

文章编号:1001-5078(2024)11-1667-07

· 激光器技术 ·

## 基于 WGM 微腔自注入锁定压窄线宽技术研究

张军<sup>1,2</sup>, 康朝烽<sup>1,2</sup>, 杨煜<sup>2</sup>, 陈天赐<sup>1,2</sup>, 杨彬彬<sup>1,2</sup>, 王克逸<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系 光电信息技术实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**回音壁模式(whispering gallery mode, WGM)微腔具有超高 Q 值和极小的模式体积, 并且还存在着一种弱后向瑞利散射。利用 WGM 微腔的该反馈机制, 可以实现激光线宽几个数量级的压缩, 基于此设计了一种窄线宽激光器。利用数值仿真分析了自注入锁定过程中的光学行为, 具体而言分析了系统中相位、失谐、后向散射、耦合效率的变化对系统性能的影响。同时并使用半导体激光器进行了验证实验, 半导体激光器中心波长为 1552.126 nm, 实验中将 7 MHz 线宽激光输出压窄至 500 kHz。基于该方案实现的窄线宽激光器具有轻量化、便捷性高、性能稳定等诸多优点。因而, 这种窄线宽激光器在激光干涉测量、激光陀螺、激光测距等领域具有潜在的应用价值。

**关键词:**窄线宽; 回音壁模式微腔; 瑞利散射; 自注入。

**中图分类号:**TN248; O436 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.003

## Research on microcavity self-injection locking narrow linewidth technology based on WGM

ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, KANG Chao-feng<sup>1,2</sup>, YANG Yu<sup>2</sup>, CHEN Tian-ci<sup>1,2</sup>, YANG Bin-bin<sup>1,2</sup>, WANG Ke-yi<sup>1,2</sup>

(1. Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Whispering Gallery Mode (WGM) microcavities exhibit ultrahigh Q factors and extremely small mode volumes, along with weak backward Rayleigh scattering. By utilizing this feedback mechanism in WGM microcavities, a laser linewidth compression by several orders of magnitude can be achieved, based on which a narrow linewidth laser is designed. Numerical simulations were used to analyze the optical behavior during the self-injection locking process, specifically the effects of changes in phase, detuning, backscattering and coupling efficiency on the system performance. Additionally, experimental validation is performed using a semiconductor laser with a central wavelength of 1552.126 nm, and the 7 MHz linewidth laser output was narrowed to 500 kHz in the experiments. The narrow linewidth laser achieved through this approach has many advantages such as lightweight, high convenience, and stable performance. As a result, this narrow linewidth laser holds potential applications in areas such as laser interferometry, laser gyroscopes, laser ranging, and other related fields.

**Keywords:** narrow linewidth; whispering gallery mode microcavity; Rayleigh scattering; self-injection

**基金项目:**安徽省自然科学基金项目(No. 2030808QF208)资助。

**作者简介:**张军(1998-),男,硕士研究生,研究方向为 WGM 微腔,窄线宽激光器与嵌入式系统技术。E-mail: zj1016406325@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:**王克逸(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电技术、微光学、信息光学技术研究。E-mail: kywang@ustc.edu.cn

**收稿日期:**2024-02-27; **修订日期:**2024-04-29

## 1 引言

随着光学领域的不断发展,具有窄线宽和低噪声的激光光源对于很多激光应用至关重要,例如相干光通信<sup>[1]</sup>、光谱学<sup>[2]</sup>、激光雷达<sup>[3]</sup>、量子光学<sup>[4]</sup>等领域。最先进的芯片级半导体激光二极管发射波长覆盖了紫外到中红外波段,但是它会不可避免的产生频率波动,目前已经证明了很多种稳定二极管激光频率的方法,其中 Pound-Drever-Hall<sup>[5]</sup> (PDH) 技术是传统且广泛使用的,其需要可调谐激光器、复杂的光学调制、电子反馈电路以及稳定的光学频率参考,因此系统较为简易的光学自注入<sup>[6]</sup>方案近些年备受关注。

自注入锁定技术在过去三十年中得到了广泛的研究,最初方案是在在 FP (Fabry-Pérot) 激光器的输出端添加一个部分透明的反射镜可以降低激光噪声,但是这种方案存在局限性,由于光学反馈过强会引入动态不稳定性,后续通过增加频率选择性的反馈元件就可以减少不稳定性,例如 Littrow 和 Littman<sup>[7]</sup> 中的衍射光栅,该方式仍然受光栅品质的影响,通常激光线宽在  $1 \times 10^5$  Hz 以下。而后,将激光产生自注入到外部高品质因子谐振器,利用光学弱反馈,实现快速频率选择解决了这一问题。

回音壁模式微腔 (Whispering Gallery Mode, WGM)<sup>[8]</sup> 是一种性能优越且灵活的光学器件,其基本原理是由于折射率差在高折射率材料内表面全反射,光线经过一个圆周的全反射回到原点,从而不断增强光场能量,相比于 FP 腔受反射镜镀膜工艺的限制,WGM 微腔基本仅受材料本身的损耗,因此其具备的超高品质因子(Q 值)、高能量密度,是许多应用研究理想的光学平台。微腔结构通过其特殊的光学性质在操纵和锁定光场中发挥着关键作用,利用其超高 Q 值与半导体激光结合,采用自注入锁定技术,形成一种有效的控制光学腔模式的方法,为微腔系统的稳定性和性能提供了新的可能性。微腔中的自注入锁定是指当微腔中的光场经过一定的光学路径,由于微腔内部存在弱后向瑞利散射,部分光重新注入到激光腔中,从而形成一种稳定的自锁定状态。这种技术在调制光源的频率和相位方面具有巨大的潜力,为光学通信、激光器技术和传感器应用等领域提供了全新的解决方案。

本研究聚焦于一种基于 WGM 微腔的自注入锁定技术,通过该系统稳态解的理论仿真确定了该系统对半导体激光器线宽提升的机制,并通过对系统中各个参量进行分析,根据透射谱找到最佳工作状态。实验上,利用基于 Q 值为  $1 \times 10^7$  的  $\text{CaF}_2$  晶体微腔搭建了耦合系统,并通过半导体激光器实现自注入锁定状态,并在理论指导下找到最优工作状态,实现了实现了兆赫兹级别 DFB 激光器 C 波段线宽的有效压窄一个量级以上。

## 2 理论分析

自注入锁定效应的示意图如图 1 所示,其中由泵浦光源发射的激光束共振耦合到高 Q 值 WGM 微腔,由于微腔内部存在弱后向瑞利散射,部分激光辐射被共振反向散射至激光腔内,可以将激光频率锁定在 WGM 微腔的共振频率上,实现频率的稳定与线宽的压缩。

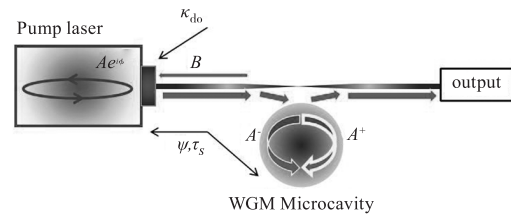


图 1 自注入锁定原理图

Fig. 1 Self-injection locking schematic

该系统可以用非线性速率方程<sup>[9]</sup>描述:

$$\dot{A} + \left( \frac{\kappa_{LC}}{2} - \frac{g}{2}(1 + i\alpha_g) - i(\omega - \omega_{LC}) \right) A = \kappa_{do} B \quad (1)$$

式中,  $\dot{A}$  激光腔内缓变的光场复振幅;  $\kappa_{LC}$  和  $\omega_{LC}$  (Laser Cavity, LC) 分别是激光腔损耗率和本征频率;  $g$  是激光增益;  $\alpha_g$  是激光介质的亨利因子<sup>[10]</sup>;  $\omega$  是输出激光的频率;  $\kappa_{do}$  是泵浦光源输出的耦合效率;  $B$  是反射回激光腔的光场复振幅;  $A^+$  和  $A^-$  分别是微腔内前向和后向波的复振幅。

非线性速率方程有助于理解自注入锁定过程中的动力学行为,但是在实际 WGM 微腔自注入系统中很难通过非线性速率方程去分析系统中各个参数的影响。非线性速率方程的解析解为<sup>[9]</sup>:

$$\xi = \zeta + \kappa_{do} \frac{4\eta\beta}{\kappa_m} \frac{2\zeta \cos \bar{\Psi} + (1 + \beta^2 - \zeta^2) \sin \bar{\Psi}}{(1 + \beta^2 - \zeta^2)^2 + 4\zeta^2} \quad (2)$$

$$\bar{\Psi} = \psi + \frac{\kappa_m \tau_s}{2} \zeta \tag{3}$$

式中,  $\xi$  是泵浦激光光源与微腔共振频率之间的归一化失谐;  $\zeta$  是自注入系统输出光源的归一化失谐;  $\eta$  是微腔与耦合器之间的耦合效率,  $\beta$  是微腔自身产生后向瑞利散射系数;  $\kappa_m$  是耦合系统总损耗(微腔的本征损耗与耦合损耗);  $\psi$  是锁定相位;  $\tau_s$  是反馈光往返时间。

将方程(2)、(3)根据  $\xi$ - $\zeta$  关系转化为图 2, 可以清楚地了解基于 WGM 的激光注入锁定激光输出频率和种子光源频率以及微腔谐振频率这三者之间的关系, 图中虚线为无自注入系统中半导体激光器扫频关系, 输出激光频率与半导体激光器输出频率相等, 因此呈线性关系, 实线为输出激光频率  $\zeta$  与种子光源频率  $\xi$  之间的关系, 当激光光源落入到自注入带宽(点划线中间部分)里的时候, 种子光源激光频率的变化  $\xi$  转换成激光系统输出频率  $\zeta$  的小范围变化, 从而实现线宽的有效压窄。

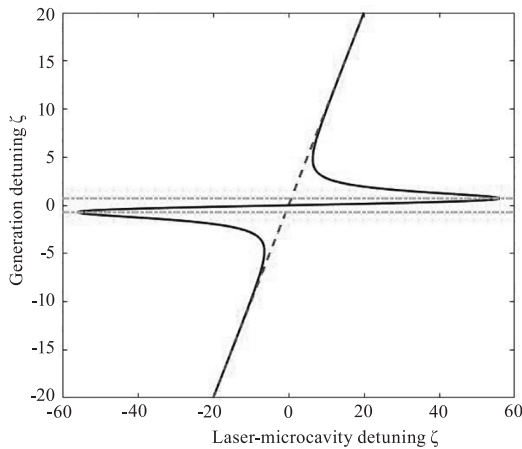


图 2 自注入系统分析解  $\zeta$ - $\xi$  调谐曲线

Fig. 2 Self-injection system analysis solution about  $\zeta$ - $\xi$  curve

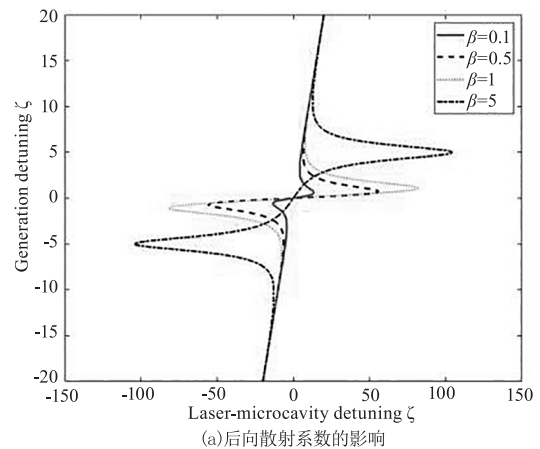
该系统线宽压缩系数方程为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\Delta w_{\text{output}}}{\Delta w_{\text{input}}} \approx \frac{Q_0}{Q_c} \frac{1}{64\eta^2\beta^2(1 + \alpha_g^2)} \tag{4}$$

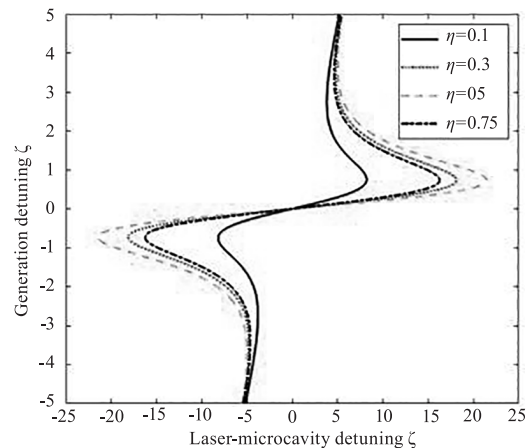
式中,  $\Delta w_{\text{output}}$  是自注入系统产生的激光线宽;  $\Delta w_{\text{input}}$  是自由运转种子光源的线宽;  $Q_0$  是种子光源激光器腔体品质因子;  $Q_c$  是微腔的品质因子。对于半导体激光腔体  $Q_0$  约为  $1 \times 10^5$ , 利用一个  $Q_c$  约为  $1 \times 10^6$  的 WGM 微腔, 可以实现激光线宽两个数量级的提升。

该系统中存在的主要的变量分别是激光与微腔之间的失谐  $\xi$ 、耦合效率  $\eta$ 、后向散射系数  $\beta$ 、锁定

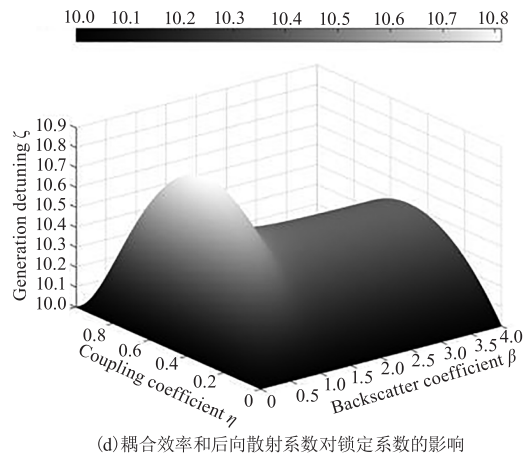
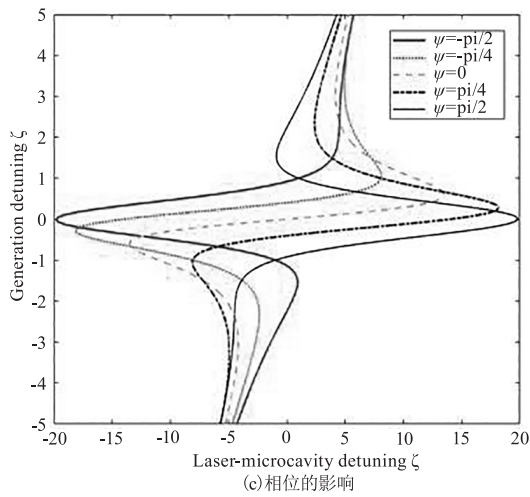
相位  $\psi$ , 我们依次对于这四个参量进行分析。如图 3(a) 所示, 后向散射系数  $\beta$  过大会产生锁定带宽的展宽与分裂, 这不利于自注入锁定的效果, 因此实验中不需要过大的后向散射系数, 这个参数往往和微腔自身内部存在的缺陷相关。如图 3(b) 所示, 耦合状态从欠耦合 ( $\eta < 0.5$ )、临界耦合 ( $\eta = 0.5$ ) 和过耦合 ( $\eta > 0.5$ ) 过程的调谐曲线区别并不大, 但临界耦合的锁定带宽更窄, 该参数是由耦合系统中耦合器件与微腔之间的耦合距离决定, 因此在实验过程中我们需要调节耦合状态为临界耦合。如图 3(c) 所示, 相位  $\psi \neq 0$  时会引入新的极值和多稳态区域, 会导致频率跳跃, 该参数与半导体激光器到微腔之间的距离有关, 确保相位  $\psi = 0$ 。在此基础上引入了自注入稳定系数  $L = (\partial\xi/\partial\zeta)_{\text{max}}$ , 该值直接反映了锁定带宽的比值, 通过对耦合效率  $\eta$ 、后向散射系数  $\beta$  和自注入稳定系数  $L$  进行三参数分析, 如图 3(d), 可以得到耦合效率  $\eta$  和后向散射系数  $\beta$  对于压窄效果最优点在  $\eta = 0.5$  且  $\beta = 1/\sqrt{3}$  时。



(a) 后向散射系数的影响



(b) 耦合效率的影响



(d) 耦合效率和后向散射系数对锁定系数的影响

图 3 自注入锁定失谐曲线分析图

Fig. 3 Self-injection locking detuning curve analysis plot

但是在实验过程中我们无法直接获得失谐曲线,在实际的耦合系统中更多的是通过透射谱对系统进行分析与测量,因此,可以通过透射谱去确定自注入系统所处状态,由前面的理论分析确保系统是在临界耦合,合适的后向散射系数以及相位匹配的状态。

这里给出透射谱的理论公式为<sup>[12]</sup>:

$$B_i = B_{in} \left( 1 - 2\eta \frac{1 - i\zeta}{(1 - i\zeta)^2 + \beta^2} \right) \quad (5)$$

式中,  $B_i$  代表自注入锁定后透射谱信号幅度;  $B_{in}$  代表自注入锁定前输出系统信号幅度。

根据透射谱的仿真结果所示(如图 4 所示,图中虚线为自注入锁定的透射谱带宽,实线是扫频过程中透射谱光电流的变化),当对激光进行扫频时,会掉进自注入锁定的带宽内,此时光透射功率会发生变化,当失谐量超出了带宽范围会直接回到原光电流值,相比于传统微腔耦合系统中

存在的洛伦兹线形,透射谱其实也更好的证明了一个宽的调谐范围内,微腔任然可以达到共振,此时输出激光频率仍然为微腔共振频率,从而降低种子光源的频率噪声。同时在临界耦合所处透射谱耦合深度最深,且在后向散射系数  $\beta = 1/\sqrt{3}$  与零相位差时透射谱是呈现矩形,避免了尖锐状,而尖锐状的透射谱是不利于自注入锁定的,因此我们在实验中需要控制耦合器到微腔之间的耦合距离、半导体激光器到微腔之间的距离以及选择合适的微腔使得透射谱处在矩形且深度较深的区域。

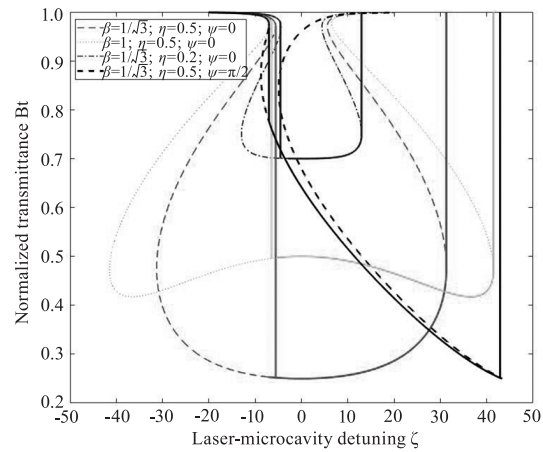


图 4 自注入锁定透射谱分析图

Fig. 4 Self-injection locked transmission spectrum plot

### 3 实验结果

本文中,利用实验室的超光滑表面机械磨抛技术制备了高 Q 值的  $\text{CaF}_2$  晶体 WGM 微腔,通过自注入锁定系统实现对种子光源的线宽压窄。首先使用半高全宽法测量光学微腔的品质因子,根据下面的公式计算:

$$Q \approx \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (6)$$

其中,  $\lambda_0$  是谐振中心波长;  $\Delta\lambda$  是谐振峰半高全宽处的波长宽度。

如图 5(a),为了实现微腔谐振的有效激发,我们采用热拉法<sup>[13]</sup>制备了锥腰仅为  $2 \mu\text{m}$  的锥光纤,将泵浦光源耦合到微腔中。采用了如图 5(b)所示的系统,信号发生器(AFG)产生 20 Hz 三角波信号对可调谐激光器(TLB6700)进行频率调谐,经过光纤锥耦合到微腔中,再通过光隔离器到高速光电二极管(PD)收集透射谱电压,然后在示波器(OSC)上显示,最后通过 PC 端对微腔的 Q 值进行表征。图 6

是通过该耦合系统的透射谱,对微腔透射谱进行洛伦兹拟合并测定 Q 值约为  $1.2 \times 10^7$ 。

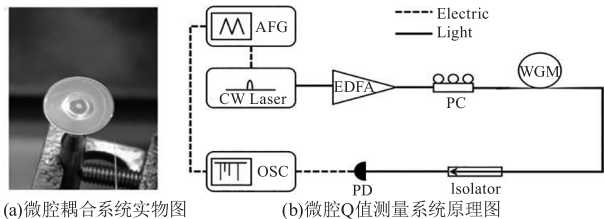
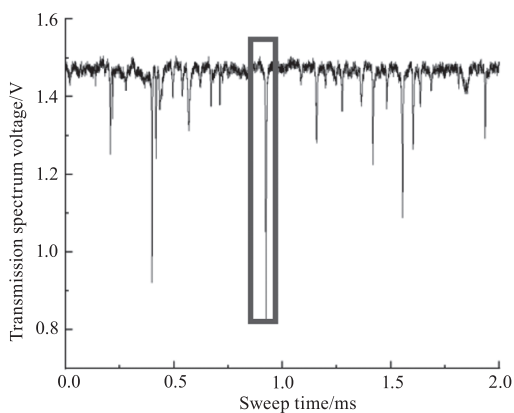
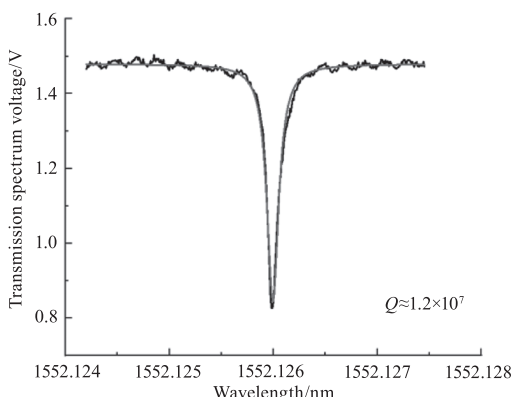


图 5 微腔耦合与测试系统

Fig. 5 Microcavity coupling and testing system



(a)CaF<sub>2</sub>晶体微腔透射谱



(b)Q值测量结果

图 6 晶体微腔耦合测试系统结果

Fig. 6 Crystal microcavity coupling test system results

如图 7 所示,搭建了自注入锁定系统,利用无隔离半导体激光光源,并采用温控与驱动实现种子光源的稳定输出与调谐,然后通过微腔耦合系统实现了微腔中模式的激发,由于谐振导致的微腔内部存在弱后向瑞利散射,部分光又重新注入到半导体激光器内部,有效的实现了 DFB 光源的线宽压窄。

为了实时监控输出光源的线宽变化,利用非零延时自外差法,将一路信号经过 30 km 延时光纤再与原光信号进行拍频,另一路信号通过电光相位调

制器(Electro-Optic Modulator, EOM)将光信号频率移至高频部分,从而减小环境中低频噪声对测量的影响<sup>[14]</sup>,再通过分析光电探测器上干涉信号频谱实现线宽的实时监控,这里我们获得的频谱仪(ESA)信号同样是呈现洛伦兹分布的,且半高全宽为测量激光线宽的二倍。同时,将信号分别通过光谱仪(OSA)和示波器(OSC)对输出光信号的透射谱与光谱进行实时监控。

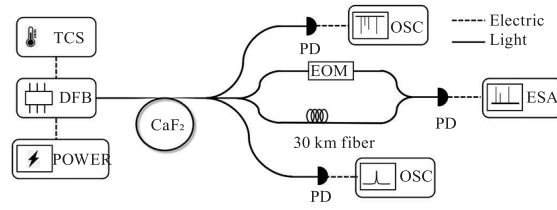
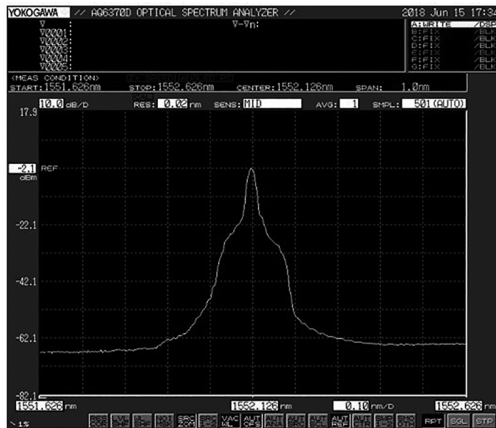


图 7 利用高 Q 值晶体微腔自注入锁定系统原理图

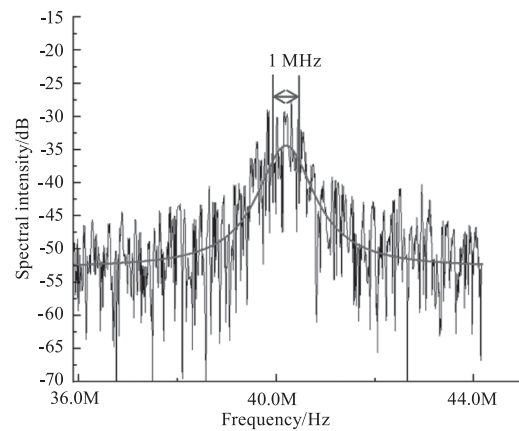
Fig. 7 Schematic diagram of a self-injection locking system using a high-Q crystal microcavity

通过三维平移台调节微腔与光纤锥的耦合位置与距离,位于光纤锥较细的位置耦合模式较多,因此我们并没有选择光纤锥锥腰处,多的模式是不利于自注入锁定的,选择由光纤向锥腰过渡区域模式较少,通过调节距离使得透射谱谐振 deep 深度最深。通过对半导体激光器施加峰值为 2.5 ~ 3 V 的三角波信号进行扫频,泵浦激光的波长,找到泵浦波长位置,获得了与理论分析相似的透射谱结果。

如图 8(a)所示,是通过该系统后输出激光在光谱仪(YOKOGAWA AQ6370D)上获取的光谱图,中心波长位于 1552.126 nm,光谱图的分辨率有限,虽然其存在光谱展宽,但并不是实际光学系统输出线宽,因此需要线宽测量环路进行测量。如图 8(b)所示,是利用无隔离半导体激光扫频得到的透射谱信号,很好地与图 4 中自注入锁定透射谱仿真图相对应,图中信号④是原本较窄的洛伦兹线形的透射谱转变为图中其他三种展宽后的透射谱图像,可以通过判断透射谱信号分析当前系统所处状态,图中信号③透射谱是理想状态,相比于信号①耦合深度较深,相比于信号②具备矩形的透射谱形状,说明在该状态下耦合状态、相位均合适,这也很好的证明了在泵浦光源频率波动时,由于自注入效应,任然可以实现输出波长在微腔谐振波长上,有效降低了频率噪声,减少线宽。



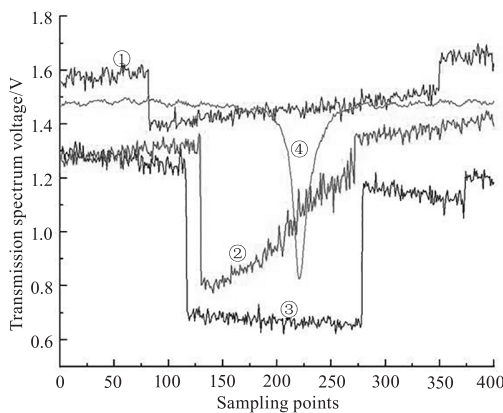
(a) 自注入锁定后输出激光光谱图



(b) 自注入锁定后系统输出激光线宽

图 9 自注入锁定前后线宽压窄对比图

Fig. 9 Comparison of linewidth narrowing before and after self-injection locking

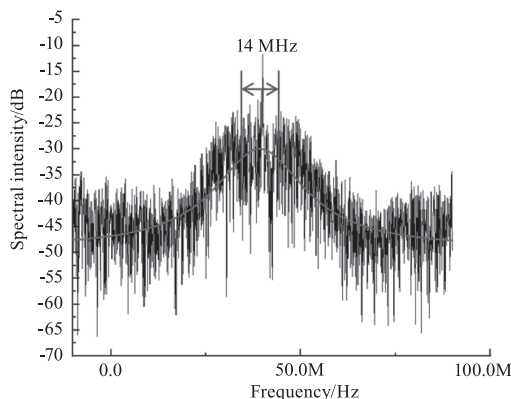


(b) 自注入锁定后透射谱变化图

图 8 自注入锁定光谱与透射谱结果

Fig. 8 Self-injection locks spectral and transmission spectral results

通过线宽测量环路,通过电光调制器将信号调制至 40 MHz,并在频谱分析仪上实时测量了该系统在自注入锁定前后线宽的变化,如图 9(a),是自注入锁定前半导体的本征线宽,经过洛伦兹拟合后 3 dB 带宽约为 14 MHz,其对应的激光线宽为 7 MHz,如图 9(b),是通过高 Q 值  $\text{CaF}_2$  晶体微腔自注入锁定系统,并调整至最优状态下,输出线宽经过洛伦兹拟合后 3 dB 带宽约为 1 MHz,其对应的输出激光线宽为 500 kHz,实现了一个量级以上的线宽压窄效果。



(a) 自注入锁定前半半导体激光器本征线宽

## 4 结论

首先对 WGM 微腔自注入锁定系统进行了理论仿真分析,通过对基于 WGM 微腔自注入锁定系统中各参数分析确定了系统最佳工作点是在临界耦合,后向散射系数适中且锁定相位匹配的情况下为最优工作点,通过搭建微腔表征系统对微腔性能进行分析获得了  $Q \approx 1.2 \times 10^7$  的  $\text{CaF}_2$  晶体微腔,利用该微腔与半导体激光器搭建自注入锁定系统,有效的验证了理论中透射谱变化对自注入锁定系统状态的表征,利用自注入锁定原理,验证了一种基于 WGM 微腔压窄半导体激光器线宽的方案,相比于传统电子反馈稳频更加轻量化,不需要复杂的电路与反馈系统,最终,获得了波长为 1552.126 nm 的窄线宽激光输出,成功将本征线宽为 7 MHz 的半导体激光器线宽压窄至 500 kHz,实现了一个量级以上的线宽压窄效果。

## 参考文献:

- [1] Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1):157-179.
- [2] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V. Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics[J]. Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy, 2015, 106:45-66.
- [3] Hsu C P, Li B, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(1):8300416.

- [4] Strelakov D V, Marquardt C, Matsko A B, et al. Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(12):123002.
- [5] Baumgartel L M, Thompson R J, Yu N. Frequency stability of a dual-mode whispering gallery mode optical reference cavity [J]. *Optics Express*, 2012, 20(28):29798–29806.
- [6] Kondratiev N M, Lobanov V E, Shitikov A E, et al. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators [J]. *Frontiers of Physics*, 2023, 18(2):89–130.
- [7] Saito S, Nilsson O, Yamamoto Y. Oscillation center frequency tuning, quantum fm noise, and direct frequency-modulation characteristics in external grating loaded semiconductor-lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(6):961–970.
- [8] He L N, Özdemir S K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(1):60–82.
- [9] Kondratiev N M, Lobanov V E, Cherenkov A V, et al. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23):28167–28178.
- [10] Bouyer J P, Breant C. Stability of an injection-locked DFB 1.5  $\mu\text{m}$  semiconductor laser [J]. *Journal De Physique III*, 1992, 2(9):1623–1644.
- [11] Yu Xia, Chen Xü, Liu Jingmin, et al. Laser self-injection locking technique based on whispering gallery mode resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19):11–24. (in Chinese)  
余霞, 陈旭, 刘静敏, 等. 基于回音壁模式微腔的激光自注入锁定技术 [J]. *中国激光*, 2022, 49(19):11–24.
- [12] Galiev R R, Kondratiev N M, Lobanov V E, et al. Optimization of laser stabilization via self-injection locking to a whispering-gallery-mode microresonator [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1):014036.
- [13] Knight J C, Cheung G, Jacques F, et al. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(15):1129–31.
- [14] Wei Zhipeng. Measurement of the narrow line width laser spectrum based on the delayed self-heterodyne [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(3):38–40, 58. (in Chinese)  
魏志鹏. 基于延时自外差法的窄线宽激光光谱宽测量 [J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(3):38–40, 58.