光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023071701

基于片上微腔自反馈注入锁定的窄线宽激光器

白清松*

（成都天奥电子股份有限公司 技术研发中心，成都 610037）

摘　要： 对半导体激光器外腔自反馈注入锁定进行了理论分析，研究了片上微腔的自反馈注入锁定对于分布反馈(DFB)激光器输出线宽的影响，分析了决定锁定带宽及线宽压缩系数的关键参数。基于 Q 值为 2.4×10^6 的片上 Si_3N_4 微腔的后向瑞利散射实现了 DFB 激光器的自反馈注入锁定，将其输出线宽由自由运转时的 556.71 kHz 压窄到了 92.28 kHz，锁定带宽达到 425 MHz。研究结果有助于理解半导体激光器自反馈注入锁定机理，并为实现窄线宽激光器提供了新的结构更简单、集成化潜力更高的方案。

关键词： 窄线宽激光器；自反馈注入锁定；片上微腔；线宽压缩

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0666－06

Narrow-Linewidth Laser Based on On-Chip Microcavity Self-Feedback-Injection Locking

BAI Qingsong

（Technology Research Developing Center，Chengdu Space on Electronics Corporation Ltd.，Chengdu 610037，CHN）

Abstract： Theoretical analysis of the self-feedback injection locking of the external cavity of the semiconductor laser was carried out. The influence of the self-feedback injection locking of the on-chip microcavity on the output linewidth of the DFB (distributed feedback) laser was studied, and the key parameters determining the locking bandwidth and the linewidth compression factor were analyzed. Based on the back Rayleigh scattering of the on-chip Si_3N_4 microcavity with a Q value of 2.4×10^6, the self-feedback injection locking of the DFB laser was realized. The line width is narrowed from 556.71 kHz during free-running to 92.28 kHz, and the locking bandwidth reaches 425 MHz. The research results contribute to the understanding of the self-feedback injection locking mechanism of semiconductor lasers and provide a new solution with simpler structure and higher integration potential for the realization of narrow linewidth lasers.

Key words： narrow-linewidth laser; self-feedback injection locking; on-chip microcavity; line width compression

0　引言

光学微腔具备极小尺寸并在宽波长范围内具备极高 Q 值，可以将光子局限在微米尺度空间内，使得利用较低功率泵浦光即可产生局域化强光场，可以显著增强光与微腔材料间的相互作用从而激发各种非线性效应，比如二次/高次谐波产生[1]、四波混频[2]、光克尔效应[3]、受激拉曼散射[4]、受激布里渊散射[5]等。微纳加工工艺的高速发展使得各种材料和各种构型的光学微腔被开发出来，用于制备光学微腔的材料包括二氧化硅[6]、氮化硅[7]、熔融石英[8]、氮化铝[9]、铌酸锂[10]、硅[11]以及多种氟化物[12]

收稿日期：2023－07－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(61871084)；成都市重点研发项目(2022-CP02-00035-GX).

* **通信作者：**白清松　**E-mail：** baiqingsong7@163.com

等，而光学微腔的构型包括微球[13]、微盘[14]、片上集成微环[15]等。

片上 Si_3N_4 微环腔的制备工艺与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容[16]，可以实现光学微腔与光波导、调制器、探测器、耦合器、光开关、延迟线、半导体光源等器件的片上集成，具备大规模商业化的潜力。随着相关制备工艺的持续优化，片上 Si_3N_4 微环腔 Q 值已经能够达到 10^7 量级[17]。得益于片上 Si_3N_4 微环腔的上述优势，其已经被广泛应用于微腔光频梳[18]、腔光力学[19]、窄线宽激光器[20]、高灵敏度传感[21]、光参量放大[22]等领域的研究中。

半导体激光器具有体积小、输出功率高、转换效率高、批量制备成本低廉、输出波长覆盖范围广、可片上集成等显著优势，但是其兆赫兹量级的线宽难以满足精密光谱学[23]、光频原子钟[24]、相干光通信[25]、精密测量[26]等前沿科技领域的要求。将半导体激光器与片上高 Q 微腔集成，利用泵浦光耦合进微腔后在传输过程中产生的后向瑞利散射可以实现对半导体激光器的注入反馈锁定，进而利用微腔的高 Q 值将激光器的线宽大幅压窄。这种基于片上微腔的自反馈注入锁定方案为窄线宽激光器提供了新的解决方案。

1　基本原理

1.1　高 Q 值片上微腔

从几何光学角度分析，泵浦光经光波导耦合入片上微腔后，只有当泵浦光在微腔内的传输光程刚好是波长的整数倍时，泵浦光才能在微腔内实现相长干涉和光学共振。光学微腔中相同偏振状态及横模模式数下，相邻纵模间的频域间隔称为光学微腔的自由光谱范围(FSR)，可以通过下式近似计算：

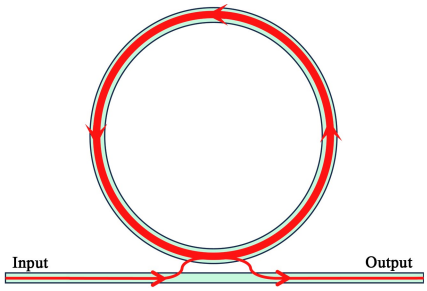
$$\Delta\nu_{\mathrm{FSR}}=\frac{c}{\lambda_{m+1}^{k}}-\frac{c}{\lambda_{m}^{k}}\approx\frac{c}{Ln_{\mathrm{g}}} \tag{1}$$

式中，c 为光速，λ_m^k 为 k 阶横模下 m 阶纵模对应的谐振波长，n_{g} 为微腔的群折射率，L 为微腔周长。由式(1)可知，微腔的 FSR 与微腔长度 L 成反比，片上集成光学微腔尺寸极小，因此其 FSR 通常为吉赫兹至太赫兹量级。此外，在微腔材料色散、结构色散、几何色散以及光克尔效应的共同影响下，折射率会随着泵浦波长的变化而变化，从而使得 FSR 也会随着泵浦波长的变化而变化[27]，这一特性对光学微腔的众多应用有着重大影响。在实际应用中，可以通过对微腔构型的设计来对色散特性进行调控，从而获得理想的微腔。

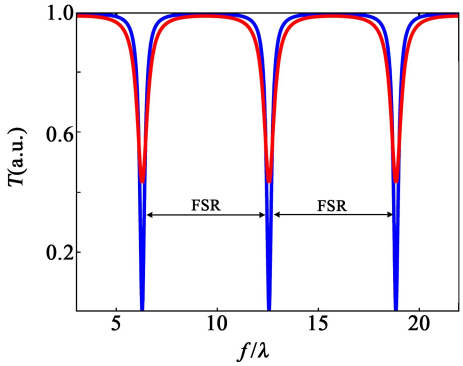
片上光学微腔的波导截面尺寸为微米量级，其利用全反射效应将光场限制在极小的模式体积内。光学微腔的 Q 值定义为微腔中束缚的光场能量与光场在腔内传播一周耗散的能量之比，因此光学微腔的 Q 值表征了其对光子的束缚能力。通过透射谱测量得到的光学微腔 Q 值可以表示为泵浦光波长 λ 与透射吸收峰的线宽 $\Delta\lambda$ 之比[28]：

$$Q_{\mathrm{load}}=\frac{Q_{\mathrm{int}}Q_{\mathrm{ext}}}{Q_{\mathrm{int}}+Q_{\mathrm{ext}}}=\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \tag{2}$$

式中，Q_{load} 为光学微腔有载 Q 值，Q_{int} 为光学微腔本征 Q 值，其主要受限于微腔表面粗糙度引起的散射损耗、微腔材料的吸收损耗，以及辐射损耗，Q_{ext} 为输入输出波导与微腔波导间耦合引入的损耗与微腔中束缚的光场能量之比。当 $Q_{\mathrm{int}}=Q_{\mathrm{ext}}$ 时，即为临界耦合，其透射谱如图 1(b)中蓝色曲线所示；当 $Q_{\mathrm{int}}>Q_{\mathrm{ext}}$ 时，即为过耦合，当 $Q_{\mathrm{int}}<Q_{\mathrm{ext}}$ 时，即为欠耦合，其透射谱均如图 1(b)中红色曲线所示。



(a) 光学微腔内光场传输情况



(b) 临界耦合(蓝色)和欠耦合/过耦合(红色)情况下的透射谱

图 1　片上光学微腔示意图

本文所用片上 Si_3N_4 微腔如图 2 所示，为了节约芯片面积，微腔波导结构被设计为螺旋线形，微腔腔长为 4 300 μm，FSR 为 35 GHz，微腔波导厚度为 800 nm、宽度为 1 650 nm，传输波导厚度为 800 nm、

宽度为 1 000 nm。通过测试该微腔在 L 波段的透射谱，如图 3(a)所示，本文选择了 1 556.2 nm 处的纵模与分布反馈(DFB)激光器实现注入锁定，该纵模的细节如图 3(b)所示。微腔处于欠耦合状态，通过洛伦兹拟合得知该纵模线宽为 79.32 MHz，可以计算出该纵模有载 Q 值为 2.427×10^6。

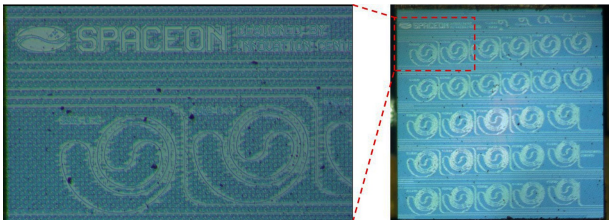
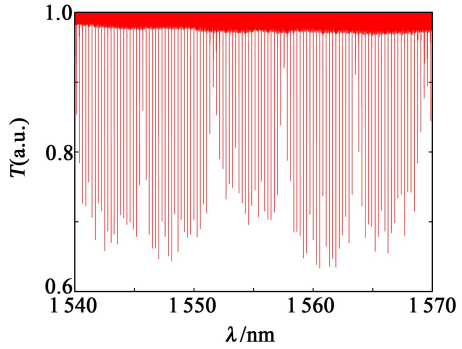
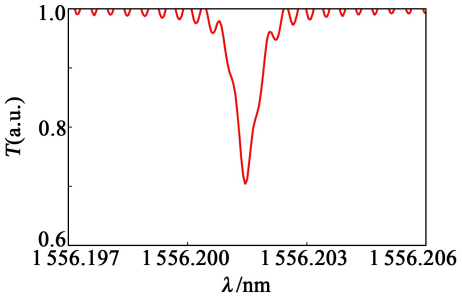


图 2 Si_3N_4 光学微腔芯片



(a) 在 1 540～1 570 nm 带宽内的透射谱



(b) 在 1 556.2 nm 处的纵模透射谱

图 3 片上 Si_3N_4 微腔透射谱

1.2 基于片上微腔的自反馈注入锁定

激光器与片上微腔直接耦合时，当激光器输出波长与微腔纵模匹配时，激光器输出光被耦合进微腔中，光子在微腔传输过程中由于后向瑞利散射会有极小部分光信号沿着反方向反馈到激光器腔内，在微腔与激光器之间的相位延迟满足相位锁定条件时，即可实现注入锁定。由于片上微腔的 Q 值(通常为 10^6 以上)通常显著高于激光器谐振腔 Q 值(通常为 10^5 量级)，因此注入锁定时激光器输出线宽将被显著压窄。激光器锁定带宽可由下式计算得出[29]：

$$\xi=\zeta+\frac{K_0}{2}\times\frac{2\zeta\cos\varphi+(1+\Gamma^2-\zeta^2)\sin\varphi}{(1-\Gamma^2-\zeta^2)^2+4\zeta^2} \tag{3}$$

式中，$\xi=2(\omega_0-\omega_{LC})/k$ 为激光器与微腔纵模间的归一化频率失谐量，ω_0 为片上微腔纵模频率，ω_{LC} 为自由运转状态下泵浦电流对应的输出频率；$\zeta=2(\omega_0-\omega_{eff})/k$ 为激光器输出的归一化频率失谐量，ω_{eff} 为激光器实际输出的频率；$K_0=8\eta\Gamma k_{do}\sqrt{1+a_g^2}/kR_0$ 为自反馈注入锁定系数，η 为微腔耦合率，Γ 为归一化后向散射系数，k_{do} 为激光器输出反射镜耦合率，a_g 为半导体激光器线宽展宽因子(Henry 因子，由载流子浓度变化引起的折射率和介质增益变化造成的展宽效应)，k 为微腔纵模线宽，R_0 为激光器输出端面反射系数，φ 为注入锁定相位。激光器注入锁定带宽与片上耦合系数成正比，与激光器-片上微腔间的耦合系数成正比，与微腔 Q 值的平方成正比。

本文所用片上微腔与 DFB 激光器间($K_0=34$，$\Gamma=0.01$，$\varphi=0$)的自反馈注入锁定过程中激光器频率演化曲线及锁定带宽仿真结果如图 4 所示。将激光器输出波长从红移端向微腔纵模扫描，激光器输出波长与微腔纵模频率间的失谐量在 −4～12 倍纵模线宽(−148～444 MHz)范围内可实现注入锁定。

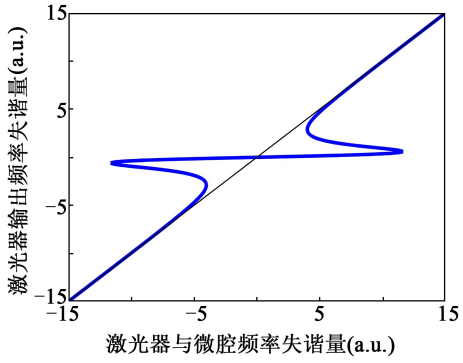


图 4 基于片上微腔的自反馈注入锁定过程中激光器频率动态过程

在激光器自反馈注入锁定带宽内，激光器输出频率保持稳定，同时线宽被大幅压窄，其线宽压缩系数可由下式估算[30]：

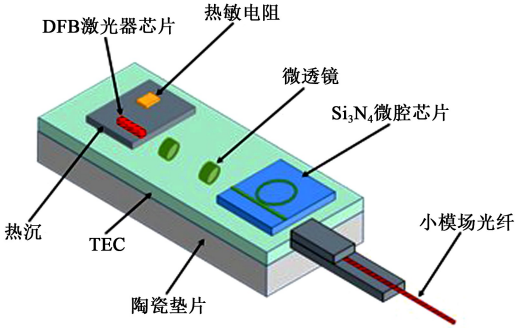
$$\frac{\Delta\omega_{free}}{\Delta\omega_{lock}}\approx16\Gamma^2(1+a_g^2)\frac{Q_{load}^2}{Q_{laser}^2} \tag{4}$$

式中，Q_{load} 为片上微腔有载 Q 值，Q_{laser} 为激光器谐振腔的 Q 值。由式(4)可知，线宽压缩系数与微腔 Q 值的平方成正比。对于本文所用的 DFB 激光器，其谐振腔 Q 值约为 5×10^6，展宽因子 a_g 约为 17，可以计算出自反馈注入锁定的线宽压缩系数约为 5.5

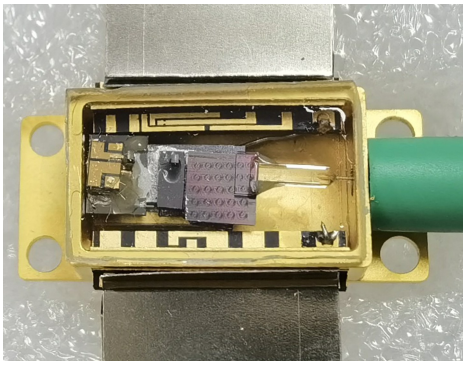
倍。当片上微腔的 Q 值提升到 10^7 量级时，可以获得上百倍的线宽压缩系数，实现赫兹级的输出线宽。

1.3　实验装置

本文将 DFB 激光器与片上 Si_3N_4 微腔耦合并封装于蝶形封装管壳内，模块整体尺寸仅为 30 mm×15.2 mm×9.4 mm，如图 5 所示。DFB 激光器输出光通过两个微透镜整形后耦合进 Si_3N_4 微腔芯片中，微腔芯片尺寸为 5 mm×5 mm，微腔芯片输出波导与小模场光纤近距耦合实现窄线宽激光输出，光纤输出端为 FC/APC 接口。利用热敏电阻探测 DFB 激光器温度，同时利用 TEC 实现对 DFB 激光器芯片和 Si_3N_4 微腔芯片的温度控制，温控精度优于 0.1 ℃。



(a) 结构图



(b) 实物图

图 5　基于片上微腔的自反馈注入锁定窄线宽激光器模块封装结构图和实物图

本文采用光纤延时自外差方法进行激光器线宽测量[31]，线宽测量系统如图 6 所示，激光器输出光信号经过隔离器后由 50∶50 耦合器分束，其中一束光信号进入 40 km 的单模光纤延迟线内，另一束光信号由声光调制器(AOM)施加 80 MHz 的频移。两束光信号分别经过延时和频移后在耦合器中实现拍频干涉，并由光电探测器探测将拍频信号送入频谱分析仪。在对拍频信号进行数据处理时，由于 −3 dB 和 −10 dB 衰减易受低频噪声的干扰，因此本文采用 −20 dB 衰减处的谱宽信息来计算激光器线宽。

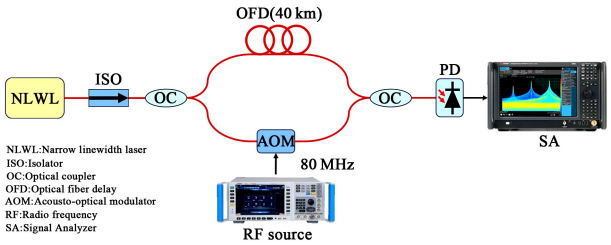


图 6　光纤延时自外差测量激光器线宽的实验系统

2　分析与讨论

激光器在不同泵浦电流下的光谱特性如图 7 所示，该激光器单模抑制比约为 60 dB。激光器的电流-功率特性和电流-波长特性如图 8 所示，阈值电流为 30 mA，波长电流系数约为 0.008 5 nm/mA。

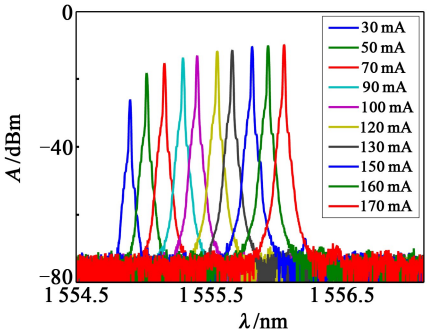


图 7　DFB 激光器在不同泵浦电流下的输出光谱

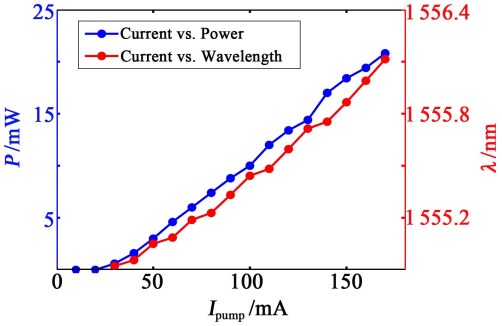
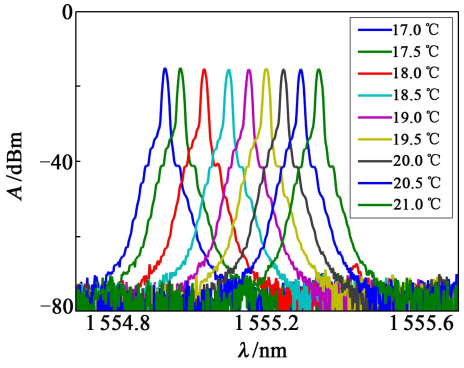


图 8　DFB 激光器的电流-功率特性(蓝色曲线)和电流-波长特性(红色曲线)

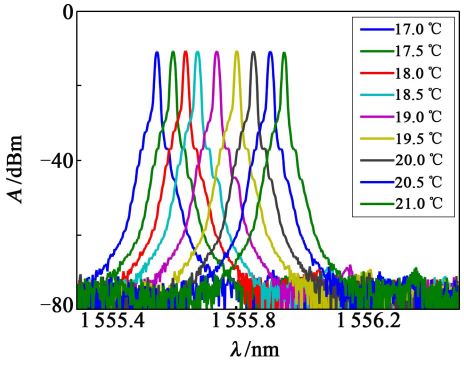
激光器在 70 mA 泵浦电流和 140 mA 泵浦电流情况下不同温度点的光谱如图 9 所示。可见该激光器在 70 和 140 mA 泵浦电流下的波长温度系数均约为 0.1 nm/℃。

通过调节激光器电流实现输出波长扫描，当泵浦电流为 169.45 mA 时激光器与片上微腔实现自反馈注入锁定，当泵浦电流为 169.58 mA 时线宽最窄，当泵浦电流为 169.85 mA 时激光器恢复自由运

转。激光器注入锁定时(169.58 mA)和自由运转时的线宽测试结果如图 10 所示,可见激光器线宽由自由运转时的 556.71 kHz 压窄到了 92.28 kHz,压缩系数为 6,与理论估算的 5.7 接近,主要误差来自于对激光器谐振腔品质因子 Q_{laser} 和激光器线宽展宽系数 a_{g} 的估算误差。



(a) 激光器在 70 mA 泵浦电流下不同温度点输出光谱



(b) 激光器在 140 mA 泵浦电流下不同温度点输出光谱

图 9 DFB 激光器的温度特性

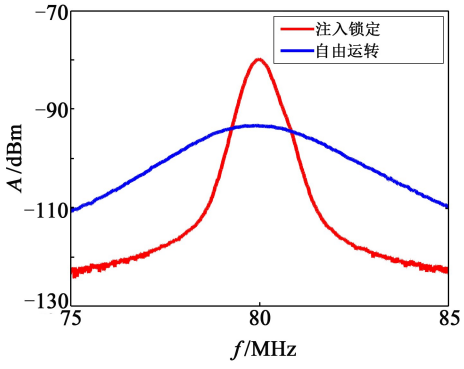


图 10 激光器自由运转时(蓝色曲线)和注入锁定时(红色曲线)的线宽测量结果

激光器线宽随泵浦电流的变化趋势如图 11 所示,可以看出激光器注入锁定过程中激光器输出线宽的变化情况,可见其锁定带宽对应的电流范围约为 0.4 mA,根据激光器电流波长系数 0.008 5 nm/mA 可以计算出其锁定带宽约为 425 MHz,与理论 592 MHz 接近,其主要误差来自于电流源精度误差以及激光器/片上微腔温度波动。

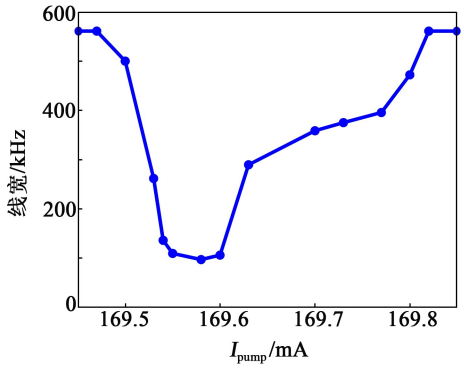


图 11 激光器输出线宽随泵浦电流的变化

3 结论

本文搭建的基于片上微腔自反馈注入锁定的窄线宽激光器通过引入高 Q 值片上微腔中的后向瑞利散射实现了 DFB 激光器的注入锁定,将其线宽压窄了 6 倍至百千赫兹以内,锁定带宽达到 425 MHz。根据理论分析,通过提高片上微腔的 Q 值可将半导体激光器的线宽进一步压窄,同时大幅提升锁定带宽。本研究表明相比于传统的主动 PDH 锁定技术和 Feed-Forword 技术,通过片上微腔自反馈注入锁定方案为实现窄线宽激光器提供了新的途径,且具备结构更为简单、集成化潜力更大的显著优势。

参考文献:

[1] Zhang X Y, Cao Q T, Wang Z, et al. Symmetry-breaking-induced nonlinear optics at a microcavity surface[J]. Nature Photonics, 2019, 13(1): 21-24.

[2] Gu B B, Zhou Y Y, Yu X, et al. Fiber loop laser stabilized by fano resonance in metallic grating coupled resonator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(14): 1597-1600.

[3] Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823014.

[4] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. Nature, 2002, 415(6872): 621-623.

[5] Lin G P, Diallo S, Saleh K, et al. Cascaded Brillouin lasing in monolithic Barium fluoride whispering gallery mode resonators [J]. Appl. Phys. Lett., 2014, 105(23): 231103.

[6] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, et al. Packaged silica microsphere-taper coupling system for robust thermal sensing application[J]. Opt. Express, 2011, 19(7): 5753-5759.

[7] Xiang C, Guo J, Jin W, et al. High-performance lasers for fully integrated silicon nitride photonics [J]. Nature

Communications，2021，12：6650.

[8] Sayson N L B，Bi T，Ng V，et al. Octave-spanning tunable parametric oscillation in crystalline Kerr microresonators[J]. Nature Photonics，2019，13：701-706.

[9] Liu X，Gong Z，Bruch A W，et al. Aluminum nitride nanophotonics for beyond-octave soliton microcomb generation and self-referencing[J]. Nature Communications，2021，12：5428.

[10] He Y，Lopez-Rios R，Javid U A，et al. High-speed tunable microwave-rate soliton microcomb [J]. Nature Communications，2023，14：3467.

[11] Nitiss E，Hu J，Stroganov A，et al. Optically reconfigurable quasi-phase-matching in silicon nitride microresonators[J]. Nature Photonics，2022，16：134-141.

[12] Herr T，Brasch V，Jost J D，et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics，2014，8(2)：145-152.

[13] Braginsky V B，Gorodetsky M L，Ilchenko V S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes[J]. Phys. Lett. A，1989，137(7/8)：393-397.

[14] McCall S L，Levi A F J，Slusher R E，et al. Whispering-gallery mode microdisk lasers[J]. Appl. Phys. Lett.，1992，60(3)：289-291.

[15] Moss D J，Morandotti R，Gaeta A L，et al. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and hydex for nonlinear optics[J]. Nature Photonics，2013，7(8)：597-607.

[16] Yang Z，Jahanbozorgi M，Jeong D，et al. A squeezed quantum microcomb on a chip[J]. Nature Communications，2021，12：4781.

[17] Puckett M W，Liu K K，Chauhan N，et al. 422 million intrinsic quality factor planar integrated all-waveguide resonator with sub-MHz linewidth [J]. Nature Communications，2021，12：934.

[18] Drake T E，Stone J R，Briles T C，et al. Thermal decoherence and laser cooling of Kerr microresonator solitons [J]. Nature Photonics，2020，14：480-485.

[19] Kippenberg T J，Vahala K J. Cavity optomechanics：back-action at the mesoscale[J]. Science，2008，321(5893)：1172-1176.

[20] Voloshin A S，Kondratiev N M，Lihachev G V，et al. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators[J]. Nature Communications，2021，12：235.

[21] Han X，Mao Q，Zhao L，et al. Novel resonant pressure sensor based on piezoresistive detection and symmetrical in-plane mode vibration[J]. Microsystems Nanoengineering，2020，6：95.

[22] Englebert N，De Lucia F，Parra-Rivas P，et al. Parametrically driven Kerr cavity solitons [J]. Nature Photonics，2021，15：857-861.

[23] Cygan A，Lisak D，Morzyński P，et al. Cavity mode-width spectroscopy with widely tunable ultra narrow laser[J]. Opt. Express，2013，21(24)：29744-29754.

[24] Jiang Y Y，Ludlow A D，Lemke N D，et al. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16}-level lasers tabilization [J]. Nature Photonics，2011，5(3)：158-161.

[25] Al-Taiy H，Wenzel N，Preuβler S，et al. Ultra-narrow linewidth stable and tunable laser source for optical communication systems and spectroscopy[J]. Opt. Lett.，2014，39(20)：5826-5829.

[26] Adhikari R X. Gravitational radiation detection with laser interferometry[J]. Reviews of Modern Phys.，2014，86(1)：121-151.

[27] Zheng Y，Wu Z F，Shum P P，et al. Sensing and lasing applications of whispering gallery mode microresonators[J]. Opto-Electronic Advances，2018，1(9)：4-13.

[28] Lin G P，Coillet A，Chembo Y K. Nonlinear photonics with high-*Q* whispering-gallery-mode resonators[J]. Adv. Opt. Photon.，2017，9(4)：828-890.

[29] 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]. Opt. Express，2017，25(23)：28167-28178.

[30] 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]. Phys. Rev. Appl.，2020，14(1)：014036.

[31] Okoshi T，Kikuchi K，Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum [J]. Electron. Lett.，1980，16(16)：630-631.

作者简介：

白清松(1992—)，男，四川省巴中市人，博士，工程师，主要从事光学微腔、微腔光学频率梳、半导体激光器、光频原子钟等方面的研究。