

# 基于棱镜耦合自注入锁定技术的窄线宽激光器

刘柏兵

(北京邮电大学电子工程学院, 北京, 100876)

**摘要:** 窄线宽激光器在相干通信、超快光测距、原子钟、激光雷达等领域有着广阔的应用前景。本文研究了一种基于棱镜耦合自注入锁定技术的激光器线宽压窄方案, 通过数学模型分析了锁定相位和微腔-棱镜间耦合效率对激光锁定效果的影响。实验中, 利用机械抛光工艺制备出品质因子达  $1.8 \times 10^9$  的氟化镁微盘腔, 并基于棱镜耦合自注入锁定系统实现了瞬时线宽 99 Hz 的窄线宽激光输出, 线宽压窄效果达三个量级以上。

**关键词:** 窄线宽激光器; 氟化镁晶体微腔; 棱镜耦合; 自注入锁定技术

**中图分类号:** TN24

## Narrow-Linewidth Laser Based on Prism-Coupled Self-Injection Locking Technology

LIU Baibing

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** Narrow-linewidth lasers have broad application prospects in coherent communication, ultrafast optical ranging, atomic clocks, and LiDAR. This paper presents a linewidth-compression scheme for lasers based on prism-coupled self-injection locking technology. Numerical simulations were conducted to investigate the effects of phase-locking conditions and microresonator-prism coupling efficiency on the laser locking performance. In the experiment, a magnesium fluoride microdisk cavity with a quality factor of up to  $1.8 \times 10^9$  was fabricated using mechanical polishing techniques. The prism-coupled narrow-linewidth laser system achieved a narrow-linewidth laser output with an instantaneous linewidth of 99 Hz. This resulted in a linewidth narrowing effect of more than three orders of magnitude.

**Key words:** Narrow-Linewidth Laser ; Magnesium fluoride microresonator ; Prism coupling ; Self-Injection Locking Technology

## 0 引言

随着科技的不断发展, 窄线宽激光器在多个应用领域的重要性日益凸显, 例如相干通信<sup>[1]</sup>、超快光测距<sup>[2]</sup>、原子钟<sup>[3]</sup>、激光雷达<sup>[4]</sup>等。目前, 现有的窄线宽激光器普遍存在体积大、成本高且稳定性不足的问题。尽管先进的半导体激光二极管能够覆盖从紫外到红外的波长范围, 但其频率波动和兆赫兹量级线宽难以满足高精度应用需求。为此, 研究者们提出了多种激光线宽压窄方案, 其中基于外腔自注入锁定技术<sup>[5]</sup>的窄线宽激光器因其结构简单和性能优异而备受关注。

自注入锁定技术是一种激光频率锁定方法, 通过将激光器输出光反馈至激光器内部来实现频率稳定和线宽压窄<sup>[6-7]</sup>。目前自注入锁定激光器已经得到了广泛研究, 但是大多依赖片上高 Q 微环<sup>[8]</sup>作为外腔, 其片上波导微腔传输损耗较大, 品质因子相对较低。相比之

**作者简介:** 刘柏兵 (1999-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事回音壁光学晶体微腔制备和应用方面的研究. E-mail: 2695241162@bupt.edu.cn

下，回音壁光学晶体微腔<sup>[9]</sup>具有良好的机械性和稳定的化学性质，展现出极高的稳定性和极低的热噪声，非常适合作为自注入锁定激光系统中的光学外腔。回音壁光学晶体微腔损耗低，在良好的制备工艺下，其性能主要受自身材料的影响，其品质因子可以达到  $10^9$  以上。利用棱镜耦合技术<sup>[10]</sup>不仅可以实现微腔与棱镜之间的高效耦合，同时其结构简单，抗震动性强。

本文研究了基于棱镜耦合自注入锁定技术的窄线宽激光器方案，通过模型仿真，对自注入锁定激光系统中的锁定相位和微腔-棱镜间耦合效率进行分析，为实现窄线宽激光器提供了理论指导。此外，利用机械抛光工艺制备出亚 nm 级表面粗糙度、品质因子达  $1.8 \times 10^9$  的氟化镁微盘腔，并搭建了基于高效棱镜耦合氟化镁微腔的自注入锁定激光器系统。通过对系统参数调整优化，找到最佳锁定状态，成功实现了瞬时线宽为 99 Hz 的窄线宽激光输出，线宽相比于泵浦激光器压窄三个量级以上。

## 1 理论分析

利用外腔自注入锁定技术可以实现激光线宽的有效压窄，本节首先从理论角度分析自注入锁定物理机制，并通过数值仿真分析了系统锁定相位和微腔-棱镜间耦合效率对激光系统性能的影响。

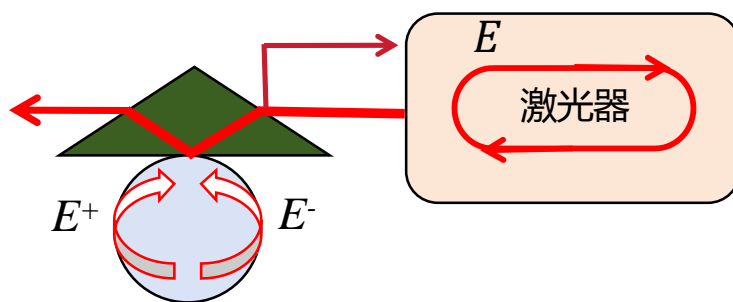


图 1 自注入锁定原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the self-injection locking principle

自注入锁定原理如图 1 所示，当泵浦激光器频率满足外腔谐振频率时，部分光通过棱镜耦合进入微腔，由于微腔内部存在缺陷等原因会激发腔内瑞利散射，产生反向光反馈回激光器内部，将激光器频率锁定在回音壁微腔的共振模式上，进而实现激光频率稳定和线宽压窄。激光系统有效输出频率与泵浦光源频率的稳态关系可以表示为<sup>[11]</sup>：

$$\xi = \zeta + \frac{K}{2} \frac{2\zeta \cos \psi + (1 + \beta^2 - \zeta^2) \sin \psi}{(1 + \beta^2 - \zeta^2)^2 + 4\zeta^2} \quad (1)$$

式中  $\xi$  表示激光器泵浦光源与微腔谐振频率之间的相对失谐量， $\zeta$  表示自注入锁定系统中输出光源与微腔谐振频率的相对失谐量； $K$  表示系统的耦合系数， $\beta$  是后向瑞利散射系数， $\psi$  是锁定相位。通过方程（1）可以分析出在有无反馈光情况下激光器输出频率和泵浦光源输出频率之间的关系。分别设置  $K=70$ ， $\beta=0.05$ ， $\psi=0$ ，如图 2 所示，图中虚线表示无自注入锁定时，系统输出光频率与泵浦光源输出频率相等， $\zeta$ - $\xi$  之间成线性关系；实线表示在自注入锁定系统中当回音壁微腔有反馈光时，在特定的频率范围内会呈现 S 型的稳态关系，在此范围内实现锁定，对线宽进行压窄。

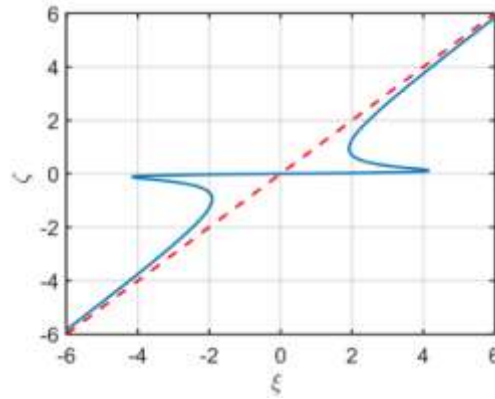


图2 自注入锁定激光系统调谐曲线

Fig. 2 Self-injecting locking laser system tuning curves

75 自注入锁定激光系统的线宽压窄模型可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_f} \approx \frac{Q_d^2}{Q^2} \frac{1}{16d^2(1+\alpha_H^2)} \quad (2)$$

其中  $d$  表示微腔到激光腔的背向光振幅反射系数,  $\Delta\omega$  表示自注入锁定系统激光器输出线宽,  $\Delta\omega_f$  为泵浦激光器线宽,  $\alpha_H$  表示线宽展宽因子,  $Q$  和  $Q_d$  分别为外腔有载品质因子和激光谐振腔品质因子。由式 (2) 可以看出, 在系统其他参数不变的情况下, 随着微腔品质因子的提高, 系统输出线宽的压窄效果越来越明显。

80

为了分析锁定相位和微腔-棱镜间耦合效率对激光锁定效果的影响, 引入激光器速率方程和载流子密度  $N$  得到动力学模型<sup>[13-14]</sup>如下:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - rN - aV(N - N_0) |E|^2 \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{1}{2}(1 - i\alpha_H)(aV(N - N_0) - k) - i\zeta' \Delta I\right)E + \sqrt{k_{ex}k_i}e^{i\omega}E_- \quad (4)$$

85

$$\frac{dE_+}{dt} = (-k_r + i\delta\omega(t) + i\Gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2))E_+ + ik_sE_- + \sqrt{k_{ex}k_i}e^{i\omega}E \quad (5)$$

$$\frac{dE_-}{dt} = (-k_r + i\delta\omega(t) + i\Gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2))E_- + ik_s^*E_+ \quad (6)$$

90

式中  $I$  表示激光二极管电流,  $e$  表示基本电子电荷,  $V$  表示激光有效体积,  $r$  是载流子的复合率,  $a$  表示微分增益,  $N_0$  表示透明载流子密度;  $k$  代表激光腔的光子衰减率,  $\zeta'$  为电流调谐系数;  $k_i$  表示激光器和微腔的谐振耦合因子,  $k_{ex}$  和  $k_i$  分别表示外部耦合损耗和腔内损耗, 微腔-棱镜之间耦合效率  $\eta \approx 4k_{ex}k_r / (k_{ex} + k_r)^2$ ,  $k_s$  表示前后向光场之间的耦合率;  $\Gamma = \hbar\omega_0^2cn_2/n_0^2$  表示克尔移频系数,  $n_0$  是谐振腔折射率,  $n_2$  表示克尔非线性系数;  $E$  表示泵浦光光场,  $E_+$  和  $E_-$  分别代表前向和后向光场, 上述四个方程共同描述了自注入锁定状态下激光器复杂的动力学过程。

95

通过仿真微腔内部光场变化, 能够直观分析出不同参数对锁定效果的影响, 当泵浦激光器输出频率与微腔谐振频率的失谐量减小到一定程度时, 腔内功率升高, 反馈光增强, 激光器输出频率被锁定在微腔谐振频率附近, 进而实现激光器线宽压窄。自注入锁定激光系统的

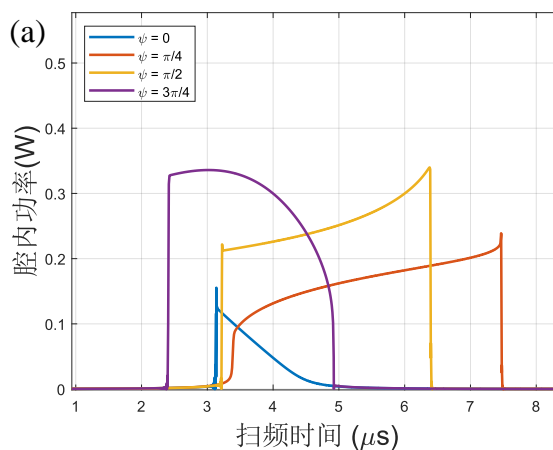
100

动力学模型初始参数设置如表 1 所示，对锁定相位  $\psi$  和微腔-棱镜间耦合效率  $\eta$  进行仿真分析。从图 3 (a) 可以看出在不同的锁定相位下，腔内功率和锁定范围的差异较大。图 3 (b) 展示了耦合效率  $\eta$  对激光锁定效果的影响，随着耦合效率增大，微腔内部功率不断升高，锁定范围逐渐变宽。由以上仿真可知选择合适的锁定相位，同时提升微腔-棱镜之间的耦合效率，可以有效提高腔内功率和拓宽激光锁定带宽，锁定效果也会更加稳定。

表 1 动力学模型初始参数设定

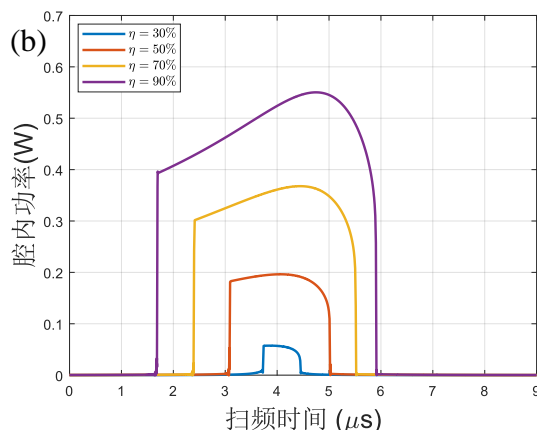
Table 1 Initial parameter setting of the dynamic model

| 参数         | 数值                             | 单位           |
|------------|--------------------------------|--------------|
| $\alpha_H$ | 5                              |              |
| $V$        | $2 \times 10^{-16}$            | $m^3$        |
| $\ell$     | $1.6 \times 10^{-19}$          | $s^{-1}$     |
| $a$        | $1 \times 10^4$                | $s^{-1}$     |
| $N_0$      | $1 \times 10^{24}$             | $m^{-3}$     |
| $r$        | $1 \times 10^9$                | $s^{-1}$     |
| $\zeta'$   | $5 \times 10^8$                | Hz/mA        |
| $k$        | $1 \times 10^{11} \times 2\pi$ | rad $s^{-1}$ |
| $k_i$      | $15 \times 10^8 \times 2\pi$   | rad $s^{-1}$ |
| $k_{ex}$   | $60 \times 10^6 \times 2\pi$   | rad $s^{-1}$ |
| $k_r$      | $60 \times 10^6 \times 2\pi$   | rad $s^{-1}$ |
| $k_s$      | $30 \times 10^6 \times 2\pi$   | rad $s^{-1}$ |
| $n_0$      | 2                              |              |
| $n_2$      | $2.4 \times 10^{-19}$          | $m^2/W$      |



105

(a) 锁定相位的影响  
(a) Effect of locking the phase



(b) 耦合效率的影响

(b) Effect of coupling efficiency

110

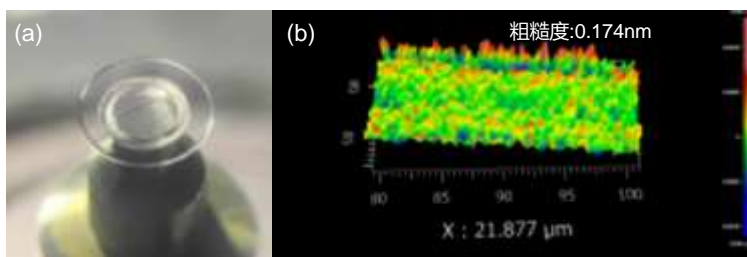
图3 激光自注入定动力学模型仿真分析

Fig. 3 Simulation and analysis of laser self-injection locking dynamic model

## 2 实验结果

115

通过理论分析可知，在自注入锁定激光系统中，光学微腔作为外部反馈无源外腔，其品质因子将直接影响激光器线宽压窄的效果。因此，研究组针对超高品质回音壁光学晶体微腔制备工艺开展研究，利用超精密加工平台和机械抛光方式制备高品质氟化镁晶体微腔，工艺流程主要分为定型、粗抛和精抛三个步骤，最终制备出如图4(a)所示氟化镁微盘腔，利用光学轮廓仪对微腔侧壁粗糙度进行测试，在不接触微腔表面的情况下，选取赤道面局部进行测试，微腔侧壁赤道面局部平均粗糙度可以达到0.174 nm，如图4(b)所示。



120

(a) 氟化镁微盘腔实物图 (b) 微腔侧壁局部粗糙度表征

(a) MgF<sub>2</sub> microdisk resonator (b) Characterization of microdisk sidewall morphology

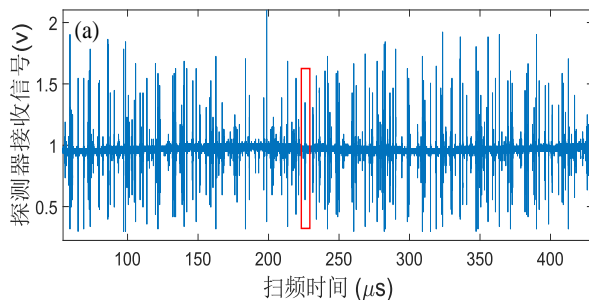
图4 氟化镁微盘腔

Figure 4 MgF<sub>2</sub> microdisk resonator

125

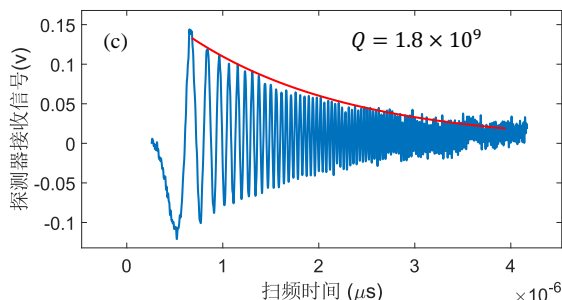
同时，利用光纤耦合方式对氟化镁微腔的品质因子进行测试。品质因子能够直接反映微腔腔体性能，其定义为 $Q = \omega\tau$ ，其中 $Q$ 表示微腔品质因子， $\omega$ 表示微腔模式角频率， $\tau$ 表示腔内光子存活时间，光子寿命越长，微腔品质因子越高。图5(a)是氟化镁微盘腔的透射谱线，选取其中红色区域模式进行拟合可以得到如图5(b)所示衰荡曲线，测试得到腔内光子寿命约为1.5  $\mu$ s，通过计算得到氟化镁微盘腔的品质因子为 $1.8 \times 10^9$ 。

130



(a) 微腔模式透射谱

(a) Microresonator mode transmission spectrum



(b) 衰荡拟合曲线

(b) Ringdown fitting curve

135

图 5 氟化镁微盘腔透射谱

Figure 5 Transmission spectroscopy of MgF<sub>2</sub> microdisk resonator

140

研究组搭建的自注入锁定激光系统如图 6 所示，使用无隔离的可调谐 DFB 激光器作为泵浦光源，通过温控和电路驱动精确控制 DFB 激光器芯片的输出频率和功率，保证输出光源的稳定。利用高透光率的 BK7 棱镜进行高效耦合，根据氟化镁和 BK7 材料的折射率合理设计棱镜尺寸，保证耦合光路的高效传输。信号发生器 (RIGOL, DSG821) 控制 DFB 激光器芯片驱动电流，可以灵活调整扫频速率和扫频范围，通过示波器 (RIGOL, MSO5104) 观察微腔透射谱和锁定模式的状态。将自注入锁定激光与外部参考激光器 (New Focus, TLB-6700) 直接拍频，利用频谱仪 (RIGOL, RSA3015E-TG) 可以直观观察到系统输出光的线宽变化。最后，通过激光器噪声分析仪 (OEwaves, OE4000) 可以对系统输出光的频率噪声进行精确测试，并计算出输出光的瞬时线宽。

145

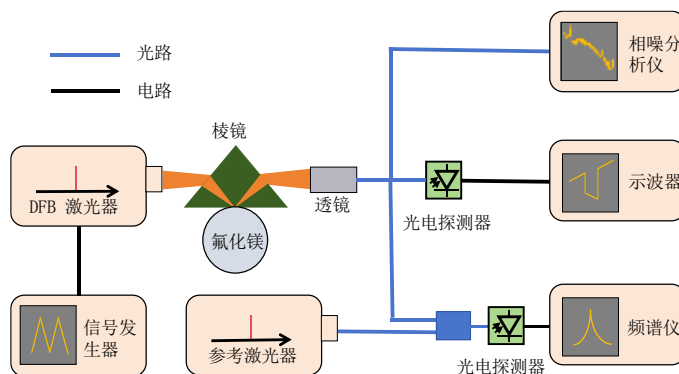


图 6 自注入锁定激光系统方案图

Figure 6 Schematic diagram of a self-injecting locking laser system

150

实验中通过三维高精度位移台调整激光系统的锁定相位和微腔-棱镜之间的耦合效率，并在示波器上观察其扫频曲线。最佳锁定模式如图 7 所示，锁定持续时间约为 1 ms，对应

锁定范围为 750 MHz。当激光系统处于锁定状态时，其输出信号的中心波长为 1548.242 nm。

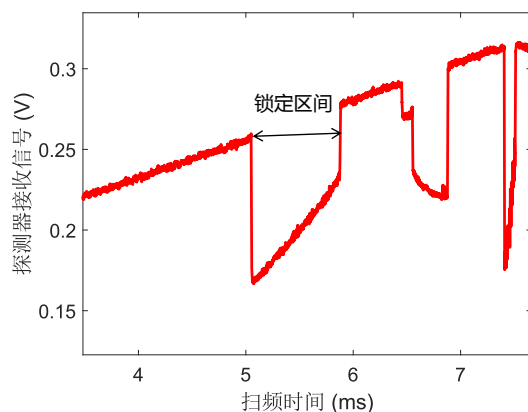
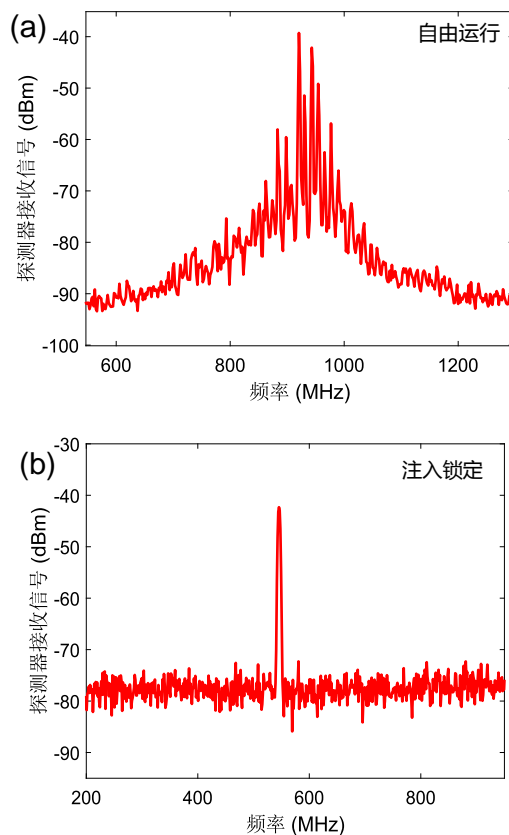


图 7 最佳锁定模式透射谱

Figure 7 Transmission spectroscopy in the best lock-on mode

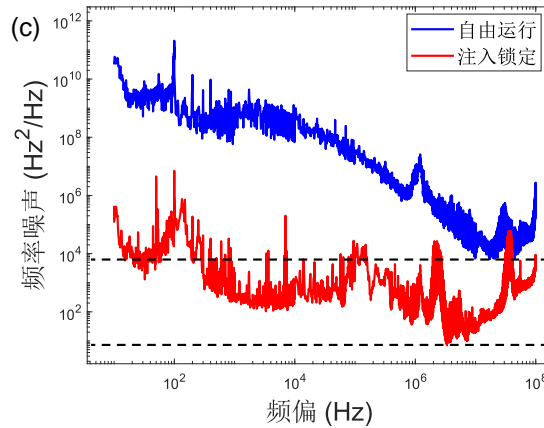
155 自注入锁定激光系统输出信号的线宽变化可以通过频谱仪借助拍频信号进行分析。图 8 (a) 和图 8 (b) 分别为激光系统在锁定前后的拍频输出信号，可以看出 DFB 激光器的输出光源在经过自注入激光系统锁定后，其线宽有着明显的改善。为了精确测得激光系统的输出线宽，利用激光器噪声分析仪对系统输出光的频率噪声进行测试，其结果如图 8 (c) 所示。对数据进行计算得到锁定前后的瞬时线宽分别为 100 kHz 和 99 Hz，实现了 3 个量级的压窄效果。

160



(a-b) 拍频信号频谱

(a-b) The spectrum of the beat signal



(c) 激光频率噪声

(c) Laser frequency noise

图 8 激光系统输出信号测试结果

Figure 8 Test results of the laser system output signal

165

170

### 3 结论

本文首先对基于棱镜耦合的自注入锁定技术进行理论分析和模型仿真,确定了系统锁定相位和微腔-棱镜间耦合效率对激光锁定效果的影响规律。其次,针对氟化镁的特性,采用机械抛光的工艺制备了亚 nm 级表面粗糙度、品质因子达  $1.8 \times 10^9$  的氟化镁微盘腔。最后,通过自注入锁定激光系统验证了基于棱镜耦合自注入锁定技术的线宽压窄方案的可行性,实现了瞬时线宽 99 Hz 的窄线宽激光输出,线宽压窄效果达三个量级。

175

#### [参考文献] (References)

180

185

190

195

200

- [1] Zhang S, Kam P Y, Yu C, et al. Laser linewidth tolerance of decision-aided maximum likelihood phase estimation in coherent optical M-ary PSK and QAM systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(15): 1075-1077.
- [2] Lihachev G, Riemensberger J, Weng W, et al. Low-noise frequency-agile photonic integrated lasers for coherent ranging[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3522.
- [3] Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. Optica, 2019, 6(5): 680-685.
- [4] Tang L, Li L, Li J, et al. Hybrid integrated ultralow-linewidth and fast-chirped laser for FMCW LiDAR[J]. Optics Express, 2022, 30(17): 30420-30429.
- [5] Zhang G, Cen Q, Hao T, et al. Self-injection locked silica external cavity narrow linewidth laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(8): 2474-2483.
- [6] Liang W, Ilchenko V S, Eliyahu D, et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 7371.
- [7] Liang W, Ilchenko V S, Savchenkov A A, et al. Whispering-gallery-mode-resonator-based ultranarrow linewidth external-cavity semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(16): 2822-2824.
- [8] Puckett M W, Liu K, Chauhan N, et al. 422 Million intrinsic quality factor planar integrated all-waveguide resonator with sub-MHz linewidth[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 934.
- [9] Yang S, Wang Y, Sun H. Advances and prospects for whispering gallery mode microcavities[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(9): 1136-1162.
- [10] Sarid D, Cressman P J, Holman R L. High - efficiency prism coupler for optical waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1978, 33(6): 514-515.
- [11] 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): 21305.
- [12] 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.
- Yu Xia, Chen Xu, 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
- [13] 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.

205

[14] Lihachev G, Riemensberger J, Weng W, et al. Low-noise frequency-agile photonic integrated lasers for coherent ranging[J]. Nature communications, 2022, 13(1): 3522.