频微波信号产生。

参考文献:

- [1] Xie Taoran, Wang Zhaoying, Yuan Quan, et al. Generation of THz signal based on recirculating frequency-shifting loop with tunable frequency multiplication factor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S125001. (in Chinese)
- [2] Li Xiang, Wang Yalan, Ni Ziheng, et al. Broadband microwave frequency down conversion using cascade Mach-Zehnder modulators to capture the target distance information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2622-2628. (in Chinese)

- [3] Wang Heng, Jia Qingsong, Zhang Shangjian, et al. Self-calibrated characterization for frequency response of high-speed photodetectors based on dual-drive modulation [J]. *Flight Control and Detection*, 2019, 2(6): 61-66. (in Chinese)
- [4] Shi Junkai, Wang Guoming, Ji Rongwei, et al. Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2019, 2(6): 61-66. (in Chinese)
- [5] Wang Guodong, Zhao Shanghong, Li Xuan, et al. Optical generation scheme of microwave signals with multiple modulation formats [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0622002. (in Chinese)
- [6] Wang Chao, Xiao Yongchuan, Lin Shuqing, et al. Generation of a 49 GHz, high-repetition-rate, all-polarization-maintaining, frequency-locked multicarrier [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 745-751. (in Chinese)
- [7] Zhang Y, Ning T G, Li J, et al. Tunable frequency-multiplying optoelectronic oscillator based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator incorporating a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16: 405-409.
- [8] Jiang Y, Zi Y J, Bai G F, et al. All-optical microwave oscillator based on semiconductor optical amplifier and stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1774-1777.
- [9] Wang Z, Wang T S, Jia Q S, et al. Triple Brillouin frequency spacing multiwavelength fiber laser with double Brillouin cavities and its application in microwave signal generation [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7419-7426.
- [10] Wen Jianxiang, Jia Ming, Dong Yanhua, et al. Preparation and characteristics of radiation-resistance polarization-maintaining fiber [J]. *Flight Control and Detection*, 2020, 3(2): 81-85. (in Chinese)
- [11] Zhou W N, Qu S L, Du C, et al. High-speed frequency-hopping signal generator with a stimulated Brillouin scattering-based optoelectronic oscillator [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(2): 027101.
- [12] Zhang Peng, Wang Tianshu, Jia Qingsong, et al. Tunable microwave signal generation based on a multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure of eight configuration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1202006. (in Chinese)
- [13] Liu J M, Zhan L, Xiao P P, et al. Generation of step-tunable microwave signal using multiwavelength Brillouin fiber laser [J]. *Photonic Technology Letters*, 2013, 25(3): 220-223.
- [14] Zhu Yongxiang, Lu Qisheng. Anti-Stokes scattering of Stokes light and slow light in stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 487-492. (in Chinese)
- [15] Liu R N, Kostko I A, Kashyap R, et al. Inband-pumped, broadband bleaching of absorption and refractive index changes in erbium-doped fiber [J]. *Opt Commun*, 2005, 255(65): 65-71.