

文章编号: 1001-3806(2022)04-0573-06

基于半导体激光器窄线宽光子微波信号获取

蒋再富, 张定梅

(荆楚理工学院 数理学院, 荆门 448000)

摘要: 为了研究光注入半导体激光器(SL)产生的光子微波信号的性能,基于SL的速率方程和光纤布喇格光栅(FBG)滤波理论,采用数值仿真的方法进行了理论分析,得到了各种注入参量下的光谱、功率谱和线宽,并讨论了反馈参量对微波线宽的影响,考虑到光注入下产生的微波线宽较宽,进一步引入FBG光反馈窄化了微波信号的线宽。结果表明,当SL仅在光注入作用下时,通过改变注入参量,可实现微波频率连续可调谐和微波强度最大化;微波线宽随着反馈强度的增加逐渐变窄,通过适当调节反馈参量可将微波线宽压缩到10kHz以下。该研究结果可为半导体激光器在光子微波中的应用提供一定的理论参考。

关键词: 非线性光学;光子微波;光注入;光纤布喇格光栅;单周期

中图分类号: O437.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.04.022

Generation of narrow linewidth photonic microwave signal using semiconductor laser with optical feedback

JIANG Zaifu, ZHANG Dingmei

(Institute of Mathematics and Physics, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

Abstract: In order to study the performance of the photonic microwave signal generated by a semiconductor laser (SL) under optical injection, based on the rate equation of SL and the fiber Bragg grating (FBG) filter theory, the optical spectra, power spectra, and linewidth under different injection parameters were obtained by numerical simulation and theoretical analysis, and the effect of the feedback parameters on the microwave linewidth was also studied. Considering that the generated microwave signal has wide linewidth, a FBG optical feedback was further introduced to narrow the microwave linewidth. The results show that, for the SL subject to optical injection only, the microwave frequency can be continuously tuned and the microwave intensity can be maximized by changing the injection parameters; the microwave linewidth gradually decreases with the increase of feedback strength. Through properly adjusting the feedback parameters, the microwave linewidth can be compressed below 10kHz. The results can provide a theoretical reference for the application of semiconductor laser in the photonic microwave signals generation.

Key words: nonlinear optics; photonic microwave; optical injection; fiber Bragg grating; period one

引言

由于微波在无线通信网络、雷达、传感器和卫星通信中具有广泛的应用前景,它的产生、处理以及分发一直备受关注。与传统电子方法相比,光学方法产生的微波信号具有宽的带宽、连续可调的微波频率和能直

接光纤传输等优点^[1-6]。目前光子微波信号的产生可分为直接调制、外部调制、光学外差法、锁模、光电振荡和单周期(period one, P1)振荡法。其中, P1动力学可产生于外光注入下的半导体激光器(semiconductor laser, SL),其产生机制是当注入强度和频率失谐选择合适的值时,在SL内可生成两个重要频率成分,一个是激光器的腔共振频率,另一个是注入引起的再生频率成分,这两个频率成分拍频后可产生P1振荡^[1]。相比于其它的技术, P1动力学具有单边带的光谱结构、低成本、全光设备配置和宽频率调节范围等优点^[7-11]。

然而,由于SL中固有的自发辐射噪声的存在,会

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划资助项目(B2020194; B2020197)

作者简介:蒋再富(1981-),男,博士,副教授,现主要从事半导体激光器非线性动力学的研究。

E-mail: jiangzaifu23003@163.com

收稿日期:2021-04-30;收到修改稿日期:2021-06-01

使产生的光子微波信号具有较大的线宽,这将影响 P1 微波信号的实际应用^[12-14]。因此,如何降低 P1 微波线宽是一个亟待解决的问题。目前,关于 P1 微波线宽窄化的研究已经有一些报道^[15-20]。例如,JI 和 XUE 等人在一个光注入下的垂直腔面发射激光器中引入了两个光反馈环路来降低产生的 P1 微波信号的线宽,通过恰当调节两个环的反馈参量,微波线宽至少能降低两个数量级^[16-17]。SIMPSON 等人在一个光注入下的分布式反馈(distributed feedback,DFB)激光器中引入了极化旋转光反馈来稳定微波信号,研究表明,与直接光注入下测得的线宽相比,引入光反馈后微波信号的线宽被窄化了至少两个数量级^[18]。LO 等人研究了超短腔光反馈对光注入下 DFB 激光器产生的 P1 微波信号线宽的影响,发现引入光反馈后光子微波的线宽能降低 3 个数量级^[19]。ZHUANG 等人在一个光注入下的 DFB 激光器引入双光反馈来压缩微波线宽,发现通过优化反馈参量,微波线宽能从 8.2MHz 压缩至 50kHz^[20]。因此,引入光反馈是压缩 P1 微波线宽的一种有效方式。

光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating,FBG)是光纤传感器、光纤通信、光信息处理中重要的无源器件,其光栅周期沿轴向均匀分布并且折射率为常数。相关研究表明,在 SL 中引入 FBG 光反馈可产生宽带宽的混沌信号,并能有效消除混沌信号的时延特征^[21]。但是,关于引入 FBG 光反馈来降低微波线宽的研究却未见报道。FBG 中的分布式反馈光栅能过滤掉反馈光中的一部分频率成分,这将有利于 P1 动力学的自我锁定,进而降低线宽。本文将理论研究 FBG 光反馈对光注入下 DFB-SL 产生的 P1 微波信号线宽的影响。通过研究注入系数对微波频率和微波强度的影响来选择合适的注入参量,并引入 FBG 光反馈来压缩微波线宽,讨论反馈强度和反馈延迟时间对微波线宽的影响。

1 数值模型及描述

图 1 是利用半导体激光器产生窄线宽光子微波信号的示意图。其中,可调激光器(tunable laser,TL)的输出光经过分束器(beam splitter,BS)BS₁后注入到 SL 中,使 SL 进入 P1 振荡。SL 输出的光经过分束器 BS₂分成两部分,一部分光经 FBG 反馈后再回到 SL 来压缩线宽,一部分光输出后被探测。透镜 L₁和 L₂分别为准直和汇聚透镜。基于 SL 的 Lang-Kobayashi 模型并引入 FBG 光反馈后,描述基于 SL 的窄线宽光子微波信号产生的速率方程为^[21]:

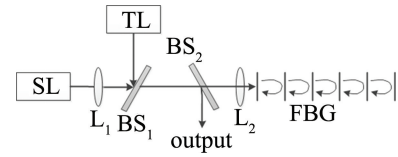


Fig. 1 Schematic diagram of narrow linewidth photonic microwave signal generation

$$\frac{da}{dt} = \frac{1 - ib}{2} \left[\frac{\gamma \rho n}{\sigma J} - \Gamma (|a|^2 - 1) \right] a + \xi \gamma a_0 \exp(-i2\pi\Delta\nu t) + \eta \gamma \exp(i\theta) [r(t) \times \exp(-i\Delta\Omega t)] * a(t - \tau) + F \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -(\sigma + \rho |a|^2)n -$$

$$\sigma J \left(1 - \frac{\Gamma}{\gamma} |a|^2 \right) (|a|^2 - 1) \quad (2)$$

$$r(\Omega) =$$

$$\frac{\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L)}{-\delta \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L) + i\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L)} \quad (3)$$

式中, a 为电场复振幅, n 为载流子数, a_0 为激光器自由运行时的电场强度, η 为滤波反馈强度, τ 为外腔反馈时间, Ω 表示角频率, $\Delta\Omega$ 为激光器频率与 FBG 中心频率的角频率失谐, θ 为相位变化, ξ 为注入强度, $\Delta\nu$ 为注入频率失谐, γ 为腔衰减速率, σ 为自发载流子弛豫速率, ρ 代表微分载流子弛豫速率, Γ 代表非线性载流子弛豫速率, b 是线宽增强因子, J 为归一化的电流, κ 为 FBG 的耦合系数, L 为 FBG 腔长, $r(t)$ 为 FBG 在时域中的响应, $r(\Omega)$ 为 FBG 在频域中的响应, $\delta = N\Omega/c$ 表示反向传播模式与 FBG 布喇格频率的相位失配, N 代表光纤折射率, c 表示光速。FBG 的带宽可由 $\kappa c/(\pi N)$ 得出, F 为噪声项,“*”表示卷积运算。参量的物理含义和取值请见表 1。

Table 1 Simulation parameters of the laser and FBG

parameters	value
cavity decay rate γ	$5.36 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$
spontaneous carrier relaxation rate σ	$5.96 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
differential carrier relaxation rate ρ	$7.53 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
nonlinear carrier relaxation rate Γ	$1.91 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$
linewidth enhancement factor b	3.2
normalized bias current J	1.222
coupling coefficient of FBG κ	200 m^{-1}
refractive index of optical fiber N	1.45
length of FBG L	20mm
velocity of light c	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
feedback time τ	2ns

值得一提的是,在上述速率方程推导的过程中, TL 和 SL 使用的复电场 $E_{TL}(t)$ 和 $E_{SL}(t)$ 分别为:

$$E_{TL}(t) = \sqrt{S_{TL}} \exp[-i\varphi_{TL}(t)] \quad (4)$$

$$E_{SL}(t) = \sqrt{S_{SL}} \exp[-i\varphi_{SL}(t)] \quad (5)$$

式中, S_{TL} 和 S_{SL} 分别表示 TL 和 SL 输出的光子数, $\varphi_{TL}(t)$ 和 $\varphi_{SL}(t)$ 分别表示 TL 和 SL 的相位, $\varphi_{TL}(t)$ 和 $\varphi_{SL}(t)$ 是与时间相关的函数, 由于 TL 工作在稳定态, 所以假设它的相位 $\varphi_{TL}(t)$ 为常数 0。尽管在 TL 的注入下, SL 的相位 $\varphi_{SL}(t)$ 随时间波动, 但是它的波动较小, 因此也假设为一常数。在这样的假设下两束激光的相位差在仿真过程中是保持恒定的^[22]。

为了量化微波线宽, 文中使用常用的微波频率随微波功率分布的标准方差进行计算, 具体的表达式为:

$$\Delta f = [\langle \nu^2 \rangle - \langle \nu \rangle^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \langle \nu \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu P(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) d\nu} \\ \langle \nu^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu^2 P(\nu) d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\nu) d\nu} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Δf 表示光子微波的线宽, ν 和 $P(\nu)$ 表示功率谱中的频率和相应的功率。

2 结果及讨论

2.1 光注入下 SL 的动力学

图 2 是半导体激光器 (SL) 在外部光注入下的分岔图。图中的点代表了 $\Delta\nu = 8\text{GHz}$ 时不同的反馈强度下 SL 输出的时间序列的极值。如图 2 所示, 当 ξ 从 0 增加到 0.012 时, SL 输出的时间序列有两个极值, 表明此时 SL 工作在单周期 (P_1) 振荡态^[7]; 当 ξ 从 0.012 增加到 0.038 时, 输出的时间序列有 4 个极值, 说明 SL 输出的动力学态为倍周期态; 当 ξ 位于 0.038 ~

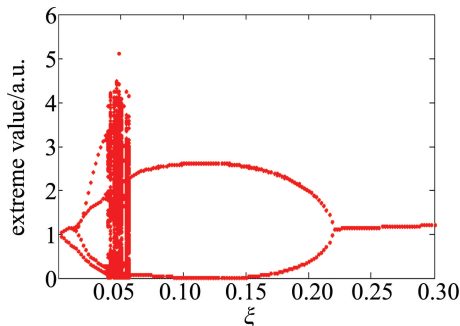


Fig. 2 Bifurcation diagram of the SL for $\Delta\nu = 8\text{GHz}$

0.058 之间时, 时间序列的极值增多并具有遍历性, 说明此时 SL 工作在混沌态; 继续增加 ξ , SL 将输出单周期态和注入锁定态。因此, 外部光注入 SL 会产生丰富的非线性动力学行为。接下来将研究利用 P_1 态来产生光子微波信号的性能。

2.2 微波频率和微波强度分布

首先研究仅在光注入下的 SL 产生的光子微波信号的性能, 图 3 中给出了频率失谐 $\Delta\nu = 10\text{GHz}$, $\xi = 0.14$ 时 SL 输出的时间序列、光谱和功率谱, 此时未引入 FBG 光反馈。如图 3a 所示, 时间序列呈现出峰值相等的规则振荡, 说明此时 SL 工作在 P_1 振荡态。图 3b 中给出了相应的光谱, 其中, f_c 为激光器的腔共振频率, f_i 为注入光在 SL 中的再生光学成分。 f_c 和 f_i 拍频后形成了光子微波的基础频率。值得注意的是, f_c 并不在光谱的零频率处, 这是由于光注入引起的腔共振频率红移效应造成的。图 3c 中给出了相应的频谱, f_0 为基础微波频率, 是光谱中腔共振信号和注入再生信号拍频的结果, 其值为 20.1GHz, 后面的峰值为高次谐波。另外, 从功率谱中可以看出, 此时的微波强度为 -66.7dB。光注入 SL 产生 P_1 振荡的物理实质是: 外部的注入光会与腔内的载流子产生相互作用, 进而在 SL 的腔内产生与外部光频率对应的再生光学信号, 这个信号的强弱与注入光的强度有关。由于 SL 腔内

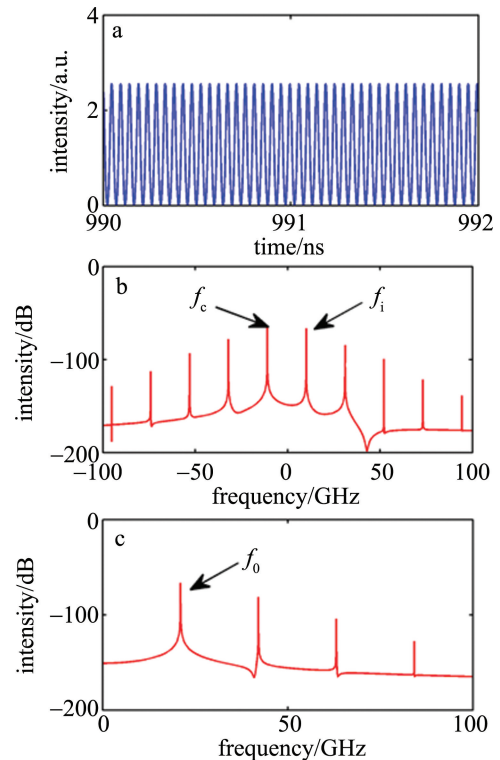


Fig. 3 Time series, optical spectra, and power spectra of the SL for $\Delta\nu = 10\text{GHz}$ and $\xi = 0.14$

自身存在振荡的光学成分,当注入参量选择合适时,腔内光学成分和再生光学成分会共存。而在频谱中观察到了P1振荡就是这两个光拍频的结果。相似的物理现象已经在实验中被观察到^[18]。

为了全面掌握微波频率 f_0 和微波强度 P_0 随注入参量的变化规律,图4中展示了 f_0 和 P_0 在注入强度 ξ 和频率失谐 $\Delta\nu$ 构成的参量空间中的分布情况。在这里, $\Delta\nu$ 的变化范围是0GHz~50GHz, ξ 的变化范围是0~0.5,图中白色部分代表了除P1以外其它的动力学态,黑色线标出了频率分布的等高线。从图4a中的等高线也可以看出,对于相对较小的频率失谐值,随着注入强度的增加,微波频率逐渐增加,这是由于逐渐增加的注入强度加剧了腔共振红移效应。但是对于较大的频率失谐值,随着频率失谐量的增加,微波频率将逐渐变得对注入强度不敏感。这是由于较大的频率失谐下,红移效应逐渐减弱造成的。图4b中给出了对应的微波强度 P_0 分布,对于某一个固定的频率失谐值,微波强度先是随着注入强度的增加逐渐增加,到达最大值之后在Hopf分岔边界处逐渐减小。这是由于在靠近Hopf分岔处,系统即将由P1动力学进入其它动力学态,这将毁坏P1动力学的稳定性,进而降低了微波强度。在下面的讨论中,注入系数被选择在最大微波强度处。

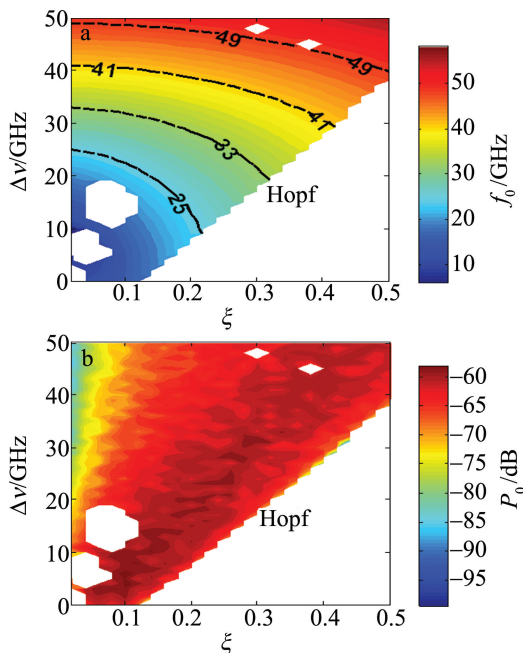


Fig. 4 Distributions of the microwave frequency f_0 and microwave intensity P_0 in the parameter space

2.3 微波线宽窄化

在引入FBG滤波光反馈之前,必须掌握FBG的

相关物理特性,FBG的频率响应函数如(3)式所示,但是频率响应函数是在频域中进行计算的,而SL的方程是关于时间的常微分方程,因此,必须把频率响应函数作逆向傅里叶变换变化到时域中进行计算。图5中给出了计算出的FBG反射谱。图中纵坐标为反射率,横坐标为相对于FBG中心频率的频率失谐。此时主瓣的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM) $f_{\text{FWHM}} = 13.2\text{GHz}$,旁瓣的重复频率为 $f_1 = 4.4\text{GHz}$ 。从图5中可以看出,在靠近主瓣中心的地方反射率近似等于1,远离主瓣中心后反射率迅速下降。因此,外部光进入FBG后会滤掉一部分频率成分。

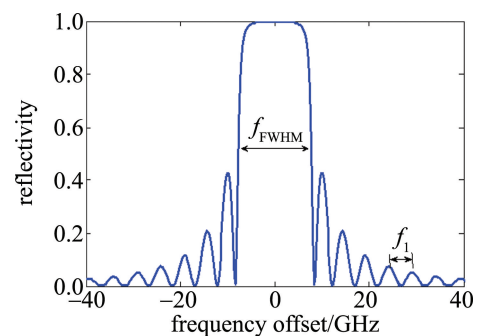


Fig. 5 FBG reflection spectrum

图6中给出不同参量下未引入FBG光反馈(第1行)和引入FBG光反馈(第2行)后SL激光器输出的功率谱。当 $(\Delta\nu, \xi, \eta, \Delta\Omega) = (10.0\text{GHz}, 0.14, 0.17, 10\text{GHz})$ 时,如图6a和图6d所示,在未引入FBG光反馈前,微波频率 $f_0 = 20.1\text{GHz}$,微波的线宽 $\Delta f = 17.1\text{MHz}$,线宽较宽。此时微波信号质量不高的原因是由于在仿真过程中加入了较强的高斯白噪声。较大的噪声将会使激光器腔内载流子数波动加剧,进而会提高输出光的相位噪声,最后使微波信号的线宽加宽,质量变差。引入FBG光反馈后,微波线宽被压缩到了 2.6kHz ,线宽被明显压缩。其线宽窄化的物理机制是P1动力学的自我锁定。具体而言,SL输出的P1微波信号进入FBG中进行滤波,选择合适的滤波频率失谐后,FBG将过滤掉与P1微波频率无关的频率成分,最后将这个经过频率选择后的信号输入到SL中,使SL中的P1振荡实现了自锁定,相位噪声降低,线宽明显变窄。同时也注意到,引入FBG光反馈后,微波频率增加到了 23.8GHz ,这是由于光反馈的作用导致的激光腔共振频率红移造成的。此外,引入光反馈后,在微波频率的两边出现了边带,这是光反馈引起的外腔模^[20]。当 $(\Delta\nu, \xi, \eta, \Delta\Omega) = (20.0\text{GHz}, 0.2, 0.17, 20\text{GHz})$ 时,如图6b和图6e所示,未引入光反馈前,微波线宽为 30.8MHz ,引入光反馈后微波线宽被压缩到

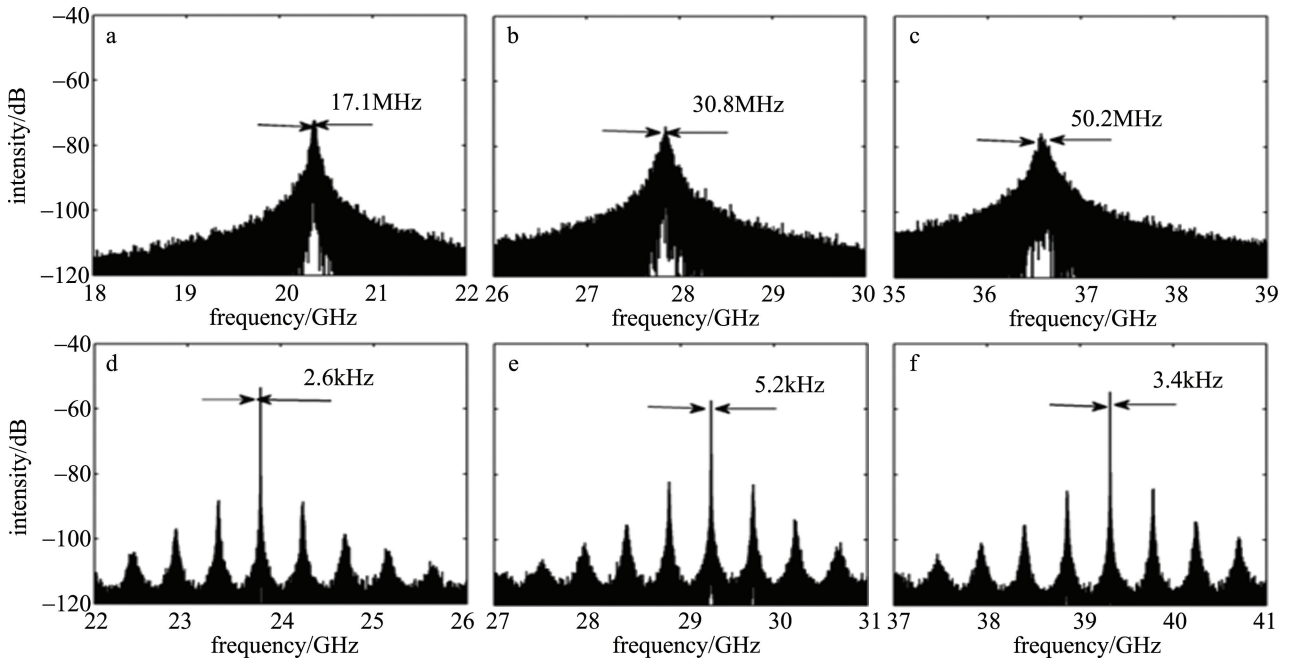


Fig. 6 Power spectra of different microwave frequencies

a, d— $\Delta\nu=10.0\text{GHz}, \xi=0.14, \eta=0.17, \Delta\Omega=10\text{GHz}$ b, e— $\Delta\nu=20.0\text{GHz}, \xi=0.20, \eta=0.17, \Delta\Omega=20\text{GHz}$ c, f— $\Delta\nu=30.0\text{GHz}, \xi=0.28, \eta=0.19, \Delta\Omega=30\text{GHz}$

5.2kHz。当 $(\Delta\nu, \xi, \eta, \Delta\Omega) = (30.0\text{GHz}, 0.28, 0.19, 30\text{GHz})$ 时,如图 6c 和图 6f 所示,仅在光注下的线宽为 50.2MHz,引入光反馈后,微波线宽被压缩到了 3.4kHz。因此,通过合适选择反馈参量,微波线宽能够被至少压缩 3 个数量级。说明 FBG 光反馈能有效压缩微波信号的线宽,改善微波信号质量。

图 7 中展示了不同频率失谐下微波线宽随反馈强度的变化。图中注入强度选择为最大微波强度处,反馈延迟时间固定为 2ns,纵坐标为对数坐标。当参量 $(\Delta\nu, \xi, \Delta\Omega) = (10\text{GHz}, 0.14, 10\text{GHz})$ 时,如图中圆圈所示,在未引入光反馈的情况下微波线宽为 17.1MHz,线宽较宽。引入光反馈后,当反馈强度由 0 逐渐增加到 0.05 时,线宽逐渐变小,这是由逐渐增加的自注入锁定效应引起的,进一步增加反馈强度到

0.2,线宽继续下降并伴随着剧烈抖动,当 $\eta=0.17$ 时,线宽取最小值为 2.6kHz;当 $(\Delta\nu, \xi, \Delta\Omega) = (20\text{GHz}, 0.17, 20\text{GHz})$ 和 $(30\text{GHz}, 0.28, 30\text{GHz})$ 时,如图中的圆圈和三角所示,线宽的变化趋势与 $\Delta\nu=10\text{GHz}$ 时相同,当 η 分别等于 0.17 和 0.19 时,线宽分最小值为 5.2kHz 和 3.4kHz。从图 7 中可以看出,在各种频率失谐下,FBG 光反馈均能有效压缩微波线宽。

3 结 论

数值研究了 FBG 滤波光反馈对光注入半导体激光器 (SL) 产生的光子微波信号的线宽的影响。首先讨论了注入参量对微波频率和微波强度的影响,发现当固定频率失谐时,微波频率随着注入强度的增加逐渐增加,微波强度随着注入强度先增加再逐渐减小。微波频率具有较大的调节范围,通过调节注入强度可以优化微波强度。此外,通过计算发现,由光注入产生的微波信号的线宽较宽,所以引入 FBG 滤波光反馈来压缩微波线宽。研究发现,当反馈时间固定时,微波线宽随着反馈强度的增加逐渐减小,并且通过优化反馈强度,微波线宽能够至少降低 3 个数量级。本研究为基于 SL 的窄线宽的光子微波信号的获取提供了一定的理论支持。

参 考 文 献

[1] ZHANG D M. Research on high quality chaotic signal acquisition

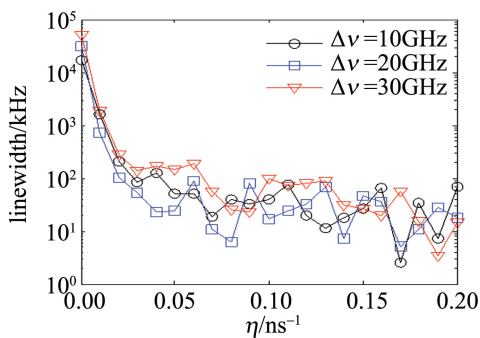


Fig. 7 Microwave linewidth as a function of feedback intensity under different frequency detuning

- based on mutual coupled ring laser[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(4): 466-470 (in Chinese).
- [2] ZHANG D M. Study on optical feedback dynamics based on semiconductor ring lasers[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6): 789-794 (in Chinese).
- [3] QI X Q, LIU J M. Photonic microwave applications of the dynamics of semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1198-1211.
- [4] CHAN S C, LIU J M. Microwave frequency division and multiplication using an optically injected semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(9): 1142-1147.
- [5] YAO J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [6] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [7] WIECZOREK S, SIMPSON T B, KRAUSKOPF B, *et al.* Bifurcation transitions in an optically injected diode laser: Theory and experiment[J]. *Optics Communications*, 2003, 215(1): 125-134.
- [8] HURTADO A, HENNING I D, ADAMS M J, *et al.* Generation of tunable millimeter-wave and THz signals with an optically injected quantum dot distributed feedback laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 5900107.
- [9] WANG C, RAGHUNATHAN R, SCHIRES K, *et al.* Optically injected InAs/GaAs quantum dot laser for tunable photonic microwave generation[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1153-1156.
- [10] PEREZ P, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Photonic generation of microwave signals using a single mode VCSEL subject to double-beam orthogonal optical injection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 5500614.
- [11] LIN H, OURARI S, HUANG T, *et al.* Photonic microwave generation in multimode VCSELs subject to orthogonal optical injection[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2017, B34(11): 2381-2389.
- [12] POCHET M, LOCKE T, USECHAK N G. Generation and modulation of a millimeter-wave subcarrier on an optical frequency generated via optical injection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1881-1891.
- [13] CHENG C H, LEE C W, LIN T W, *et al.* Double-frequency laser Doppler velocimeter for speckle noise reduction and coherence enhancement[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20255-20265.
- [14] ZHUANG J P, CHAN S C. Phase noise characteristics of microwave signals generated by semiconductor laser dynamics[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2777-2797.
- [15] SIMPSON T B, DOFT F. Double-locked laser diode for microwave photonics applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(11): 1476-1478.
- [16] JI S K, XUE C P, VALLE A, *et al.* Stabilization of photonic microwave generation in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical injection and feedback[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4347-4353.
- [17] XUE C P, CHANG G D, FAN Y L, *et al.* Characteristics of microwave photonic signal generation using vertical-cavity surface-emitting lasers with optical injection and feedback[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2020, B 37(5): 1394-1400.
- [18] SIMPSON T B, LIU J M, ALMULLA M, *et al.* Linewidth sharpening via polarization rotated feedback in optically injected semiconductor laser oscillators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(14): 1500807.
- [19] LO K H, HWANG S K, DONATI S. Numerical study of ultrashort-optical-feedback enhanced photonic microwave generation using optically injected semiconductor lasers at period-one nonlinear dynamics[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31595-31611.
- [20] ZHUANG J P, CHAN S C. Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser dynamics with optical feedback stabilization[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 344-346.
- [21] LI S S, CHAN S C. Chaotic Time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 1800812.
- [22] OHTSUBO J. *Semiconductor lasers (stability, instability and chaos)* [M]. 3rd ed. New York, USA: Springer, 2005: 170-172.