

基于布里渊载波相移的宽带可调谐二倍频微波信号生成*

郑狄[†] 潘炜 闫连山 罗斌 邹喜华 刘新开 易安林

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2014年1月26日收到; 2014年3月6日收到修改稿)

本文提出并实验验证了一种基于光纤中受激布里渊散射效应的光子二倍频微波信号生成技术. 利用布里渊增益谱内的强色散特性, 对光强度调制器产生的双边带调制信号的载波进行 $\pi/2$ 相移, 可实现载波与 ± 1 阶边带拍频仅生成二倍频微波信号. 由于光纤中受激布里渊散射的窄带特性以及仅对双边带调制信号的载波进行相移, 不影响调制信号两个边带的幅值和相位, 因而生成的二倍频微波信号可实现宽带调谐, 调谐范围仅受其他光器件的工作带宽限制. 此外, 信号光和产生受激布里渊散射的抽运光均来自同一光源, 因而不受波长漂移的影响, 系统具有良好的稳定性.

关键词: 微波信号生成, 受激布里渊散射, 微波光子

PACS: 42.72.Ai, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.63.154214

1 引言

高频、宽带可调谐的微波信号生成技术在传感、雷达、无线通讯等领域具有重要的应用价值. 与传统的电生微波技术相比, 利用光子技术生成微波信号具有高频、宽带可调谐且不受电磁干扰的优点, 近年来科研人员对其进行了深入研究. 通常在光域生成微波信号的方式有三种: 1) 将两个相位锁定的独立光源进行拍频^[1-4]; 2) 利用双波长激光器的输出直接在光电探测器(PD)处拍频生成微波信号^[5-7]; 3) 利用电光调制器对连续光进行外调制生成多个谐波分量, 选取某两个频谱分量拍频产生微波信号^[8,9]. 与前两种方法相比, 第三种方法具有系统结构简单、稳定, 且生成的微波信号具有低相噪和宽带可调等优点.

在基于电光调制器生成多倍频微波信号的方案中, 通常需要抑制或选取某些频率分量. 常用的方法是采用光滤波器(如光纤布拉格光栅、F-P

腔)或者精确设定调制器的偏置电流或偏振态, 因而系统受到滤波器带宽或器件稳定性的影响限制了频率调谐范围. 几年来, 基于光纤中受激布里渊散射(SBS)效应的微波光子信息处理技术引起了人们的广泛关注. SBS是光纤中一种常见的非线性效应, 可工作于任意波长处, 且其产生的布里渊增益谱/损耗谱仅有几十MHz带宽, 因而利用SBS可精确的选取或抑制某一频谱分量. Yao首先利用SBS放大调制光的某一边带, 将放大的载波分量与载波拍频, 实现了宽带可调谐微波信号生成^[10]. 这种方案虽然能生成宽带可调谐的微波信号, 但需要多个光源, 而且抽运光的波长要精确调谐以放大所需频谱分量, 因而系统结构复杂. Chen等利用环形腔中的布里渊损耗谱抑制相位调制信号的载波而不影响 ± 1 阶边带, 得到了二倍频微波信号生成^[11]. 基于相同原理, Wei等进一步将载波、 ± 1 和 ± 2 阶边带同时抑制, 仅保留 ± 3 阶边带, 得到了6倍频可调谐微波信号生成^[12]. 该方案无需任何光

* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110184130003)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2682013CX056)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: dzheng@home.swjtu.edu.cn

滤波器即可实现频谱的滤除, 简化的系统结构, 但需要对电光调制器的调制指数和进入环形器的信号功率进行精确设置, 以保障产生SBS的频谱分量能得到充分的抑制, 而无需抑制的频谱分量不产生SBS.

本文提出了一种基于布里渊载波相移生成二倍频微波信号的新方案, 不同于以往利用SBS抑制某些频谱分量的方式, 这里利用的是布里渊增益谱/损耗谱内的相移特性. 通过对光强度调制信号的载波进行相移, 当相移量为 $\pi/2$ 时, ± 1 阶边带与载波拍频得到的基频分量正好抵消, 仅保留 $+1$ 阶与 -1 阶边带拍频获得的二倍频微波信号. 该方案所生成微波信号的质量仅与载波相移量有关, 而与其幅值无关, 因而大大降低了实现难度, 并且仍具有宽带可调谐的特性.

2 理论分析

基于SBS相移特性生成二倍频微波信号的原理图如图1所示. 输入连续光的角频率为 ω_c , 角频率为 ω_m 的微波信号加载到强度调制器的射频端口, 在小信号调制方式下, 忽略 ± 2 阶及以上边带, 则强度调制器的输出可表示为

$$E_{in} = A_0 \exp(j\omega_c t) + A_1 \exp[j(\omega_c - \omega_m)t]$$

$$+ A_1 \exp[j(\omega_c + \omega_m)t], \quad (1)$$

这里 A_0 和 A_1 分别是载波和 ± 1 阶边带的幅值. 如果直接在PD处拍频, 产生的微波信号可表示为

$$I_{in} \propto |E_1|^2 \propto 2A_0A_1 \cos(\omega_m t) + A_1^2 \cos(2\omega_m t). \quad (2)$$

可以看到, 生成的微波信号包含 ω_m 和 $2\omega_m$ 两个频率分量, 通常情况下基频分量远大于二倍频分量.

为抑制基频分量, 得到仅包含二倍频分量的微波信号, 本文利用布里渊增益谱/损耗谱内的强散射特性来改变光强度调制信号的载波相移量. 在单色抽运光下, 光纤中本征布里渊增益谱/损耗谱的表达式为^[13,14]

$$g(\omega) = \pm \frac{g_B I_0 L_{eff}}{1 - 2i \frac{\omega - (\omega_0 \mp \Omega_B)}{\Gamma_B}}, \quad (3)$$

这里 g_B 为布里渊峰值增益系数; $I_0 = P_0/A_{eff}$ 是抽运光的强度, 与抽运光功率 P_0 和光纤有效模场面积 A_{eff} 有关; ω_0 为抽运光的中心角频率; $L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$ 为抽运光和信号光相互作用的有效光纤长度, α 是光纤损耗, L 为光纤的物理长度; Ω_B 为布里渊频移量; Γ_B 为本征布里渊增益谱带宽.

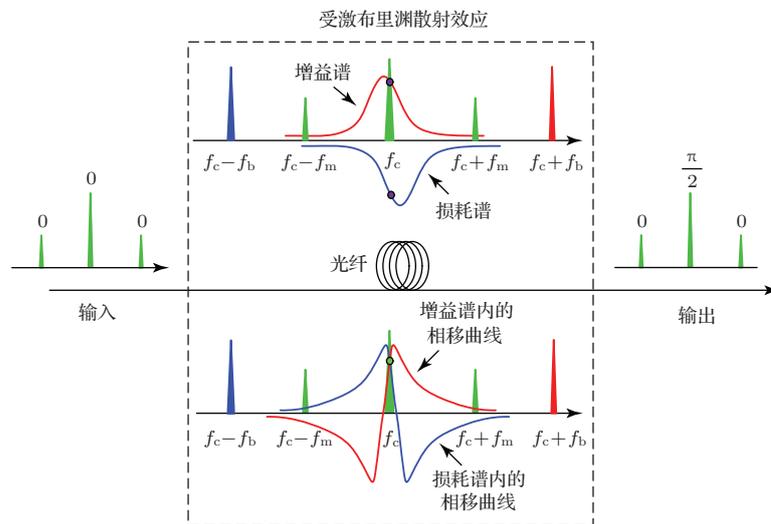


图1 基于SBS相移特性实现二倍频微波信号生成的原理图

为消除SBS对信号载波幅值的影响, 这里选取两个不同频率单色抽运光同时产生增益谱和损耗谱共同作用于信号载波处, 如图1所示. 当两抽运光与信号光载波的频差 f_b 与光纤布里渊频移量 Ω_B

略微不同时, 信号载波获得总增益量为零, 而相移量是单抽运光下的两倍^[15]. 当信号光的 ± 1 阶边带位于布里渊增益谱之外时, 则通过光纤后的信号光可表示为

$$E_{\text{out}} = A_0 \exp(j\omega_c t + \theta) + A_1 \exp[j(\omega_c - \omega_m)t] + A_1 \exp[j(\omega_c + \omega_m)t], \quad (4)$$

这里 θ 是 SBS 引入的相移量. 当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, 在 PD 处拍频得到的微波信号为

$$I_{\text{out}} \propto |E_{\text{out}}|^2 \propto A_1^2 \cos(2\omega_m t). \quad (5)$$

可以看到, 基频分量完全抑制, 只保留二倍频信号输出.

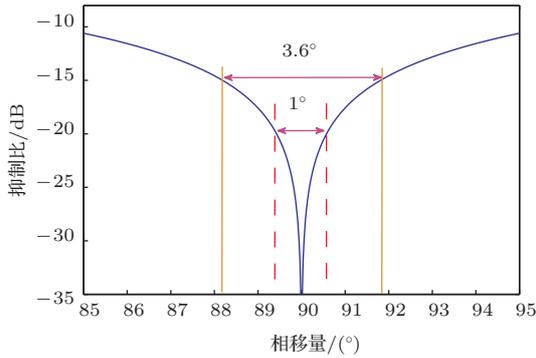


图2 生成微波信号的基频分量抑制比随载波相移量的变化

图2为拍频生成的基频分量抑制比随载波相移量的变化曲线, 这里以载波相移量为0时为参考点, 做了归一化处理. 可以看到, 载波相移量的波动范围在 3.6° 之内时, 可获得 15 dB 以上的幅值抑

制. 要想获得 20 dB 以上的抑制, 相移量的波动范围要小于 1° . 在文献 [15] 中已证明, 采用信号光和抽运光均来自同一光源的方法, 可有效抑制了光源波长漂移引起的相移量波动, 获得了 0° — 360° 范围内的精确相移量调谐. 本文在后面实验验证中将采用该方法.

3 实验验证

实验装置图如图3所示. 由于强度调制器存在直流偏置点漂移的问题, 这里采用偏振调制器 (PolM) 与检偏器组合实现等效强度调制的方法, 得到的调制信号具有良好的稳定性. 连续光源的输出首先被 3 dB 光耦合器分为两路信号. 一路为信号光, 经强度调制器生成双边带调制信号; 另一路为抽运光, 经强度调制器生成载波抑制双边带调制信号, 被掺饵光纤放大器 (EDFA) 放大后注入色散位移光纤中, 上下两个边带分别在信号光的载波处产生布里渊增益谱和损耗谱, 进而改变信号光载波的相移量. 为尽可能消除光纤中色散引起的不同边带获得的相移量差异, 这里选取色散位移光纤作为 SBS 介质. 载波相移后的信号光在 PD 处拍频, 产生二倍频微波信号.

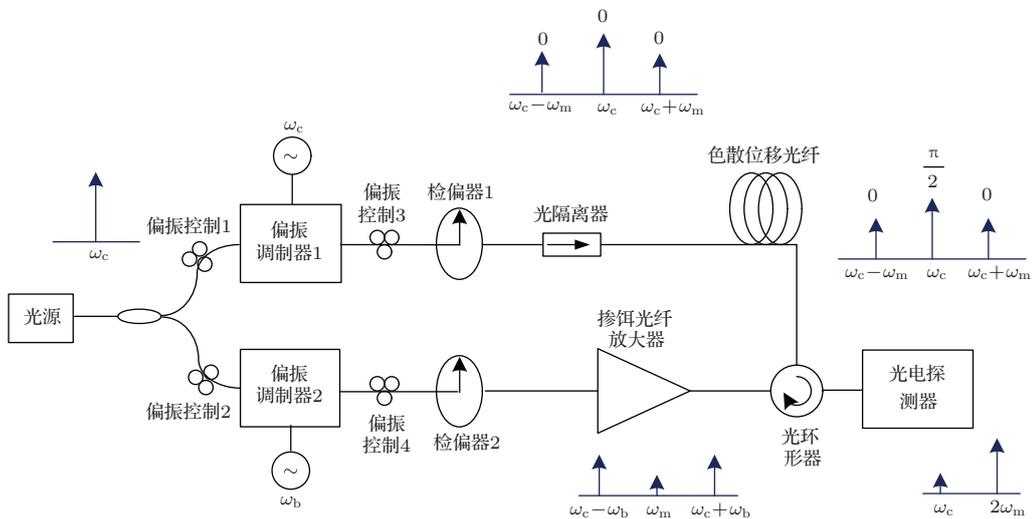


图3 实验装置图

实验中使用的色散位移光纤的长度为 4 km, 光纤有效模场面积 $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$, 本征布里渊增益谱带宽 $\Gamma_B/2\pi \approx 35 \text{ MHz}$, 布里渊峰值增益系数 $g_B = 1.25 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, 布里渊频移量为 $\Omega_B = 10.42 \text{ GHz}$. 改变信号光载波处相移量的方

式有两种: 1) 抽运光功率保持不变, 通过调节抽运光两个边带的间距使载波处的相移量发生改变; 2) 抽运光两个边带的间距一定, 信号光载波处相移量由注入抽运光的功率来控制. 在实际操作中, 为精确设定载波处的相移量, 我们采用第一种方式. 此

外, 需要指出的是, 布里渊增益谱/损耗谱内的相移曲线斜率与抽运光功率成正比, 在保证信号载波处能获得 $\pi/2$ 相移量的前提下, 使用较小的抽运光功率能降低对抽运光两边带间隔精度的要求, 实验中注入光纤中的抽运光功率固定为 10 dBm.

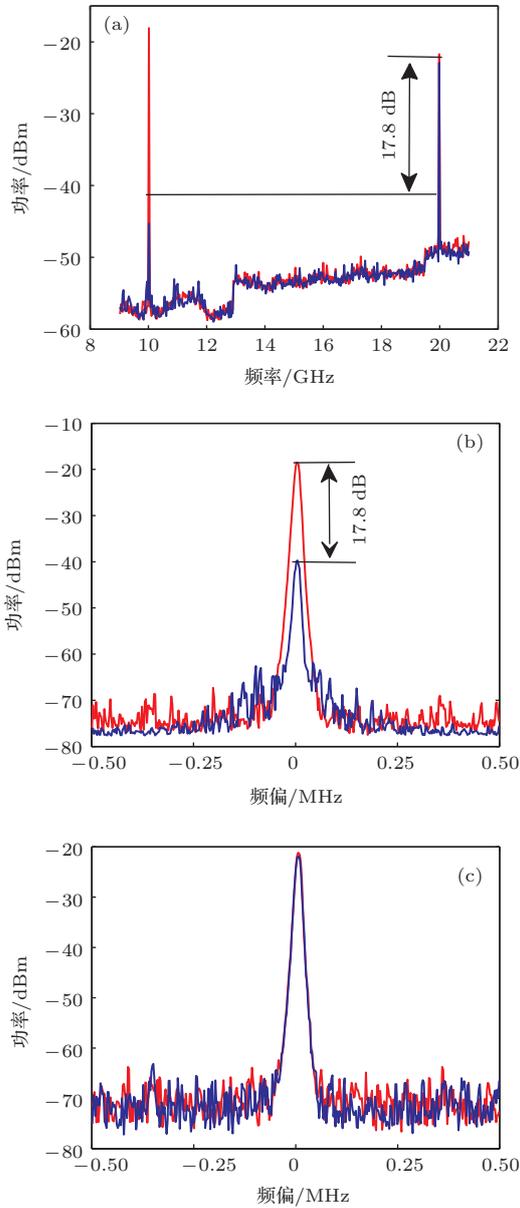


图4 (a) 有、无 SBS 载波相移下的输出微波信号频谱图; (b) 10 GHz 处放大的信号频谱图; (c) 20 GHz 处放大的信号频谱图

图 4 为信号光的调制频率为 10 GHz 时, 有、无 SBS 载波相移下的输出微波信号. 从图中可以看出, 当载波获得的相移量接近 $\pi/2$ 时, 基频分量可获得 21.2 dB 的抑制量, 同时对二倍频分量几乎没有影响, 二倍频与基频的功率差为 17.8 dB. 基频分量无法完全抑制的原因来自两个方面: 1) 实验所用

光源存在一定线宽, 不是理想的单色光. 从图 1 可以看到, 当信号载波获得的相移量为 $\pi/2$ 时, 偏离载波的频谱分量由于获得的相移量不是 $\pi/2$, 因而无法有效抑制. 2) 由于产生 SBS 效应的色散位移光纤较长且色散不为零, 信号光的 ± 1 阶边带在传输过程中不可避免引入不同的相移量, 使得两个边带与载波拍频产生的基频分量无法完全抵消. 为进一步抑制基频分量, 一方面可使用具有更窄线宽的光源, 另一方面是缩短产生 SBS 效应所需的光纤长度, 如使用高非线性光纤或环形腔结构, 减小光纤色散引起的 ± 1 阶边带相移量改变.

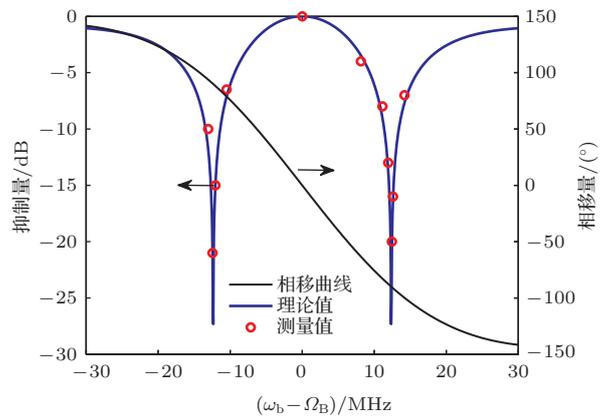


图5 载波处相移量和基频抑制量随抽运光调制频率偏离布里渊频移量的变化

图 5 为抽运光的调制频率偏离布里渊频移量时, 载波处相移量和基频抑制量的变化曲线, 可以看到实验测量结果与理论分析值符合很好, 两个最大抑制量点分别对应载波获得 $\pm(\pi/2)$ 的时刻. 由于信号光和抽运光来自同一光源, 因而系统的稳定性不受光源波长偏移的影响. 必须指出的是, 抽运光的两个边带除了在载波处产生布里渊增益谱和损耗谱外, 在 $\omega_c - \omega_b - \Omega_B$ 和 $\omega_c + \omega_b + \Omega_B$ 处还将分别产生增益谱和损耗谱, 因而限制了信号光的调制频率工作范围在 100 MHz—20 GHz, 生成二倍频微波信号可在 200 MHz—40 GHz 范围内连续可调. 为进一步提高频率调谐范围, 可利用其他抽运光来补偿 $\omega_c - \omega_b - \Omega_B$ 和 $\omega_c + \omega_b + \Omega_B$ 处的增益谱和损耗谱 [13].

为测试系统的稳定性, 图 6 中给出了基频和二倍频峰值功率在 1 h 内的变化曲线, 采样时间间隔为 5 min. 可以看出, 二倍频分量的峰值功率波动较小, 这得益于所使用光源具有良好的输出功率稳定性. 基频分量在 1 h 内的功率变化范围为 2.1 dB, 引起较大功率波动的主要原因是抽运光在进入色

散位移光纤前经EDFA放大,由于EDFA输出功率的波动使得信号载波处的相移量发生改变.此外,由于产生SBS的光纤并未封装,周围环境温度的变化引起了光纤中布里渊频移量的改变,进而改变信号载波获得的相移量.因此,使用高稳定性功率输出的EDFA并将光纤置于恒温环境中能减小基频分量的功率波动.

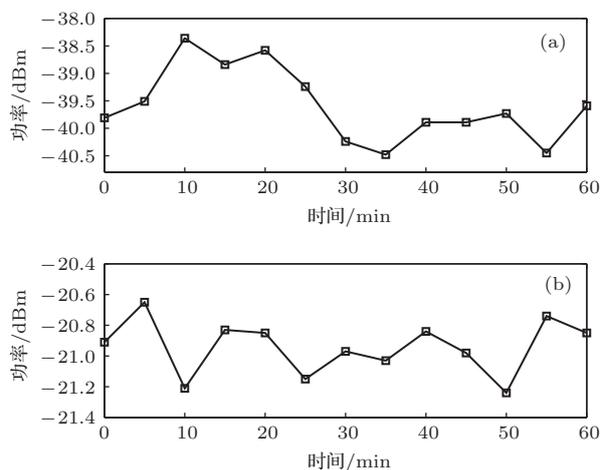


图6 基频(a)和二倍频(b)峰值功率随时间的变化曲线

4 结 论

本文利用SBS对强度调制光的载波进行相移,实现了宽带可调谐的二倍频微波信号生成.与传统基于光子技术的二倍频微波信号生成技术不同,本方案对基频分量的抑制量与载波的幅值无关,仅与其获得的相移量有关,因而既无需窄带且高稳定度的滤波器滤除载波,也无需精确调节电光调制器的偏置电流或偏振态以实现载波的有效抑制,简化了系统的操作难度.此外,如果用强度调制器生成奇

数阶边带抑制的调制信号,仅保留载波和 ± 2 阶边带,那么利用SBS载波相移技术可实现4倍频微波信号生成,进一步扩大频率调谐范围.

参考文献

- [1] Fan Z, Dagenais M 1997 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **45** 1296
- [2] Rideout H, Seregelyi J, Paquet S, Yao J P 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2344
- [3] Lin X D, Deng T, Xie Y Y, Wu J G, Chen J G, Wu Z M, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194212 (in Chinese) [林晓东, 邓涛, 解宜原, 吴加贵, 陈建国, 吴正茂, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 194212]
- [4] Niu S X, Wang Y C, He H C, Zhang M J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7241 (in Chinese) [牛生晓, 王云才, 贺虎成, 张明江 2009 物理学报 **58** 7241]
- [5] Xie H Y, Wang L, Zhao L J, Zhu H L, Wang W 2007 *Chin. Phys.* **16** 1459
- [6] Chen X, Yao J P, Deng Z 2005 *Opt. Lett.* **30** 2068
- [7] O'Reilly J J, Lane P M, Heidemann R, Hofstetter R 1992 *Electron. Lett.* **28** 2309
- [8] Li W Z, and Yao J P 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 24
- [9] Pan S L, Yao J P 2010 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **58** 1967
- [10] Yao X S 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 264
- [11] Chen B, Zheng S L, Chi H, Zhang X M, Jin X F 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 2057
- [12] Wei Z H, Wang R, Pu T, Fang Tao, Xiong J T 2012 *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology* **5** 5
- [13] Zheng D, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Jiang N, Ma Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1040 (in Chinese) [郑狄, 潘炜, 闫连山, 罗斌, 邹喜华, 江宁, 马雅男 2010 物理学报 **59** 1040]
- [14] Zheng D, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Wen K H, Jiang N 2010 *Chin. Phys. Lett.* **26** 124202
- [15] Loayssa A, Lahoz F J 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 208

Widely tunable frequency-doubling microwaves generated using Brillouin-assisted carrier phase shift*

Zheng Di[†] Pan Wei Yan Lian-Shan Luo Bin Zou Xi-Hua Liu Xin-Kai Yi An-Lin

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 26 January 2014; revised manuscript received 6 March 2014)

Abstract

An optically tunable frequency-doubling microwave generation technique based on stimulated Brillouin scattering (SBS) in optical fibers is proposed and experimentally demonstrated. Due to the strong dispersion characteristics in SBS, when a $\pi/2$ phase shift is imposed on the optical carrier of an amplitude-modulated signal by SBS, only a frequency-doubling microwave signal from the beating between the optical carrier and the ± 1 st sidebands is generated. Due to the inherent narrowband character of SBS and the phase shift being only imported on to the optical carrier while the sidebands are kept unchanged, the frequency-doubling with large frequency tunability is realized, the operational bandwidth is just limited by other optical device deployed. In addition, all the required optical signals and pumps can be generated from the same laser source, the influence from the wavelength drifting is eliminated, so the stability of the system is established.

Keywords: microwave generation, stimulated Brillouin scattering, microwave photonics

PACS: 42.72.Ai, 42.65.Es

DOI: [10.7498/aps.63.154214](https://doi.org/10.7498/aps.63.154214)

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110184130003), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. 2682013CX056).

[†] Corresponding author. E-mail: dzheng@home.swjtu.edu.cn