

### 全保偏49 GHz高重频多波长光源的产生

王超 肖永川 林书庆 庾财斌 瞿鹏飞 李儒章 孙力军

#### Generation of a 49-GHz, high-repetition-rate, all-polarization-maintaining, frequency-locked multicarrier

WANG Chao, XIAO Yong-chuan, LIN Shu-qing, YU Cai-bin, QU Peng-fei, LI Ru-zhang, SUN Li-jun

引用本文:

王超, 肖永川, 林书庆, 庾财斌, 瞿鹏飞, 李儒章, 孙力军. 全保偏49 GHz高重频多波长光源的产生[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 745–751. doi: 10.37188/CO.2019–0191

WANG Chao, XIAO Yong-chuan, LIN Shu-qing, YU Cai-bin, QU Peng-fei, LI Ru-zhang, SUN Li-jun. Generation of a 49-GHz, high-repetition-rate, all-polarization-maintaining, frequency-locked multicarrier[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 745–751. doi: 10.37188/CO.2019–0191

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0191>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 高重频CO<sub>2</sub>激光干扰技术研究

Research on the interference technology of high repetition frequency CO<sub>2</sub> laser

中国光学. 2018, 11(6): 983 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0983>

#### 瓦级319nm单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子Rydberg激发

Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms

中国光学. 2019, 12(4): 701 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0701>

#### 200 Hz高重复频率SBS脉宽压缩实验研究

200 Hz high repetition frequency SBS pulse width compression experiment

中国光学. 2018, 11(5): 736 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0736>

#### 基于激光多普勒频移的钢轨缺陷监测

Rail defect monitoring based on laser Doppler frequency shift theory

中国光学. 2018, 11(6): 991 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0991>

#### 多光子皮肤成像技术及其应用

Multi-photon skin tissue imaging technology and its applications

中国光学. 2019, 12(1): 104 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0104>

#### 双压电片镜在同步辐射光源光学系统中的应用

Application of bimorph mirror in the optical system of synchrotron radiation light source

中国光学. 2017, 10(6): 699 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0699>

# 全保偏 49 GHz 高重频多波长光源的产生

王超<sup>1,2\*</sup>, 肖永川<sup>1</sup>, 林书庆<sup>1</sup>, 庾财斌<sup>1</sup>, 瞿鹏飞<sup>1</sup>, 李儒章<sup>2</sup>, 孙力军<sup>1</sup>

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060;

2. 模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

**摘要:**频域稳定的高重频多波长光源是信道化和光通讯等领域的理想光源。为了满足高重频多梳齿激光器的应用需求, 本文研制了 49 GHz 梳齿间隔的多波长激光器。通过优化 I/Q 两端射频信号和三个偏置点, IQ 调制器稳定工作在载波抑制单边带模式, 杂散频率成分抑制比达到 27.5 dB。本文利用循环调制技术产生宽带多波长光频梳, 并通过优化射频功率建立环内增益-损耗平衡, 有效提升平坦度, 获得了梳齿间隔为 24.5 GHz、梳齿数目为 28 根、平坦度仅为 3 dB、梳齿信噪比(TNR)达 29 dB 的多波长光频梳。在此基础上, 进一步利用法布罗(FP)滤波技术将频率间隔提升到 49 GHz, 最终得到梳齿数目达 14 根, 平坦度为 2.7 dB, TNR 达 19 dB, 平均光功率为 9 dBm 的高重频多波长光频梳。由于采用了全保偏光纤器件和集成化技术, 本系统具有一键式启动和长时稳定运行的特点, 运行半小时的功率抖动标准差仅为 0.5%, 有望在各微波光子领域中应用。

**关键词:**多波长光源; 微波光子; 单边带调制; 高重频; 光频梳

中图分类号: TN242 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2019-0191

## Generation of a 49-GHz, high-repetition-rate, all-polarization-maintaining, frequency-locked multicarrier

WANG Chao<sup>1,2\*</sup>, XIAO Yong-chuan<sup>1</sup>, LIN Shu-qing<sup>1</sup>, YU Cai-bin<sup>1</sup>,

QU Peng-fei<sup>1</sup>, LI Ru-zhang<sup>2</sup>, SUN Li-jun<sup>1</sup>

(1. *Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;*

2. *Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, Chongqing 400060, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wangchaohuster@163.com*

**Abstract:** Frequency-locked multicarrier with high repetition rate is an ideal tool for microwave channelization and optical communications. To meet the needs of those applications, we propose a multicarrier laser with a repetition frequency of 49 GHz. The I/Q Modulator (IQM) works at the Single-Frequency Shifting (SSB) state by carefully optimizing the Radio Frequencies (RFs) and their three bias points, resulting in a signal-to-noise ratio of 27.5 dB. The Recirculating Frequency Shifter (RFS) architecture is employed to generate an optical comb with high flatness. By optimizing the power of RFs for the balance of gain and loss of in-

收稿日期: 2019-09-25; 修订日期: 2019-11-08

基金项目: 重庆市博士后科学基金项目 (No. CSTC2019jcyj-bshx0103)

Supported by Postdoctoral Science foundation of Chongqing (No. CSTC2019jcyj-bshx0103)

tracavity, we successfully generate 28 frequency-locked subcarriers with flatnesses lower than 3 dB and Tone-to-Noise Ratios (TNR) larger than 29 dB. Meanwhile, an Fabry-Perot (FP) etalon is used to increase the repetition-rate, resulting in 14 frequency-locked subcarriers with flatnesses lower than 2.7 dB, TNR larger than 19 dB, average powers of more than 9 dBm and carrier spacings at 49 GHz. By applying all-polarization-maintaining components and integrated technology, the system shows one-push and long-term running properties. The standard deviation of power jitter of the multi-carrier frequency comb through the half hour is only 0.5%, which shows that this scheme has great potential applications in channel communications and microwave channelization.

**Key words:** multicarrier source; microwave photonics; single-sideband modulation; high repetition rate; optical comb

## 1 引言

光学频率梳在时域上具有稳定、超快的特性,在频域上具有宽带、高精度的特性,是微波光子学领域的重要研究工具<sup>[1]</sup>。特别地,它在信道化、光成像、光通讯以及任意波形产生等领域有着广泛的应用,是雷达、电子战及通信等电子信息装备的核心技术<sup>[2-5]</sup>。2014年,基于光频梳的全光相干雷达系统首次在意大利研制成功,系统具有高精度、宽带宽、高灵敏以及无需下转换等优势,引起了广泛的关注<sup>[6]</sup>。国内包括清华大学、南京航空航天大学 and 北京邮电大学等多个高校持续跟踪研究。

高重频光频梳具有宽的梳齿间隔(通常 $\geq 10$  GHz)和小的时间抖动(fs量级),是微波光子学信道化和光通讯领域的理想工具。而较高的梳齿间隔对光频梳的产生方法提出了较高的要求,传统的光纤激光器、固体激光器等主被动锁模方式受激光器腔长限制无法满足需求<sup>[7-8]</sup>。近年来,国内外多个课题组和公司持续研究,陆续提出了多个解决方案。2012年,日本的Optocomb公司首次推出了基于法布罗(FP)腔相位调制技术的高重频光频梳,重频间隔达25 GHz,其具有结构紧凑,平坦度好的优点<sup>[9]</sup>,但其重频间隔拓展有限、伺服控制系统复杂和成本较高。微腔调制技术是产生高重频光频梳的有效方式。它具有尺寸小、重量轻、光谱宽和梳齿间隔大的特点,其梳齿间隔可达100 GHz,在未来集成光学系统具有很高的应用潜力<sup>[10-11]</sup>。但目前,其存在平坦度较差、噪声大和相位锁定较难等问题,限制了其应用。另一方

面,基于级联调制的光频梳具有梳齿间隔大、范围可调、结构紧凑、梳齿数目多和相位噪声低等特点。2010年,美国普渡大学通过级联调制获得了梳齿间隔为10 GHz,梳齿数目为38根,平坦度小于1 dB的光频梳,并于2013年利用非线性技术将梳齿数目提升到365个<sup>[12-13]</sup>。2012年,清华大学的DOU Y J<sup>[14]</sup>通过级联两个相位调制器,获得了梳齿间隔为10 GHz,梳齿数目为29根,平坦度小于1.5 dB的光频梳。但该方法受调制器可调制频率和可承受功率限制,重复频率一般为40 GHz,同时在高重复频率下梳齿数量有限。

基于循环调制的方法不受调制器的限制,具有梳齿间隔可调、梳齿数目多和平坦度好的特点。2010年,北京邮电大学的LI J P等<sup>[15]</sup>验证了基于单边带调制的循环频移方法可以产生稳定的高重频光频梳,并在2011年实验上获得了梳齿间隔为12.5 GHz,梳齿数量达50的光频梳<sup>[16]</sup>,在2017年发展了双方向的频率拓展技术,将梳齿数目增加至80根<sup>[17-18]</sup>。本文基于该方法,结合FP标准具滤波技术,首次将重复频率提升到49 GHz,同时利用全保偏系统,有效提升了系统的抗干扰能力,利用光纤光栅(FBG)代替传统台式滤波器,实现集成化高重复频率光梳系统,梳齿数目达14,平坦度为2.7 dB,平均光功率为9 dBm。本系统有望应用到信道化和光ADC等各微波光子领域。

## 2 多波长光频梳的构成及其工作原理

### 2.1 多波长光频梳系统的硬件构成

图1(彩图见期刊电子版)为全保偏高重频光

梳产生系统的实验装置图。

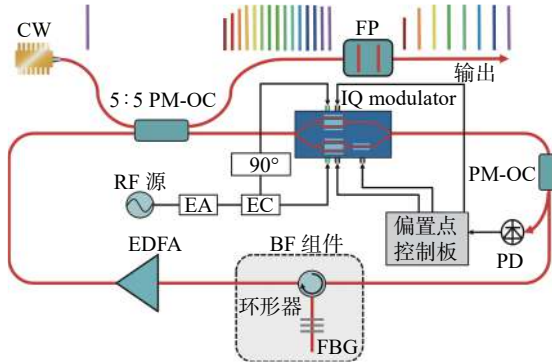


图1 多波长光频梳系统装置图。CW: 连续激光器, PM-OC: 保偏分束器, FP: 法布里-珀罗标准具, EDFA: 掺铒光纤放大器, FBG: 光纤光栅, BF: 带通滤波, PD: 光电探测器, EA: 射频放大器, EC: 射频功分器

Fig. 1 Block diagram of multicarrier source system. CW: continuous wave laser; PM-OC: polarization-maintaining optical coupler; FP: Fabry-Perot etalon; EDFA: Erbium-doped fiber amplifier; FBG: fiber bragg grating; BP: band-pass filter; PD: photodiode detector; EA: electronic amplifier; EC: electronic coupler

它主要由 CW(连续激光器)光源、环内调制模块以及环外滤波模块 3 部分组成。系统的工作原理是基于 IQ 调制器完成光学移频,并通过循环调制产生频率梳齿,利用 EDFA(掺铒光纤放大

$$\begin{aligned}
 V_{\text{out}}(t) &= E_1(t) + jE_0(t) \\
 &\approx \frac{1}{4}E_o(1 - j^{n+1}) \left\{ \sum_{-\infty}^{+\infty} \left[ J_n\left(\frac{\pi}{2}R\right) - (-1)^n J_n\left(\frac{\pi}{2}R\right) \right] \exp[j2\pi(f_c + n f_s t)] \right\} \\
 &\approx \frac{1}{4}E_o \left\{ 4J_1\left(\frac{\pi}{2}R\right) \exp[j2\pi(f_c + f_s t)] + 4J_{-3}\left(\frac{\pi}{2}R\right) \exp[j2\pi(f_c - 3f_s t)] + \dots \right\} \\
 &\approx E_o J_1\left(\frac{\pi}{2}R\right) \exp[j2\pi(f_c + f_s t)]
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $E_1(t)$  和  $E_0(t)$  分别为 IQ 调制器中并行 MZM 输出的光场,  $E_c = E_o \exp(j2\pi f_c t)$  为 IQ 调制器的输入光场, 对应光频为  $f_c$ 。由式(3)可见, 在理想情况下, 当并行 MZM 的偏置点均在半波电压, IQ 调制器偏置点对应  $-\pi/2$ , 连续光经 IQ 调制器作用后将产生正向频率为  $f_s$  的移动, 同时会在载波  $f_c$ 、光频  $f_c - f_s$  以及  $f_c - 3f_s$  等频点存在一定的残余分量。可通过优化 I/Q 两端射频信号的幅度/相位差、IQ 调制器偏置点控制精度以及选型高分光比调制器来有效提高杂散成分抑制度。

器)补偿环内损耗、带通滤波组件控制频率成分和 FP 标准具提升光频梳齿间隔, 最终稳定输出高重频线偏振的具有多波长的光频率。

## 2.2 多波长光频梳系统的工作原理

首先, CW 光源输出中心波长为 1552.39 nm, 线宽约为 1 MHz 的连续激光, 输出功率可调。CW 激光通过 5:5 PM-OC(保偏分束器)分为两路: 一路输出至环外滤波模块, 另一路进入环内调制模块与 IQ 调制器连接。为了实现光学移频, IQ 调制器需要工作在载波抑制单边带模式, 相应地, I/Q 端口输出的射频信号需要具有相同的幅度与固定  $90^\circ$  相位差:

$$V_I = R V_{I\pi} \sin(2\pi f_s t), \quad (1)$$

$$V_Q = R V_{Q\pi} \sin(2\pi f_s t - \pi/2), \quad (2)$$

其中,  $R$  为调制深度, 用于表征射频信号幅度与半波电压的比值, 通常两端口半波电压可近似相同, 即  $V_\pi = V_{I\pi} = V_{Q\pi}$ 。两路射频信号由同一射频信号(频率  $f_s$ )经 EA(射频放大器)放大后通过 EC(射频功分器)均分形成。同时在一路中利用射频移相器调整延时, 从而获得固定的  $90^\circ$  的相位差。利用 Jacobi 三角公式进行展开, 并忽略调制器 I/Q 两端不对称因数的影响, IQ 调制器输出的光场可以表示为<sup>[15]</sup>:

进一步, IQ 调制器输出的频移光场将通过多次环内循环调制, 逐渐拓展频率, 经  $N$  次循环后产生  $N+1$  根频率成分并输出。为了实现稳定的多梳齿频率成分输出, 首先需要利用 EDFA 对环内各器件引入的损耗进行补偿, 其次需要环内光学滤波限制梳齿数量, 抑制远端杂散成分消耗光增益。EDFA 的增益为 20 dB, 饱和功率为 21 dBm, 可以有效补偿 PM-OC、调制器和 BF 滤波组件的损耗。当环内增益和损耗建立平衡, 即可稳定输出等间隔的多波长光频梳。



### 3 实验过程与结果分析

基于上述原理分析,本文开展了相应的实验研究。实验过程主要分为以下几部分:首先,通过研究 RF 射频功率对 IQ 调制器插损和抑制比的影响,获得最佳的载波抑制单边带状态;其次,开展环内增益-损耗平衡研究,实现多波长光频梳的产生;同时通过环外滤波提升梳齿间隔;最后,开展系统集成和稳定性研究,为后续的实际应用奠定基础。

本系统基于全保偏光学器件完成,可以有效提升系统抗干扰能力,进一步提高光频梳稳定性和平坦度,具体实验结果和分析如下。

#### 3.1 IQ 调制器载波抑制单边带调制实验

如图 1 所示, CW 光功率调整为 4 dBm 后经过 5 : 5 PM-OC 注入到环内。IQ 调制器单通工作状态是多波长光频梳稳定输出的关键,因此,首先详细研究了 CW 激光经过 IQ 调制器后的输出情况。为了使 IQ 调制器工作在载波抑制单边带状态下,实验中利用 PM-OC 进行分束,之后部分光进入 PD 进行光电转换,然后接入偏置点控制板,产生三路偏置点控制电压分别接入 IQ 调制器的 I、Q 以及 P 端。通过导频法实时反馈使 IQ 调制器稳定工作在载波抑制单边带状态下,并通过改变 I/Q 两端射频信号的相位差( $\pi/2$  或  $-\pi/2$ ),改变输出光谱频移方向。图 2(a)所示为短波方面频移的输出光谱,经优化后,1 阶频率成分相对载波信号的抑制比(TNR)达到 33 dB,表明载波得到有效抑制。同时受限于系统整体体积,I/Q 两端射频的幅度平衡无法进一步优化,输出光谱曲线存在-1 阶和-3 阶等杂散频率成分。

由图 2(a)可见,-1 阶频率为主要的杂散成分,1 阶相对-1 阶频率的 TNR 达到 27.5 dB,说明杂散成分得到有效抑制,有利于产生稳定的多波长光频梳。为了实现后续环内的增益损耗平衡,往往需要通过调整射频功率来改变 IQ 调制器引入的损耗。如图 2(b)所示,本文测量了不同 RF 射频功率下 IQ 调制器插损和 1 阶相对-1 阶频率的 TNR 的变化曲线。可见,随着 RF 射频功率的

增大,IQ 调制器的插损逐渐减小,同时 1 阶相对-1 阶频率的抑制比接近固定值,此现象与理论相符。尽管进一步增大 RF 射频功率可以减小插损,有利于产生更多梳齿,但也会增大-3 阶杂散频率的幅值,甚至使其超过-1 阶频率成分,从而会降低梳齿平坦度和稳定性。综合考虑,本系统选取了 RF 射频功率为 17.7 dBm,对应的 IQ 调制器插入损耗为 14.28 dB。

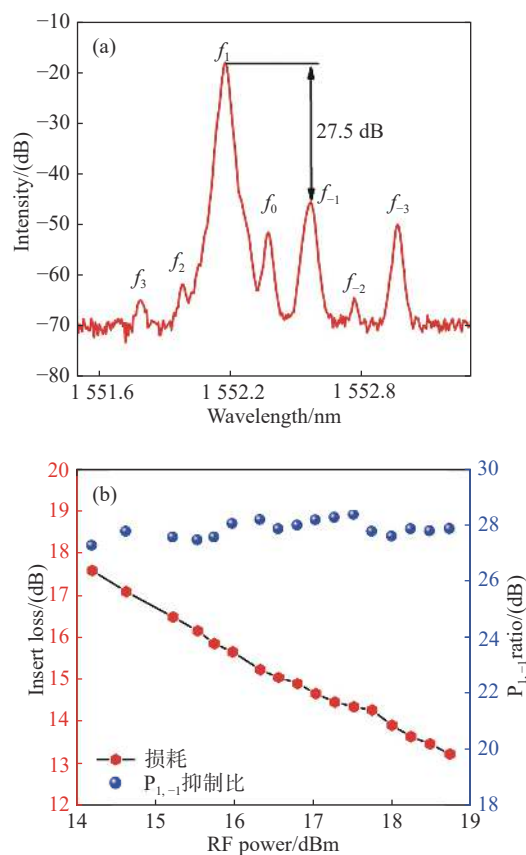


图 2 (a) IQ 调制器载波抑制单边带下的输出光谱图; (b) IQ 调制器插损和  $P_{1,-1}$  抑制比随 RF 射频功率的变化曲线

Fig. 2 (a) The output spectrum after IQ modulator with single-frequency shifting state; (b) insert loss of IQ modulator and  $P_{1,-1}$  ratio versus the RF power

#### 3.2 多波长光频梳的产生

在此基础上,移频后的激光进入 BF 组件进行光滤波。该组件由环形器和宽带 FBG 组成。相对传统台式带通滤波器,本组件尽管滤波矩形度有限,但具有插损小和易集成化的优点。BF 组件输出的光经 EDFA 获得光增益,然后再次通过

5 : 5 PM-OC 分束,部分回到环内进一步移频,部分直接输出。图3为经过优化后输出的24.5 GHz波长光频梳,可以看出,基于循环调制技术和增益损耗平衡,梳齿数量有效拓展到28根,波长覆盖约为5.5 nm,相应的平坦度为3 dB。通过控制EDFA的自发辐射,带内梳齿相对噪底的抑制比TNR可达到29 dB。

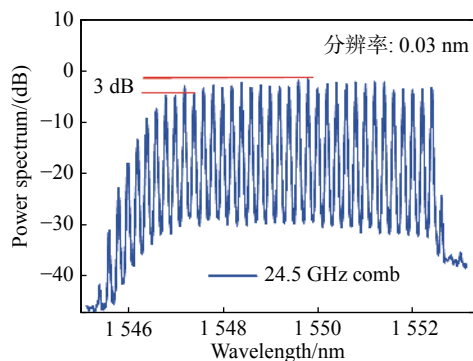


图3 24.5 GHz多波长光频梳的输出光谱曲线

Fig. 3 The output spectrum of 24.5-GHz multicarrier frequency comb

在光通讯和雷达信道化等领域,往往希望光频梳的频率间隔尽量大,有利于滤波处理和提高可利用频率范围。因此,本文最后在环外利用FP标准具对PM-OC输出的宽带多波长光频梳进行滤波处理。由于FP标准具对应的自由光谱程是射频信号频率 $f_s$ 的两倍,当光频梳成分与FP标准具透射波长对齐,即可在不影响光频梳平坦度的情况下有效提升梳齿间隔,获得高重频多波长光源。因此,5 : 5PM-OC输出的宽带多波长光频梳进入FP标准具,并进行滤波处理。图4(a)为FP标准具的透射曲线,相邻的透射峰间隔约为49 GHz,是产生光频梳梳齿间隔的两倍。当调节FP标准具透射峰,使其与光频梳梳齿对齐,即可输出49 GHz频率间隔的多波长光频梳,相应的光谱曲线如图4(b)所示。有效利用FP标准具的高自由光谱程特性,可有效抑制24.5 GHz频率间隔的频率成分,相应的TNR可以达到19 dB,该值可以通过提升FP标准具的精细度进一步提高。相应的梳齿数量达到14根,平坦度为2.7 dB。

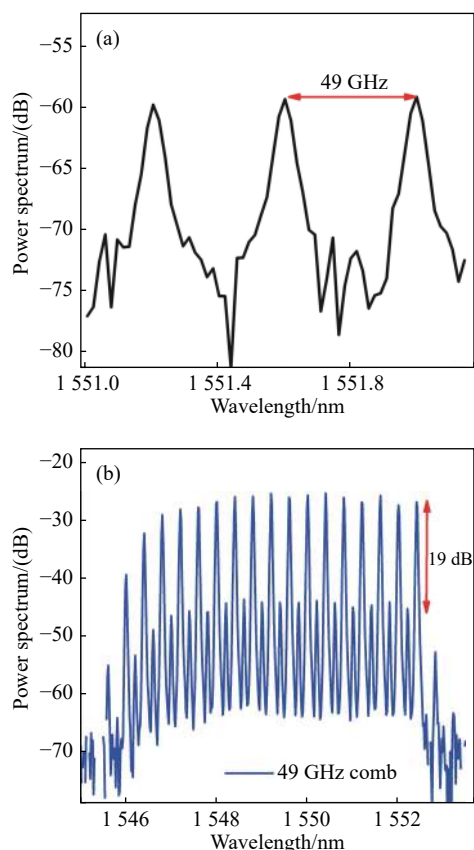


图4 (a)49 GHz FP标准具的透射曲线;(b)49 GHz多波长光频梳输出光谱曲线

Fig. 4 (a) The transmission curve of 49-GHz FP etalon; (b) the output spectrum of 49-GHz multicarrier frequency comb

### 3.3 多波长光频梳系统稳定性测量

最后,本文将各组件进行集成并研究其长时间运行稳定性。集成后的全保偏49 GHz高重频多波长光源系统的体积仅为 $233.35\text{ mm} \times 162.5\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。本系统为一键启动装置,启动后经10~30 s即可建立平衡,输出稳定的高重频多波长光频梳。以5 s为间隔连续监测了系统运行半个小时的输出平均光功率,结果如图5所示。可见,基于全保偏器件,本系统的稳定度得到有效提升,同时输出为线偏振激光。长时间稳定运行下的平均输出功率约为9 dBm,相应的标准差仅为0.5%。经分析,出现光功率抖动的原因主要有输入激光器功率、波长飘动、射频功率抖动以及环内EDFA输出抖动等因素。通过提升输入激光器和射频信号的稳定性,系统可以进一步提升长时稳定性,从而满足各微波光子领域的应用需求。

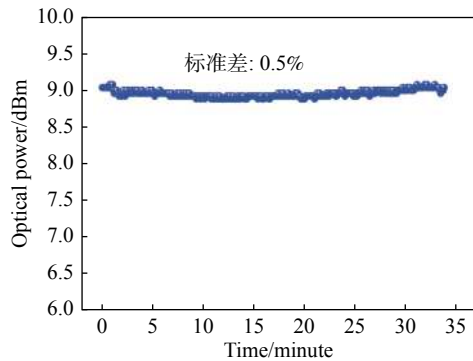


图 5 多波长光频梳输出功率变化曲线

Fig. 5 Variation of output power for multi-wavelength optical frequency comb

## 4 结 论

基于循环调制技术, 本文首次实现了全保偏

### 参考文献:

- [1] ZOU X H, LU B, PAN W, *et al.*. Photonics for microwave measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 711-734.
- [2] XIE X J, DAI Y T, XU K, *et al.*. Broadband photonic RF channelization based on coherent optical frequency combs and I/Q demodulators[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(4): 1196-1202.
- [3] JI N, MAGEE J C, BETZIG E. High-speed, low-photodamage nonlinear imaging using passive pulse splitters[J]. *Nature Methods*, 2008, 5(2): 197-202.
- [4] DESURVIRE E, KAZMIERSKI C, LELARGE F, *et al.*. Science and technology challenges in XXIst century optical communications[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2011, 12(4): 387-416.
- [5] 王治昊, 余锦, 樊仲维, 等. 全固态被动调Q皮秒激光技术研究进展[J]. *发光学报*, 2013, 34(7): 900-910.  
WANG H ZH, YU J, FAN ZH W, *et al.*. Research progress of all-solid-state passively Q-switched picosecond laser technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(7): 900-910. (in Chinese)
- [6] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, *et al.*. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [7] 康喆, 刘明奕, 刘承志, 等. 基于微纳光纤-单壁碳纳米管可饱和吸收体的被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *发光学报*, 2017, 38(5): 630-635.  
KANG ZH, LIU M Y, LIU CH ZH, *et al.*. Passively Q-switched Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on microfiber-single wall carbon nanotube saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(5): 630-635. (in Chinese)
- [8] 崔铮, 陈毅, 姚宝权, 等. 基于多层石墨烯可饱和吸收体的被动调Q Ho : YAG激光器[J]. *发光学报*, 2016, 37(6): 696-700.  
CUI ZH, CHEN Y, YAO B Q, *et al.*. Passively Q-switched Ho : YAG laser with multilayer graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(6): 696-700. (in Chinese)
- [9] GORDON E I, RIGDEN J D. the fabry-perot electrooptic modulator[J]. *Bell System Technical Journal*, 1963, 42(1): 155-179.
- [10] FERDOUS F, MIAO H X, LEAIRD D E, *et al.*. Spectral line-by-line pulse shaping of on-chip microresonator frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12): 770-776.
- [11] PAPP S B, DIDDAMS S A. Spectral and temporal characterization of a fused-quartz-microresonator optical frequency

49 GHz 高重频多波长光源。通过优化 I/Q 两端的射频信号和 3 个偏置点, IQ 调制稳定工作在载波抑制单边带模式, 杂散频率成分抑制比达到 27.5 dB。同时, 通过优化射频功率, 建立环内增益损耗平衡, 获得了宽带多波长光频梳, 梳齿间隔为 24.5 GHz, 梳齿数量为 28 根, 平坦度仅为 3 dB, TNR 达 29 dB。进一步利用 FP 标准具滤波技术, 本文获得了全保偏 49 GHz 高重频多波长光源, 梳齿数量为 14 根, 平坦度仅为 2.7 dB, TNR 达 19 dB。最后将本系统集成体积仅为 233.35 mm×162.5 mm×20 mm 的一键式光学模块, 长时间稳定运行下的平均输出功率约为 9 dBm, 相应的标准差仅为 0.5%, 有望运用到各微波光子领域中。

- comb[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(5): 053833.
- [12] WU R, SUPRADEEPA V R, LONG C M, *et al.*. Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3234-3236.
- [13] WU R, TORRES-COMPANY V, LEAIRD D E, *et al.*. Supercontinuum-based 10-GHz flat-topped optical frequency comb generation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6045-6052.
- [14] DOU Y J, ZHANG H M, YAO M Y. Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(9): 727-729.
- [15] LI J P, LI X, ZHANG X G, *et al.*. Analysis of the stability and optimizing operation of the single-side-band modulator based on re-circulating frequency shifter used for the T-bit/s optical communication transmission[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17597-17609.
- [16] TIAN F, ZHANG X G, LI J P, *et al.*. Generation of 50 stable frequency-locked optical carriers for Tb/s multicarrier optical transmission using a recirculating frequency shifter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1085-1091.
- [17] LI J P, MA H T, LI ZH H, *et al.*. Optical frequency comb generation based on dual-polarization IQ modulator shared by two polarization-orthogonal recirculating frequency shifting loops[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7906110.
- [18] ZHANG J W, YU J J, CHI N, *et al.*. Stable optical frequency-locked multicarriers generation by double recirculating frequency shifter loops for Tb/s communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3938-3945.

#### 作者简介:



王超(1990—),男,重庆垫江人,博士,工程师,2018年于华东师范大学获得博士学位,现为中国电子科技集团公司重庆声光电有限公司工程师,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: wangchaohuster@163.com