

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: ZHU Tao, DANG Laiyang, LI Jiali, et al. Narrow Linewidth Laser Technology and Development (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8):0851503

朱涛,党来杨,李嘉丽,等. 窄线宽激光器技术及进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(8):0851503

## 窄线宽激光器技术及进展(特邀)

朱涛,党来杨,李嘉丽,兰天意,黄礼刚,史磊磊

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**窄线宽激光器具有极高的光谱纯度、极大的峰值谱密度、超长的相干长度和极低的相位噪声,因而作为核心光源在引力波探测、光学时钟、冷原子物理、相干光通信、光学精密测量以及微波光子信号处理等领域中具有重要应用。激光及应用研究的深入开展,对激光器的综合参数性能提出了更高的要求,窄线宽激光器正沿着线宽超窄、时频超稳、波长可调和波长可扫等方向发展。立足激光腔内自发辐射与受激辐射的互作用原理,对激光腔的架构进行深入研究是目前实现窄线宽激光参数极致调控的重要研究思路之一。为了抑制自发辐射对受激辐射能量的扰动,激光自发明以来,逐渐发展了主腔激光、固定外腔反馈激光和自适应分布反馈激光等构型的激光器。其中,基于自适应分布反馈的激光架构主要是基于分布反馈对主激光腔内自发辐射的时空随机微扰进行深度抑制,达到对激光线宽进行波长自适应压缩的目的。本文首先介绍了窄线宽激光器的应用需求与架构演化脉络,随后介绍了主腔激光和固定外腔反馈激光的研究进展。然后重点介绍了新近发展的自适应分布反馈窄线宽激光器,对该类新型激光器的物理思想、核心器件和系统性能进行了分析和讨论。最后以分布式光纤传感、激光相干通信以及片上光信息处理作为典型应用领域介绍了窄线宽激光器的潜在应用,并展望了窄线宽激光器的发展前景和未来趋势。

**关键词:**激光;窄线宽;相干性;自适应分布反馈;瑞利散射;光纤传感;相干通信;片上光子

中图分类号:O432.1+1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225108.0851503

### 0 引言

自 1960 年第一台红宝石激光器问世以来<sup>[1-2]</sup>,激光波长、功率以及线宽等参数性能不断提升,推动了制造业、生命科学、信息技术、科学研究和国防等领域的快速发展<sup>[3-7]</sup>。其中,激光线宽是决定激光相干性的关键因素,一直是科学家们研究激光技术的重点。激光线宽存在的本质在于激光运转过程中会受到增益介质中自发辐射引起的相位和强度扰动影响,使得激光输出信号的频率存在高斯白噪声,从而引起激光谱线呈现洛伦兹线型的本征展宽<sup>[8-10]</sup>。此外,激光器也容易受到外部环境中温度变化和振动带来的经典噪声的影响,进一步拓宽了激光线宽。以上因素使得激光相干性大幅降低,在很大程度上限制了基于高相干激光的科学研究和工业应用领域发展。因此,激光线宽压缩技术已经成为获得高相干光源的关键科学问题。随着激光及应用研究的深入开展,对激光器的综合参数性能提出了越来越高的要求,窄线宽激光器正沿着线宽超窄、时频超稳、波长可调和波长可扫等方向发展。

为了有效抑制腔内自发辐射对受激辐射的时空扰动,并在此基础上进行时频参数的任意调控,激光自发明以来,逐渐发展了主腔激光、固定外腔反馈激光和自适应分布反馈激光等构型的激光器。在第一阶段,人们主要研究具有单纵模输出特性的主腔激光,通过在激光腔内插入滤波元件并尽量缩小激光腔长,确保激光有效增益带宽范围内仅有单个纵模获得激射。采用的激光主腔结构主要包括分布布拉格反射结构

基金项目:国家自然科学基金(No. 61635004),国家杰出青年科学基金(No. 61825501),重庆市自然科学基金创新研究团队资助项目(No. cstc2020jcyj-cxttX0005)

第一作者:朱涛(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为可控激光与精密测量。Email: zhutao@cqu.edu.cn

收稿日期:2022-06-12;录用日期:2022-07-14

<http://www.photon.ac.cn>

(Distributed Bragg Reflector, DBR)、分布反馈结构(Distributed Feedback, DFB)、非平面环形腔结构(Nonplanar Ring Oscillator, NPRO)、布里渊增益腔结构以及复合腔结构<sup>[11-15]</sup>。以稀土掺杂光纤激光和半导体激光为例,它们因为具有寿命长、尺寸小、成本低、可靠性高以及易于产业化等优点,被作为单纵模窄线宽激光主腔的主要增益介质体系<sup>[16-17]</sup>。对于光纤激光器,由于光纤较强的光局域作用易于实现模场匹配,因此利用光纤光学元件可实现低损耗、可集成以及易控制的功能器件,易于探索主腔激光的自发辐射耦合与参数的调控机制。但是光纤主腔激光器通常具有较大的腔长和较小的纵模间隔,易形成多纵模输出<sup>[18-19]</sup>,一般强度噪声比较高。而半导体激光器具有较平坦和大范围的增益谱特性,同时可实现片上集成,基于此研制的单纵模窄线宽主腔激光器具有小型化、易于调控和规模化制造的优势。然而,在主腔激光器中,由于腔内光子寿命有限,其线宽通常维持在几十kHz甚至MHz量级,一般相位噪声比较高,难以适应激光应用技术对线宽参数越来越高的要求<sup>[20-23]</sup>。在第二阶段,人们通过在主腔激光外引入平面反射镜、反射光栅等固定外腔的方式,延缓自发辐射与受激辐射的耦合速率,这种反馈方式为了有效提高激光腔内的光子寿命,不得不采用较大的反馈腔长和反馈强度,导致反馈信号对激光主腔能量形成强烈的修正,容易造成激光腔内相位和频率发生突变,最终导致多纵模激光输出<sup>[24-25]</sup>。采用窄带滤波元件对固定外腔光反馈的多纵模进行抑制,工艺上需要精确控制主腔激光波长与反馈腔谐振波长进行匹配,即便如此也容易在温度变化和机械振动等应用环境中失锁,且难以再次自动调节锁定,不利于恶劣环境或便携要求的工业应用。因为科学研究的需要,人们引入了腔外伺服电学反馈的激光稳频技术,利用这种光电反馈方式可以将主腔激光的频率稳定性提高到与参考频率相同的水平,然而相应的光学频率基准通常采用放置于高真空、极限控温和隔振的单晶硅谐振腔、光纤干涉仪、冷原子吸收体等窄带滤波元件<sup>[26-28]</sup>,制作技术难度大、控制精度高、成本高昂且在恶劣工业环境使用受限。近10年来,课题组独立提出基于自适应分布反馈的激光谐振腔架构,在减弱自发辐射和受激辐射耦合强度的同时,可以避免反馈能量对受激辐射能量的破坏,从而实现激光线宽的深度压缩和波长自适应<sup>[29-30]</sup>。在这种新型激光架构中,基于分布反馈提供的时空固定微扰,可以对激光腔内自发辐射的时空随机微扰进行深度抑制,由于分布反馈结构在任意激光波长处均能工作,且该结构的时空分布特征具有对受激辐射的频率和相位进行连续微弱修正的作用,并不破坏激光的频谱能量分布,因此可以对激光线宽进行波长自适应压缩<sup>[31]</sup>。在这种激光架构基础上,国内外窄线宽激光的最新研究不断提出了各种具有分布反馈特征的元器件对激光线宽进行深度压缩<sup>[32-37]</sup>,取得了很好的实验结果,并且这类窄线宽激光器的产业化也在快速推进。各类窄线宽激光器的不断发展将会进一步推动光学时钟、光学频率梳、相干光通信、超精密测量和微波光子信号处理等领域的发展。

本文从激光构型的角度综述了窄线宽激光器技术的起源和发展历程,并对不同架构下窄线宽激光器的优缺点进行了总结和分析。重点介绍了基于自适应分布反馈的激光器线宽压缩机制、核心器件以及激光系统最新的研究进展。在此基础上,介绍了窄线宽激光器对分布式光纤传感、激光相干通信以及片上光信息处理等典型应用领域的性能进行提升的案例。最后对窄线宽激光器技术的发展做出了总结和展望。

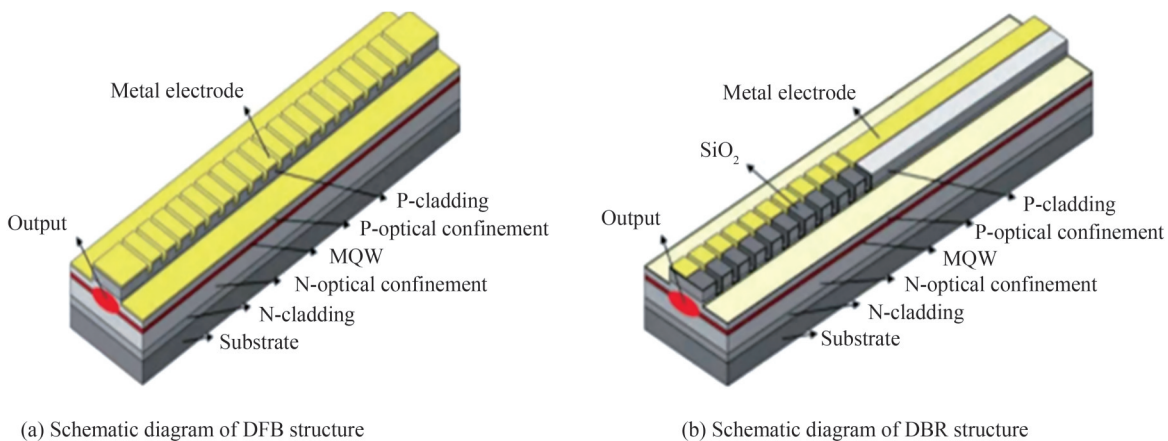
## 1 主腔窄线宽激光器

要使激光器实现单纵模窄线宽,首先要抑制激光多纵模输出,获得稳定的单纵模激光,即在激光器的增益带宽内有且仅有一个纵模运转。到目前为止,实现单纵模运转的方法主要有两大类:1)在确定增益带宽内增大纵模间隔;2)在确定纵模间隔下减小增益带宽。按照激光器腔体结构的不同,窄线宽激光器的主腔构型有线形腔和环形腔。对于线形腔激光器来说基本采用缩短谐振腔长度以增大纵模间隔,这类结构适合半导体激光器和光纤激光器。线形腔具有结构简单、工作稳定的优点,但由于腔内激光为驻波,存在空间烧孔效应,因此不能简单通过增加腔长实现线宽压缩。同短线形腔相比,环形腔结构通过利用较长的腔体结构增加了光子在激光腔中的寿命,有助于获得更小的激光线宽,同时有利于消除空间烧孔效应,以直接获得较高功率和能量的输出。但环形腔激光器在增大腔长的同时也会减小纵模间隔,导致选模结构复杂且容易跳模<sup>[38]</sup>。本节介绍线形与环形主腔结构的窄线宽激光器。

### 1.1 线形主腔激光器

以分布反馈(DFB)结构、分布布拉格反射(DBR)结构等为主的线型腔窄线宽激光器由于谐振腔较短,

约为厘米量级以下,增大了纵模间隔,是实现单纵模运转的方式之一。其中,半导体激光器受激发射的物理过程与增益材料有源区内的电子-空穴对的运动密切相关,对于窄线宽半导体激光器,利用半导体激光器较宽的增益谱结合光栅的选频特性,可以较为理想地实现半导体激光器的模式选择,因此,按照布拉格光栅分布位置的不同,可分为DFB半导体激光器和DBR半导体激光器。DFB半导体激光器的布拉格光栅分布于整个谐振腔,如图1(a)所示,具有较高的频率稳定性;DBR半导体激光器的谐振腔通常由反射光栅结构和增益区构成,如图1(b)所示,输出功率高,输入电流大,但易功率抖动<sup>[39]</sup>。20世纪70年代,美国贝尔实验室KOGELNIK H和SHANK C V首次提出了DFB主腔激光器的结构,研究了由后向布拉格散射提供反馈的周期结构中激光振荡过程,其反馈结构分布在增益介质中并与增益介质集成,因而此类激光构型非常紧凑和稳定<sup>[40]</sup>;1973年,美国加州理工大学的NAKAMURA M等利用光泵方式在GaAs材料上制作了第一只受激谱宽为0.83  $\mu\text{m}$ 的DFB半导体激光器<sup>[41]</sup>,此后,通过采用先进的光栅制备技术和芯片外延技术,国内外研究机构致力于研发能满足不同需求的窄线宽、高效率、高功率激光器。2013年,美国加州大学圣芭芭拉分校BELT M等在一个超低损耗的氮化硅上设计了一组掺铒波导分布反馈激光器,通过在氮化硅层中刻蚀提供激光反馈的侧壁光栅,实现了在12 nm(1 531~1 543 nm)波长范围内5个单独的激光器阵列输出,其输出激光线宽为501 kHz<sup>[42]</sup>;2018年,法国巴黎萨克莱大学DUAN J等提出了一种基于InAs/InP量子点分布反馈激光器,所提出的激光器利用化学束外延(CHEMICAL BEAM EPITAXY, CBE)的方法在n型InP基板上生长,激光器的未掺杂活性区由5层堆叠的InAs量子点组成,通过制备条纹宽度为3  $\mu\text{m}$ 、空腔长度为1 mm的脊形波导激光器,在端面涂层以改变激光腔的反射率,利用这种设计,激光器输出线宽为160 kHz<sup>[43]</sup>;2019年,美国加州大学圣芭芭拉分校HUANG D等设计了一种III-V增益材料与15 nm长的硅波导布拉格反射结构集成的E-DBR激光器,该激光器由一个2.5 mm长的增益部分、一个0.3 mm长的相位控制部分和一个15 mm长的布拉格光栅组成,通过在结构中引入半径为0.7 mm的环形谐振器,实现了500 Hz的窄线宽输出<sup>[44]</sup>。

图1 线形主腔激光器结构示意图<sup>[39]</sup>Fig. 1 Schematic diagram of linear main cavity laser<sup>[39]</sup>

窄线宽光纤激光器依赖于各种激射波段的传输光纤和增益掺杂光纤,主要利用高掺杂增益光纤结合光栅刻蚀或其他反射结构来实现,激光腔体结构以DFB、DBR和法珀结构为主,线宽可以达到kHz量级。2004年, SPIEGELBERG C等利用由铒镱共掺的磷酸盐光纤和一对具有高低反射率的布拉格光栅所组成的DBR短腔结构,获得了输出线宽小于2 kHz的激光输出<sup>[45]</sup>。华南理工大学于2017年设计并制作了一种基于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤( $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped Phosphate glass Fiber, EYPF)的DBR激光器,激光器通过16 mm长的EYPF结合高反射光纤布拉格光栅(Highly Reflective Fiber Bragg Gratings, HR-FBG)和部分保偏FBG(Polarization Maintaining FBG, PM-FBG)构建,实现了功率为20 mW、线宽为1.9 kHz、波长为1 603 nm的激光输出,其实验结构如图2所示<sup>[46]</sup>。2021年,美国Cybell公司WALASIK W等通过在掺铒光纤内刻写高反射率和低反射率的光栅,设计了一种工作波长在2 051 nm和2 039 nm处的DFB-FBG掺铒光纤激光器,激光输出线宽为5 kHz<sup>[47]</sup>。基于光纤的DFB激光器基本原理跟半导体DFB激光器类似,只不过光纤DFB激光器是



在增益光纤上写性能良好的Ⅱ相移布拉格光栅来实现线宽压缩。

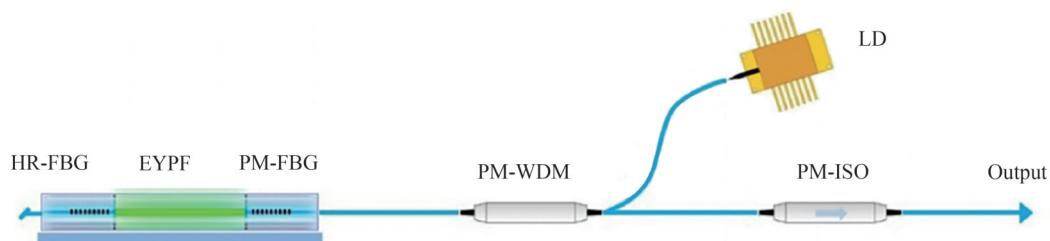
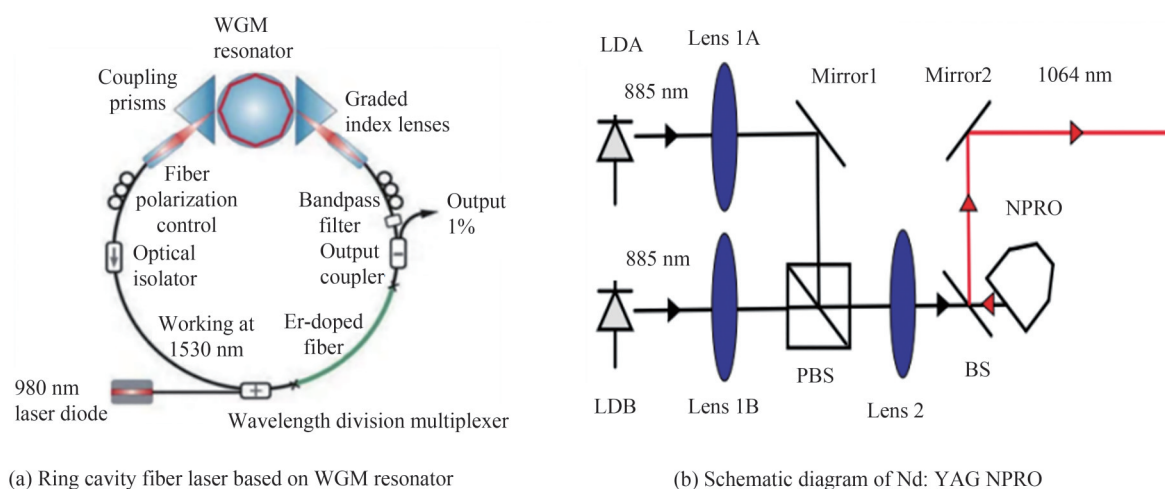


图2 1603 nm DBR 光纤激光器<sup>[46]</sup>

Fig. 2 1603 nm DBR fiber laser<sup>[46]</sup>

## 1.2 环形主腔激光器

环形腔结构是实现激光器单纵模输出的另一种架构,旨在通过增加腔长和光子在激光腔内的循环时间来减小线宽。环形腔窄线宽激光器结构多变,线宽可达到 kHz 量级,与线性腔结构相比,可以消除空间烧孔效应,但由于环形腔激光器为全光纤结构,易受环境影响,强度噪声相对较高。2007年, SUZUKI A 等通过将保偏的相移光栅和光纤环形激光腔结合的方式实现了输出线宽为 6 kHz 的单纵模激光输出<sup>[48]</sup>;2014年,德国马克斯-普朗克研究所 COLLODO C 等将高品质因子( $10^8$ )的  $\text{CaF}_2$  回音壁(Whispering Gallery Mode, WGM)微腔应用于掺铒环形腔光纤激光器中,实现了波长为 1530 nm、瞬时线宽为 650 Hz 的激光输出,其结构如图 3(a)所示<sup>[49]</sup>;2021年,天津大学利用 3 m 长的荧光掺杂光纤(NufernSM-TSF-9/125)的饱和吸收效应结合高反射 FBG,提出了一种输出功率为 2.56 W、激光线宽为 3.3 kHz 的光纤环形腔激光器<sup>[50]</sup>;同年,河北大学提出了一种复合环形腔光纤激光器,利用 2.9 m 长的掺铒光纤,结合四通道偏振控制滤波器,实现了线宽小于 600 Hz、相对强度噪声小于  $-154.58$  dB/Hz 的激光输出<sup>[51]</sup>。除全光纤结构之外,非平面环形腔(NPRO)激光器也可以实现窄线宽输出,20世纪80年代,NPRO激光器的概念被首次提出,KANE T J 等阐述了一种固态非平面内反射环形激光器,包括具有两个镜面的单片固态激光器,这两个镜面用于定向改变光线的传播路径,当镜面位于足够强度的磁场中时,激光将以单一模式发射<sup>[52]</sup>;1989年,ALAN C N 等指出,在外加磁场中,二极管激光泵浦的单片非平面环振荡器可以作为单向行波激光器工作,二极管激光泵浦、单片结构和单向振荡导致了较窄的线宽辐射,他们原理上分析了 NPRO 激光器的偏振特性,并为进一步降低 NPRO 激光器的线宽提供了理论支撑<sup>[53]</sup>。此后,科学家致力于研究泵浦效率和斜率效率更高的 NPRO 激光器。NPRO 激光器具有腔内损耗低、强度噪声低和输出稳定等优势<sup>[54]</sup>,图 3(b)是一种典型的 NPRO 激光器构型。2018年,中国计量科学研究院通过二极管激光器直接将增益介质  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  泵浦到亚稳态能级,当在 1064 nm 波长条件下输入 7.6 W 的泵浦功率时,激光输出功率可以达到 4.54 W,且其斜率效率可以达到 76.9%,其结构如图 3(b)所示<sup>[55]</sup>。



(a) Ring cavity fiber laser based on WGM resonator

(b) Schematic diagram of Nd:YAG NPRO

图3 环形主腔激光器结构示意图<sup>[49,55]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of ring main cavity laser<sup>[49,55]</sup>



## 2 固定外腔反馈窄线宽激光器

固定外腔光反馈技术是一种基于主腔激光外部光学元件的激光调控方法,其主要通过单面或少面的具有时空固定反馈特性的光学元件对主腔激光的频率进行选择 and 反馈。由于增加外部反馈腔长有利于提高腔内光子寿命,因此基于此方法是获得窄线宽激光器的一种常用手段<sup>[39]</sup>。由于固定外腔反馈会引起主腔激光的相位突变,因此该类激光器的实际输出激光频率通常会较大幅度地偏离原主腔激光频率,且容易引起激光多纵模振荡。为了提高激光频率的稳定性及频谱边模抑制比,通常需要引入窄带滤波元件,包括布拉格光栅和法珀腔滤波器等,这要求主腔激光的频率与滤波元件的谐振频率进行严格匹配,限制了对激光线宽进行深压缩的能力,并极大地提高了固定外腔反馈激光对温度和振动等环境参数的控制要求,不利于工业化应用。以下从半导体激光和光纤激光两方面介绍固定外腔反馈窄线宽激光器的主要结构。

### 2.1 外腔反馈半导体激光器

外腔反馈半导体激光器利用外部光学元件对半导体激光芯片的出射光进行频率选择和反馈,根据外部光学反馈元件的不同,外腔反馈半导体激光器可以分为光栅反馈型和波导反馈型半导体激光器<sup>[39]</sup>。其中,常见的光栅反馈型激光器包括 Littrow<sup>[56]</sup>或 Littman<sup>[57]</sup>结构以及采用体光栅<sup>[58]</sup>反馈等激光构型,其输出线宽可以达到 kHz 量级。近年来,国内外研究人员致力于制作低损耗的硅波导结构,以降低半导体激光器的频率噪声和强度噪声。2009年,澳大利亚昆士兰大学 MCRAE T G 等利用微环谐振腔对半导体激光器的热光锁定效应,将线宽从 1.4 MHz 压缩到 300 kHz,同时实现了超过 12 h 的稳定锁定,其实验结构如图 4 所示<sup>[59]</sup>。2017年,美国哥伦比亚大学 STERN B 等设计并制作了一种基于低损耗氮化硅波导耦合到 III-V 增益芯片的片上集成窄线宽激光器,利用高 Q 的谐振环作为外腔反馈器件,实现了 13 kHz 线宽的激光输出<sup>[60]</sup>。2019年,美国加州大学圣芭芭拉分校 XIANG C 等利用超低损耗氮化硅波导制作了布拉格光栅,将半导体增益芯片耦合到光栅芯片上,实现了 320 Hz 线宽的激光输出,同时输出功率达到 24 mW<sup>[61]</sup>。2016年,中科院上海光机所将 DFB 激光器自注入锁定到 FBG-法布里珀罗(Fabry Perot, FP)腔透射谱的不同共振透射峰上,实现了频率噪声为 40 Hz<sup>2</sup>/Hz、线宽约为 1 kHz 的窄线宽输出,其实验结构如图 5 所示<sup>[62]</sup>。

外腔光反馈半导体激光器虽然结构简单,但由于半导体激光增益介质的等离子色散效应,激光器的强

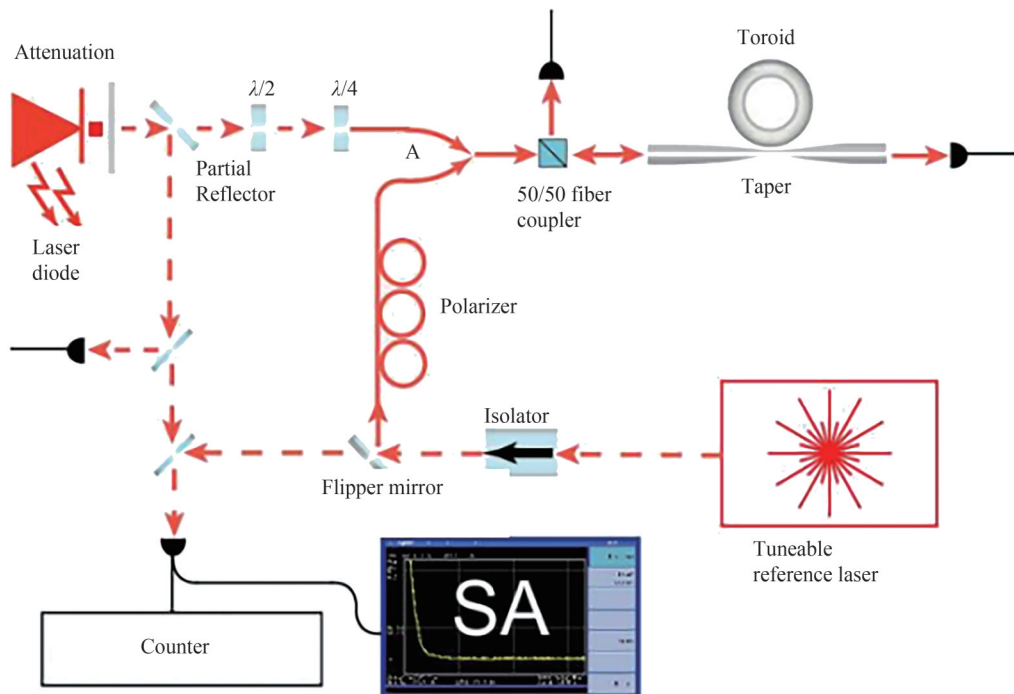
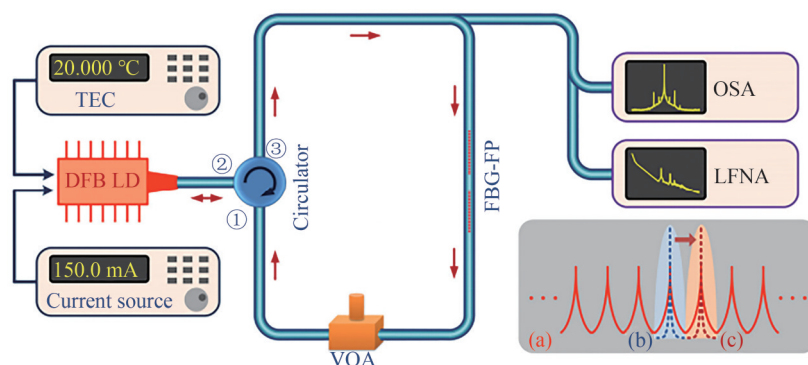


图 4 基于微环谐振腔热光锁定的窄线宽激光系统<sup>[59]</sup>

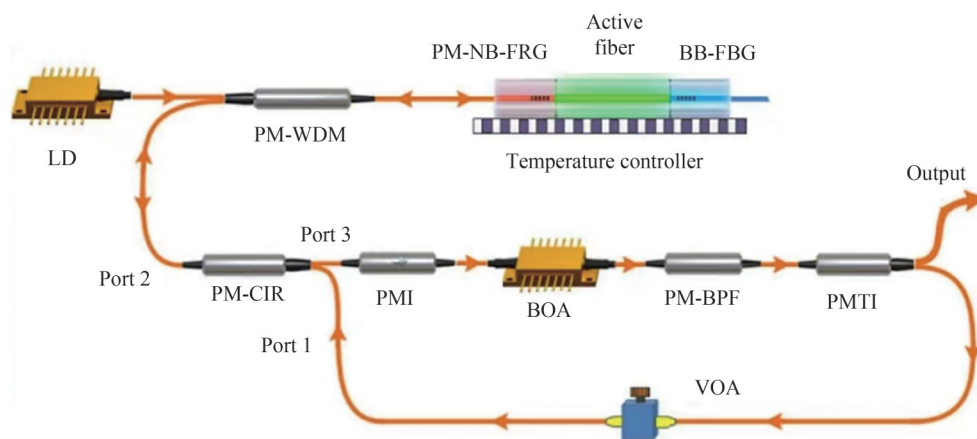
Fig. 4 Narrow linewidth laser system based on microring resonator thermo-optic locking<sup>[59]</sup>

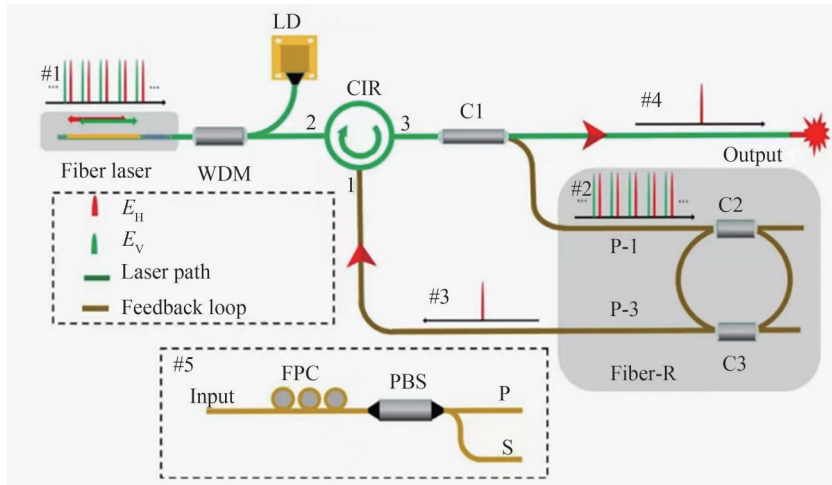
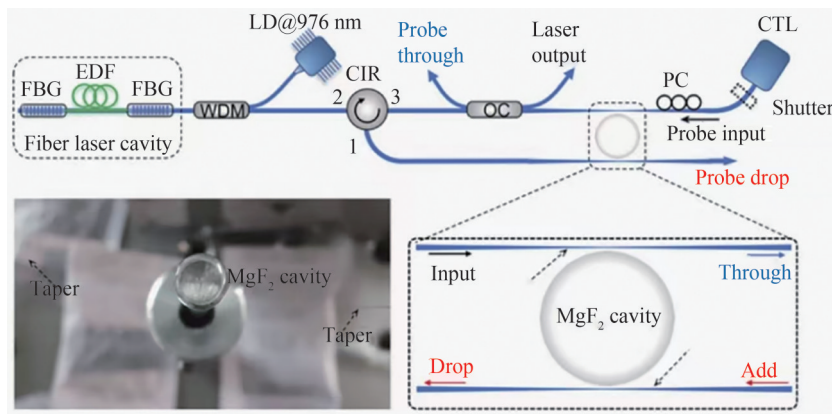
图5 基于FBG-FP自注入锁定的DFB窄线宽激光器系统<sup>[62]</sup>Fig. 5 DFB narrow linewidth laser system based on FBG-FP self-injection locking<sup>[62]</sup>

度抖动会在半导体增益区转化为折射率的变化,从而引起激光器频率和相位抖动的加剧。因此,利用固定外腔反馈对半导体激光器线宽进行压缩时,反馈强度过强,会引起线宽劣化,甚至出现混沌输出,失去单频特性,相干性反而会大幅度下降<sup>[63-67]</sup>。

## 2.2 外腔反馈光纤激光器

外腔反馈光纤激光器通常采用外腔中的光功率回馈注入光纤激光主腔,从而对激光的输出频率进行锁定。在自注入锁定结构中,反馈腔的长度和回馈光功率的比例是实现线宽压缩的重要因素。2007年,中科院半导体所结合光注入反馈技术获得了可调谐的单纵模窄线宽激光输出,通过将复合腔与光纤F-P可调谐滤波器相结合来构造激光器,在1 527~1 562 nm的波长范围内实现了1.4 kHz的单纵模窄线宽激光输出<sup>[68]</sup>; 2016年,华南理工大学以铟镱共掺磷酸盐光纤作增益的短腔激光器为主腔,结合自注入反馈方法,在1 527 nm到1 563 nm的波长范围内实现了对应线宽小于700 Hz单纵模激光输出<sup>[69]</sup>; 2018年,他们利用如图6所示的自注入反馈技术,有效抑制了模式跳变及频率漂移,输出的激光线宽窄于600 Hz<sup>[70]</sup>。2021年,南京大学将两个1/99的光纤耦合器制成一个长度为1.61 m, Q值为 $1.42 \times 10^8$ 的光纤环形谐振器,通过将光纤激光器自注入锁定到该环形谐振器上,实现了单纵模的选择和线宽的窄化,该结构实现了40 dB的高偏振消光比、频率噪声为 $0.3 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ 、对应线宽为0.92 Hz的单纵模激光输出,其实验结构如图7所示<sup>[71]</sup>。2022年,江苏师范大学沈德元团队提出了一种基于晶体谐振器的自注入锁定窄线宽光纤激光器,实现了频率噪声为 $0.4 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ ,对应的瞬时线宽为1.26 Hz的窄线宽激光输出,其中,晶体谐振器由两根平行的拉锥光纤(直径为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ )和一个氟化镁晶体组成Q值为 $3.2 \times 10^8$ 的Add-Drop结构,光纤激光器由一根50 cm长的掺铒光纤(Er-Doped Fiber, EDF)和两个FBG组成,FBG的反射率分别为99.3%和11.7%,其实验结构如图8所示<sup>[72]</sup>。

图6 基于自注入反馈的窄线宽激光系统<sup>[70]</sup>Fig. 6 Narrow linewidth laser system based on self-injection feedback<sup>[70]</sup>

图7 基于光纤环形谐振器窄线宽光纤激光器系统<sup>[71]</sup>Fig. 7 Narrow linewidth fiber laser system based on fiber ring resonator<sup>[71]</sup>图8 基于Add-Drop结构的窄线宽光纤激光器系统<sup>[72]</sup>Fig. 8 Narrow linewidth fiber laser system based on Add-Drop structure<sup>[72]</sup>

### 3 自适应分布弱反馈窄线宽激光器

基于自适应分布弱反馈的窄线宽激光器,主要通过外部微弱的分布扰动信号来有效抑制激光腔的自发辐射,从而在常态条件下实现激光线宽深度压缩。

#### 3.1 激光线宽深压缩思想

针对已经发展的主腔激光器和固定外腔激光器的优点和缺陷,我们提出了一种基于自适应分布弱反馈的激光器模型。与传统的固定外腔光反馈相比,该激光结构提供了一种新颖的激光配置,以实现激光线宽的极致压缩,如图9(a)所示。其中,具有增益介质的主激光腔利用泵浦技术产生了初始宽带增益。随后,经过初始增益振荡和纵模竞争后,初始激光信号从主腔的一侧输出到自适应分布反馈腔中。激光线宽展宽的原因是激光能量循环往复地与自发辐射进行能量耦合,导致腔内激光频率受到周期性的随机干扰,形成谱线展宽。为了减弱自发辐射的耦合强度,引入了自适应分布反馈结构。分布弱反馈深度压缩激光线宽的关键作用,首先是利用分布反馈增加了激光在腔内的循环时间,降低自发辐射的噪声耦合速率,从而大幅度减小激光的本征线宽;其次是分布式弱反馈可以认为是在时域上对激光相位的连续修饰,因为单个散射点的反馈强度甚至比自发辐射还要弱(如图9(a)的插图所示),它可以避免传统的固定腔反馈所引起的时域相位突变,而传统的固定腔反馈通常会形成较强的多纵模竞争。分布式弱反馈不仅可以通过抑制自发辐射对主腔激光产生的时空微扰从而降低自发辐射的耦合速率,而且能够保持激光器的单纵模工作状态,并实现激光线宽的极致压缩。因此,基于弱分布反馈,主腔内每个运转周期自发辐射引起的相位波动( $\Delta\phi$ )和噪声耦合强度大幅降低,如图9(b)所示。因此,在相位噪声抑制过程中,激光线宽可得到极大的压缩,如图9(c)所示。



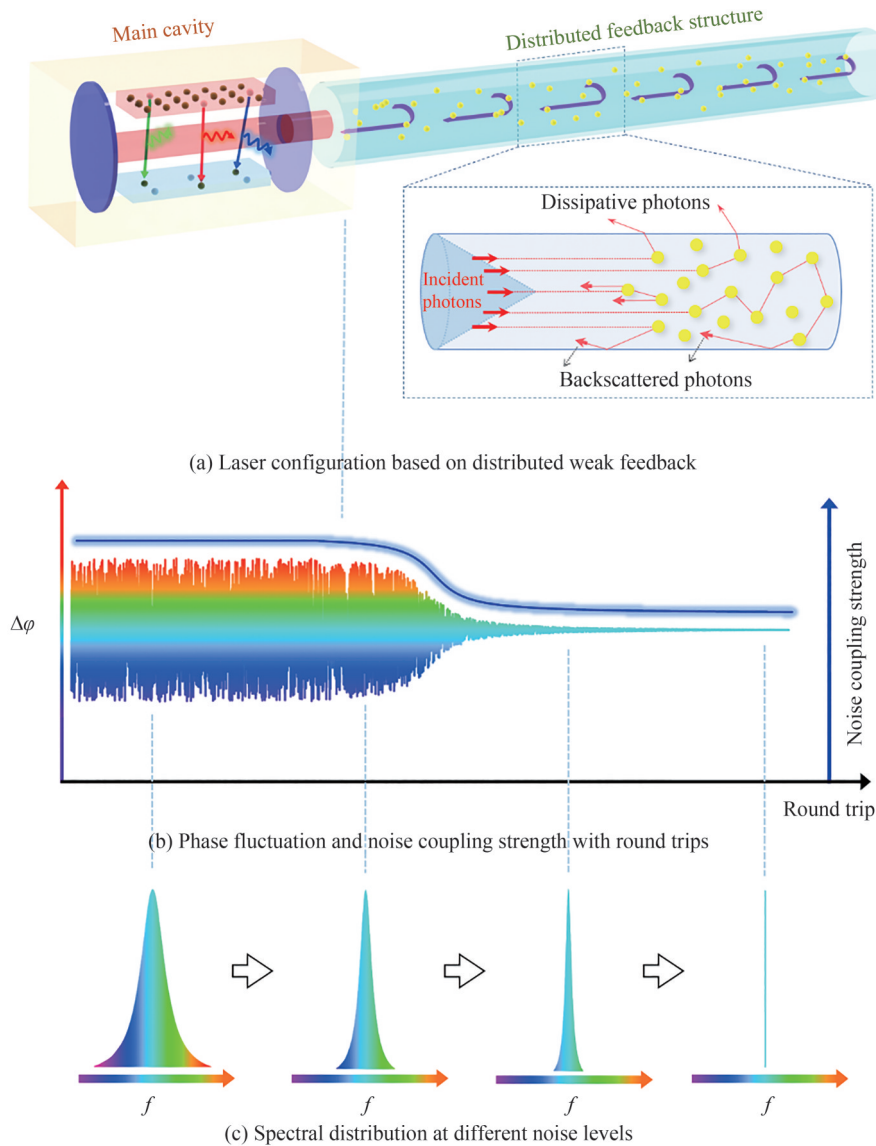


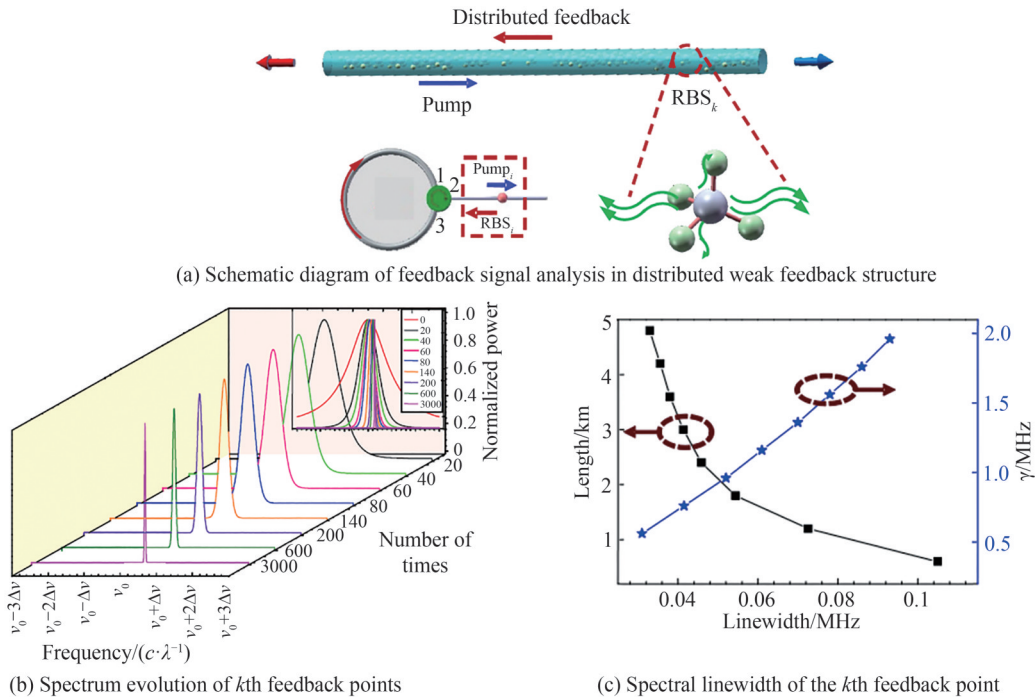
图9 基于分布弱反馈的激光线宽压缩原理

Fig. 9 Principle of laser linewidth compression based on distributed weak feedback

### 3.2 分布弱反馈结构中的光谱演化

目前,自适应分布反馈窄线宽激光的研究主要集中于对反馈元件的开发和制造,这是因为不同性质的反馈元件使激光器表现出不同的输出特性。我们研究了一维波导分布弱反馈结构中的光谱演化规律,从本质上揭示了光谱演化的动态过程。根据 Jaynes-Cummings 理论模型<sup>[73-75]</sup>,并考虑反馈结构的耗散<sup>[76]</sup>,建立了一个基于瑞利散射的分布弱反馈光谱演化模型,如图 10(a)所示<sup>[77]</sup>。理论计算在连续散射过程中光谱线宽的演化过程,结果表明分布反馈结构相当于一个连续纯化光谱的动态净化器。由于在泵浦光传输过程中对每个散射源都可进行连续的散射,散射场的谱线宽度随着第  $k$  阶散射点运转次数的增加而减小,如图 10(b)所示。如图 10(c)所示,黑色方形曲线显示了在分布弱反馈结构中连续散射过程中,第  $k$  阶反馈点谱线宽度与传输距离  $L$  的关系。可以看出,随着反馈点距离  $L$  的增加,每个反馈点的谱线宽度都会减小;蓝色的五角星曲线反映了连续散射过程中反馈结构中散射粒子的掺杂浓度对反馈点光谱演化的影响。意味着每个反馈点的谱线宽度会随着掺杂浓度的增加而减小。在理论假设的基础上,提出了一个近似的理论预测,描述了散射场谱线宽与传输长度  $L$  的关系。最终理论揭示了在连续散射过程中能够分离和收集散射场的条件下,构建一种分布式弱反馈结构能够实现线宽压缩的可行性。

为了进一步研究分布弱反馈结构中光谱演化规律,我们开展了对分布反馈结构频谱的实验探究,其测量

图10 分布弱反馈结构光谱演化理论分析<sup>[77]</sup>Fig. 10 Principle of spectral evolution of distributed weak feedback structure<sup>[77]</sup>

装置如图11(a)所示<sup>[78]</sup>。实验中,泵浦光是线宽为6 MHz的DFB激光器,由30 dB的高增益掺铒放大器放大,并用隔离器将弱反射信号与环形器隔离。将泵浦光注入到分布反馈结构后,使用滤波器对受激布里渊散射进行过滤,最终得到分布反馈信号光。通过调节掺铒光纤放大器的增益来改变发射到分布反馈结构中的泵浦功率。采用一种自外差测量方法对输出信号进行测量。图11(b)表示随功率增加泵浦光的频谱演化,可以看出在200 MHz的频率跨度其频谱宽度相对较宽。与此同时,随着泵浦功率的增加,分布弱反馈信号的频谱宽度被大幅度压缩,如图11(c)所示。同时,其对应的3 dB线宽随泵浦功率的变化如图11(d)所示,泵浦光经过反馈结构反馈信号的线宽从初始的6 MHz被大幅度压缩至4 kHz。另外,产生窄线宽信号的输出功率和效率如图11(e)所示,可以看出,泵浦功率为13 dBm时,最大反射功率效率为0.02%。尽管在分布反馈结构中一次往返使反馈信号的反射功率效率很低,如图11(e)所示,然而,由于掺铒光纤的毫秒弛豫时间,后向散射的瑞利信号可以在多次往返中被相干放大,从而很大程度减小激光器的线宽<sup>[79]</sup>。最终实验测量的分布反馈结构中光谱演化与理论计算结果符合较好,进一步证明了这种分布反馈信号能实现对激光线宽极致压缩的可行性。

为了进一步提高分布式反馈结构对激光波长变化的适应能力,加拿大渥太华大学BAO X研究组于2022年通过飞秒激光处理提出并实现了具有分布式反馈特性的光纤光栅阵列<sup>[80]</sup>。具体是采用刻面划痕法沿保偏光纤(PM)制备了光栅阵列。该方法通过飞秒红外脉冲激光曝光,对PM光纤的折射率进行散斑处理。光栅阵列原理和随泵浦量增加的光传输原理如图12(a)所示。使用分辨率为5 MHz的光学频谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)测量了分布式反馈光栅阵列的反射和透射光谱,如图12(b)所示。结果表明,在1550 nm波长处的平均透过率为-20 dB,对应的透过率为0.01,并且在反射谱显示出大量的谱峰,且谱线宽度较窄。这种分布反馈特性体现在强散射无序介质中,多个散射路径的波干涉导致了光子的局域化。此外,俄罗斯科学院自动化与电力研究所的SERGEY A B研究组报告了一种极短(10 cm)的低损耗人工瑞利分布反射器的研制<sup>[81-82]</sup>。为了制作致密的人造瑞利散射光纤,他们采用飞秒激光直写技术实现了对透明材料内部折射率分布的校正。这种方法可以在几乎任何类型的纤维中诱导任意几何形状的散射结构,因此可以很好地替代纳米粒子掺杂的纤维,而不会破坏保护涂层的完整性。折射率调制波导记录的实验原理如图12(c)所示。这里采用光频域反射法(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)测量反馈结构在空间中的光场分布,其平均分布反馈电平比普通单模光纤高+41.3 dB/mm,如图12(d)所示。结果表明,在一维波导结构上制作的人工分布式反馈结构具有较强的反馈能力和波长适应性。

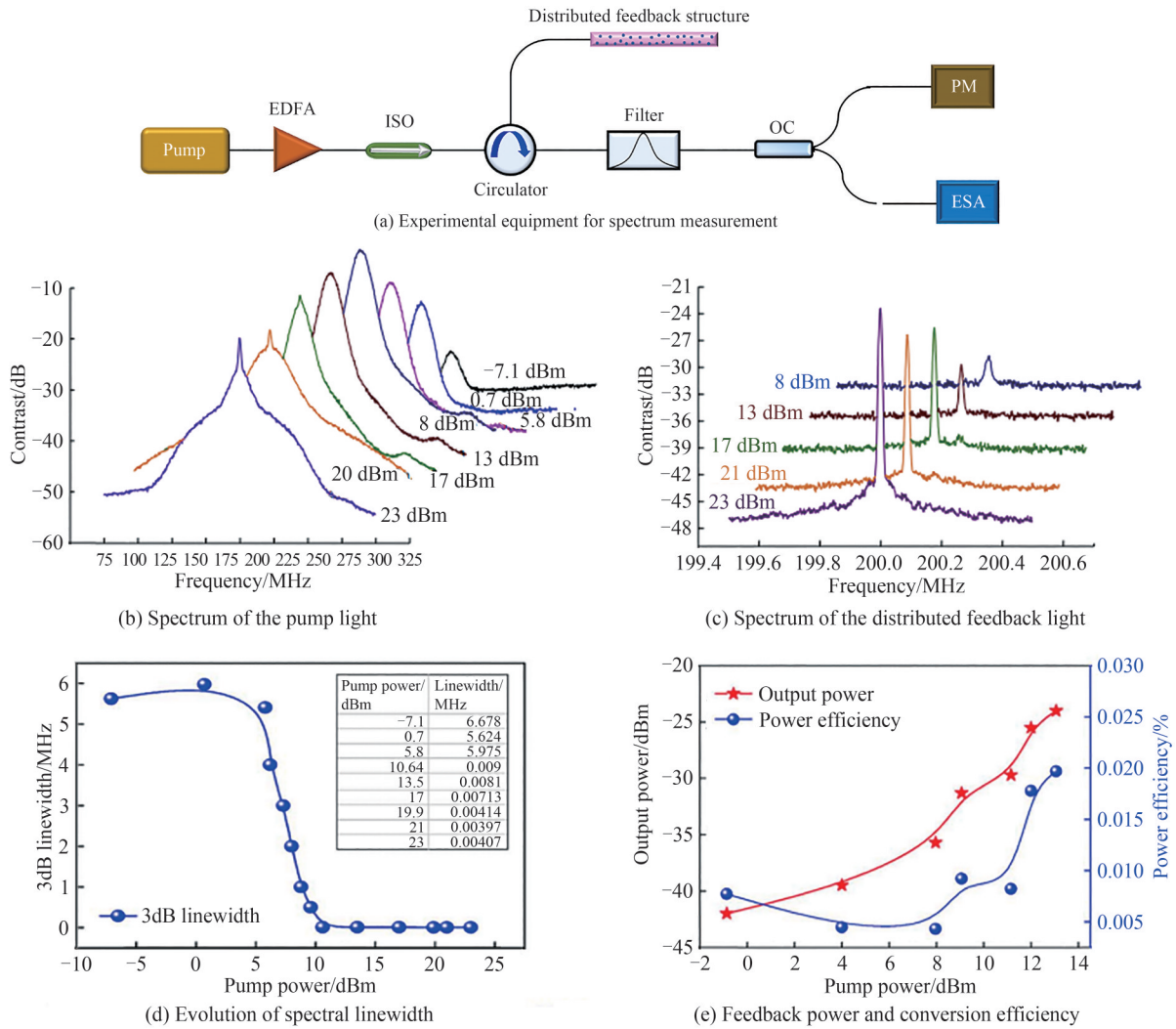


图 11 分布反馈结构中光谱演化的实验探究<sup>[78-79]</sup>

Fig. 11 Experimental investigation of spectral evolution in distributed feedback structures<sup>[78-79]</sup>

在一维波导提供波长自适应分布反馈的启示下,研究者提出了另一种减小激光线宽的有效方法,即利用高品质因子(Q)谐振腔提供可积累的离散分布光反馈,其噪声抑制程度与Q因子的平方成正比。其中,高Q微谐振器是实现大幅度线宽窄化的优秀候选器件,但是波长选择性也给控制带来困难。2012年,美国加州理工学院 VAHALA K J 团队通过化学刻蚀在硅基上实现了具有超高Q因子楔形微谐振器<sup>[83]</sup>。图 13(a)展示了光学显微俯视图以说明所述谐振器几何结构和基模强度分布。最终测得了谐振器的扫描光谱,其具有 0.3 MHz 的超窄滤波带宽,如图 13(b)所示。另外,谐振器的自由光谱区对其性能也至关重要,通过对 5 种不同直径微腔的测量可知,自由光谱区随直径增大而减小,如图 13(c)所示。在 2022 年的最新研究报告中,中科院上海光学精密机械研究所提出并制备了一种 Q 因子达到铌酸锂材料本征吸收极限的微环谐振器<sup>[84]</sup>。从图 14(a)的光学显微图可得知这种微环直径为 200  $\mu\text{m}$ ,且具有超光滑的表面特性。图 14(b)显示了微环在 1 566~1 570 nm 波长范围内的透射光谱,表现出两组高阶横电(TE)和横磁(TM)模式。并且两种模式对应的 Q 因子都达到了  $10^7$  量级,这是目前所报道的铌酸锂晶体微环 Q 因子最高值。值得提及的是南京大学刘晓平团队提出了一种利用光频域反射法(OFDR)提取光学微环谐振腔损耗特性的新方法<sup>[85]</sup>。与传统的光传输测量方法相比,OFDR 获得的空间分辨后向散射光信号可以清楚地显示谐振模由于腔内循环而增加的光路长度。另外,这种后向散射光与前向透射光一样都具有波长分离的分布反馈特性。因此,这种高 Q 值微腔可作为典型弱分布反馈元件应用于激光器的线宽压缩,从其扫描光谱也可得知这种高 Q 值微腔具有很强的波长选择性。



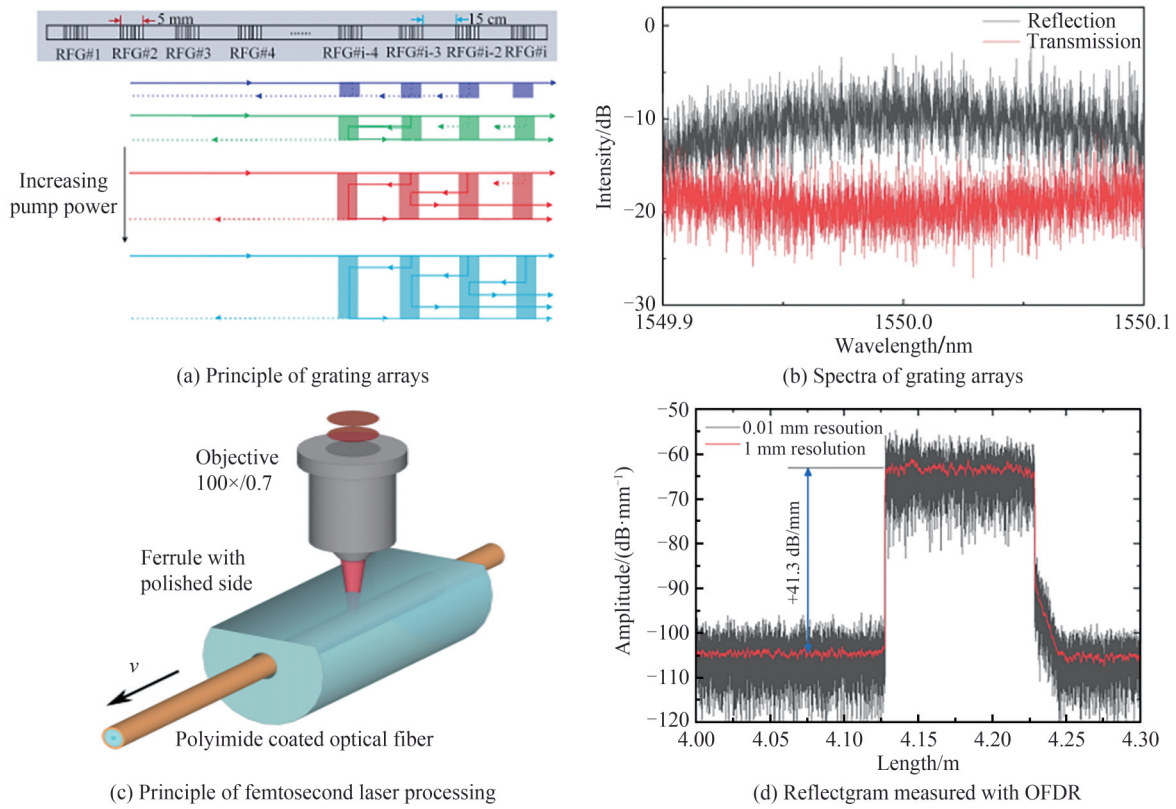


图 12 人造分布反馈短波导结构的原理及输出特性<sup>[80-82]</sup>

Fig. 12 Principle and output characteristics of artificial distributed feedback short waveguide structures<sup>[80-82]</sup>

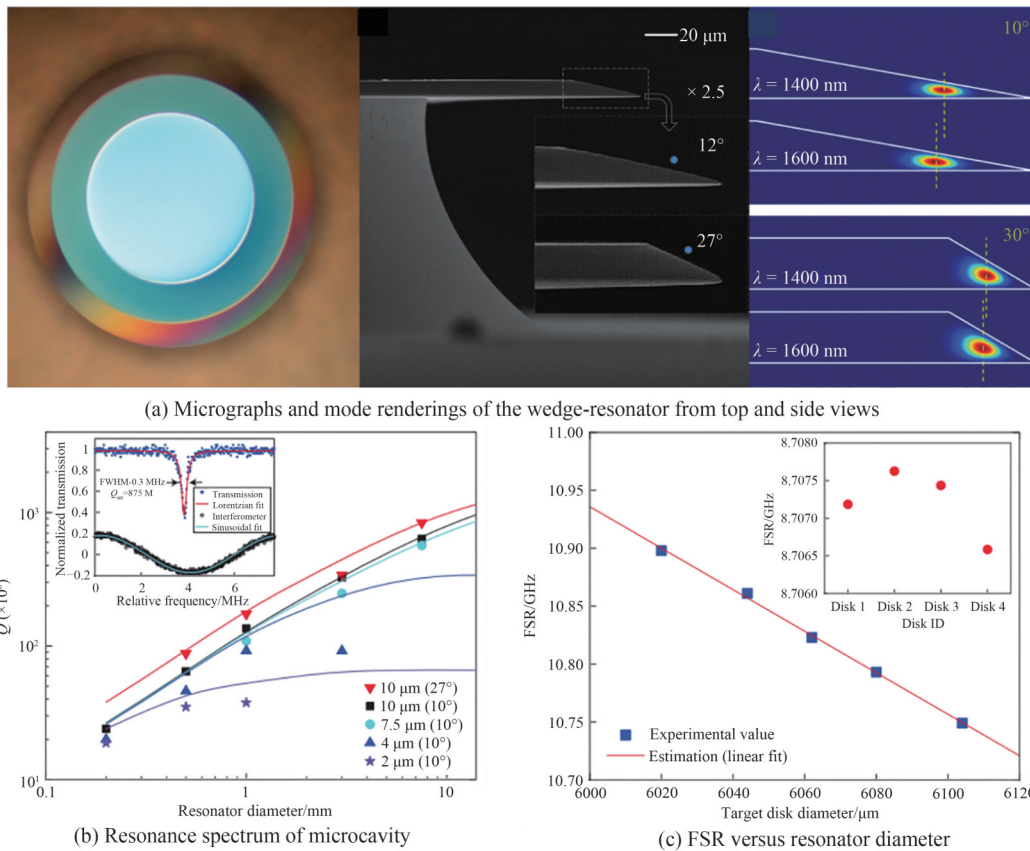
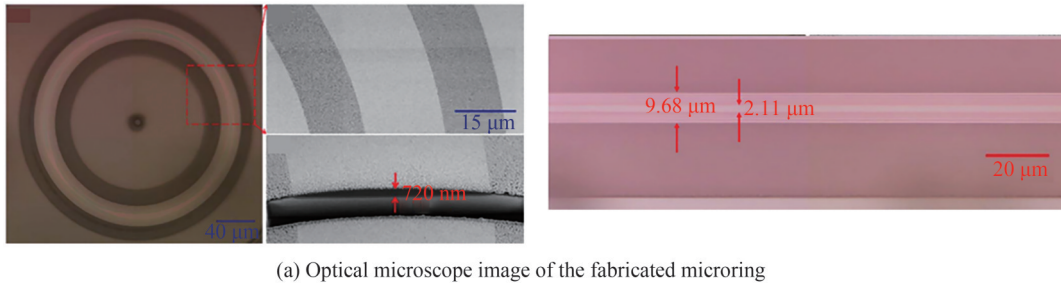
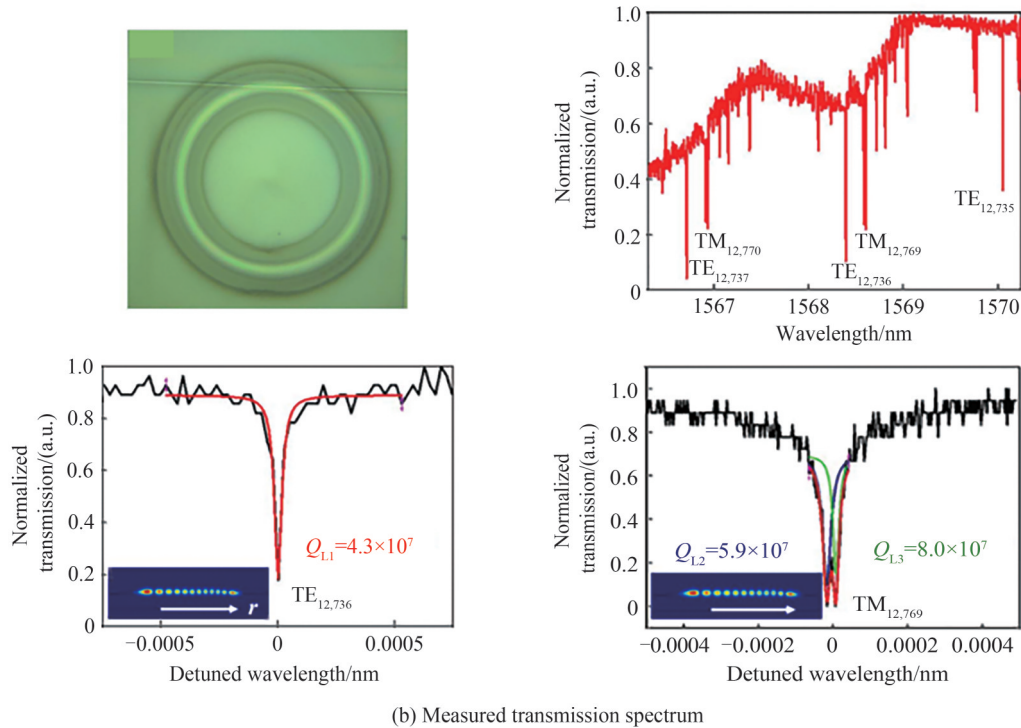


图 13 超高 Q 楔形谐振器及输出特性<sup>[83]</sup>

Fig. 13 Ultra-high Q wedge resonator and output characteristics<sup>[83]</sup>



(a) Optical microscope image of the fabricated microring



(b) Measured transmission spectrum

图 14 超高 Q 铌酸锂微环及光学特性<sup>[84]</sup>Fig. 14 Lithium niobate microring with ultra-high Q factor and optical properties<sup>[84]</sup>

### 3.3 自适应窄线宽光纤和半导体激光器

主腔结合固定外腔光反馈的激光构型属于单点强功率反馈,会造成主腔信号相位突变,为激光主腔引入新的纵模,不能保证线宽压缩过程中激光的单纵模运转。为了实现激光线宽极致压缩且波长自适应的激光源,2010年开始,团队提出了一系列能在宽波长范围内产生分布反馈信号的结构,如光纤、掺稀土离子波导、微环等微纳结构。2010~2013年,我们提出了主腔效果不太明显的基于瑞利散射回馈的窄线宽激光器<sup>[79, 86-87]</sup>,达到了1~2 kHz的线宽,但稳定度不佳。2014年,将分布反馈结构和稳定的激光主谐振腔结合,实现了对光纤激光器线宽的大幅度压缩,达到了200 Hz线宽压缩<sup>[88]</sup>,如图15(a)所示。另外,也将这种分布反馈机制应用于双波长和可调谐激光器中,实现了对不同波长激光线宽的同时压缩<sup>[89-90]</sup>,如图15(b)所示。然而,这种激光配置较长的激光腔使其容易受到外部环境中温度波动和振动引起的热动力学噪声的影响,同时较长的激光谐振腔不利于激光器朝着小型化方向发展。在2022年,为了实验探究分布反馈结构可保持激光单纵模运转且宽范围波长调谐能力,搭建了多纵模主腔结合分布反馈结构的光纤激光系统,实现了边模抑制比为70 dB高信噪比单频激光输出<sup>[91]</sup>,如图15(c)所示。另外,通过对主腔输出的激光波长的调节实现了波长范围为40 nm的超窄线宽激光输出,其调谐范围主要受到滤波器调谐能力的限制,如图15(d)。该实验结果表明在不同波长通道下激光都可保持单纵模运行,提出的分布反馈结构具有波长自适应的边纵模抑制能力。

在保证引入分布反馈不会引入新的共振模式造成多纵模振荡的基础上,为了进一步实现对激光线宽的极致压缩,我们基于分布反馈线宽极致压缩的思想搭建了一种单纵模DFB激光主腔结合分布反馈结构的混合集成式片上激光系统<sup>[29]</sup>,如图16(a)所示。基于该实验系统在常态条件下获得了积分线宽为10 Hz的激光

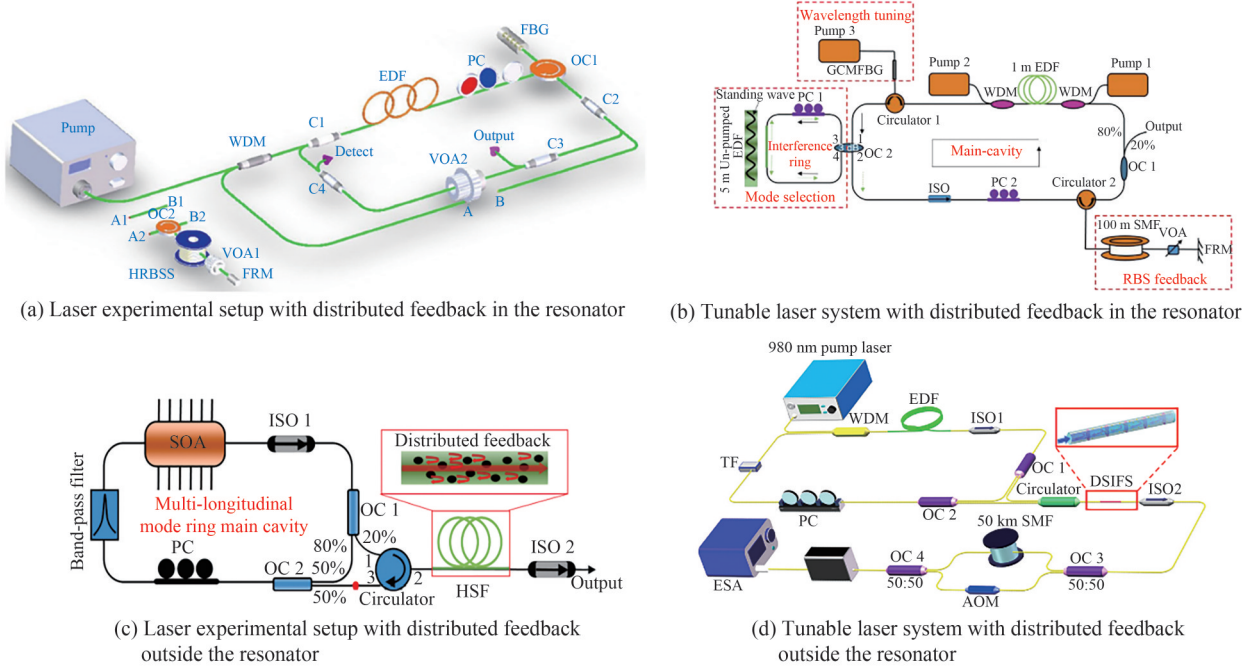


图 15 基于分布弱反馈的自适应光纤激光器 [88,90-91,31]  
 Fig. 15 Self-adaptive fiber laser based on distributed weak feedback [88,90-91,31]

输出,如图 16(b)所示。另外,如图 16(c),在切换主腔 DFB 激光波长时通过对频谱的动态测量可知激光器可以自动实现不同波长条件下的线宽压缩,这是目前其它外腔反馈机制无法满足的。进一步论证了这种分布式反馈机制可以实现激光线宽的极致压缩,并且可实时跟踪匹配主腔波长的变化。另外,为了满足千赫兹以下激光线宽测量的需求,我们提出了基于短光纤延迟自外差并利用相干包络谱的谱峰差值来对超窄激光线宽进行精确探测的思想 [92-93]。该方法可以有效消除延迟自外差干涉测量中心频率处高斯线型对线宽测量的影响,从而实现对百 Hz 甚至 Hz 级别激光器线宽的精确探测。

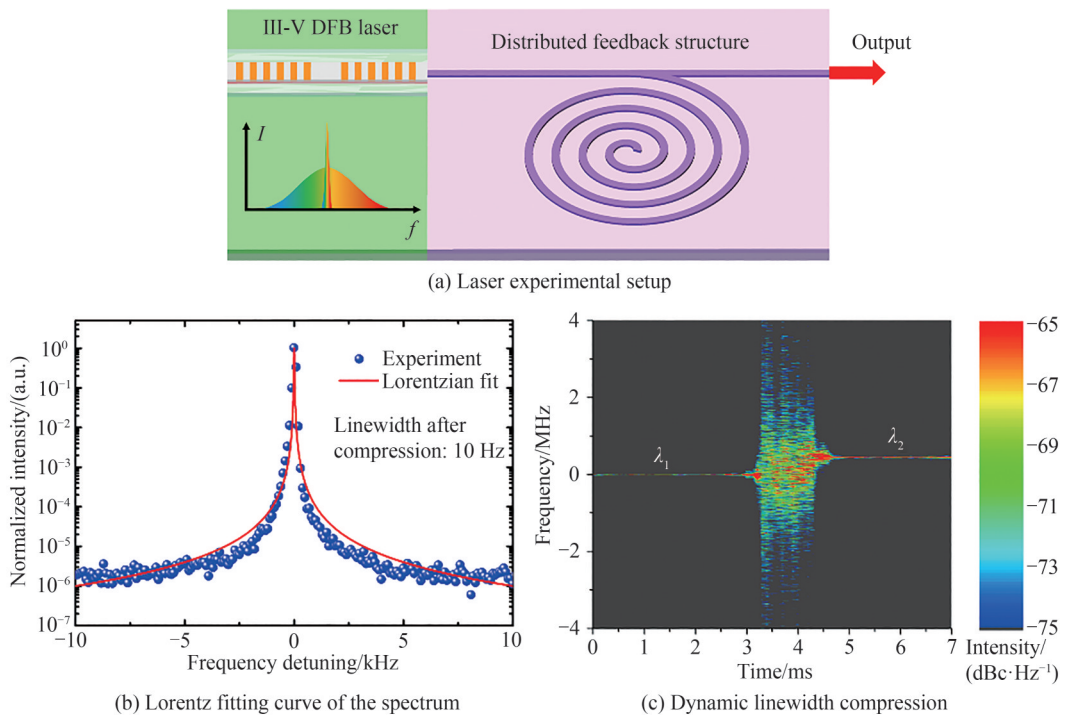


图 16 基于分布反馈混合集成片上激光器 [29]  
 Fig. 16 An on-chip laser system based on distributed feedback [29]



另外,基于回音壁微腔等有效积累波长离散分布反馈能量的紧凑型光学元件可在保证激光良好的单纵模运转情况下实现激光线宽的极致压缩,这也是分布反馈思想的良好应用案例<sup>[77]</sup>。2015年,美国OEwaves公司MATSKO A B等设计了一种品质因子高达 $6 \times 10^8$ 的氟化钙( $\text{CaF}_2$ )回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)微腔,当光注入到微腔内其表面产生后向共振瑞利散射形成分布式弱反馈信号,并将其与DFB激光器结合通过棱镜耦合形成分离式外腔半导体激光器,结构如图17(a)所示<sup>[94]</sup>,最终实现了30 Hz积分线宽和Hz以下瞬时线宽的激光输出。2021年,美国加州理工学院VAHALA K J团队报道了在大容量互补金属氧化物半导体(CMOS)铸造中制备氮化硅波导的重要进展,实现了超过 $2.6 \times 10^8$ 品质因子的高集成谐振器。通过分布反馈信号自注入锁定传统半导体分布反馈(DFB)激光器到超高Q微谐振器上,形成混合集成激光器,装置如图17(b)所示<sup>[95]</sup>。最终将激光频率噪声抑制了5个数量级,在高偏置频率下产生 $0.2 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ 的频率噪声,其对应的瞬时线宽为1.2 Hz,这是以前集成激光器无法达到的水平。然而,回音壁微腔具有特定的谐振波长,因此其具有的波长选择性会限制对主激光腔的波长适应性,无法在常态条件下实现连续大范围激光波长调谐。清华大学陈明华团队也采用类似分布回馈的思想在混合集成的半导体激光器中实现了线宽压缩<sup>[96]</sup>,但是如果要实现自适应和高稳定,通过微环谐振腔构成的离散分布反馈或通过特殊波导构成的连续分布反馈就是重要的技术手段,其核心思想都是团队提出的自适应分布反馈激光器新架构。

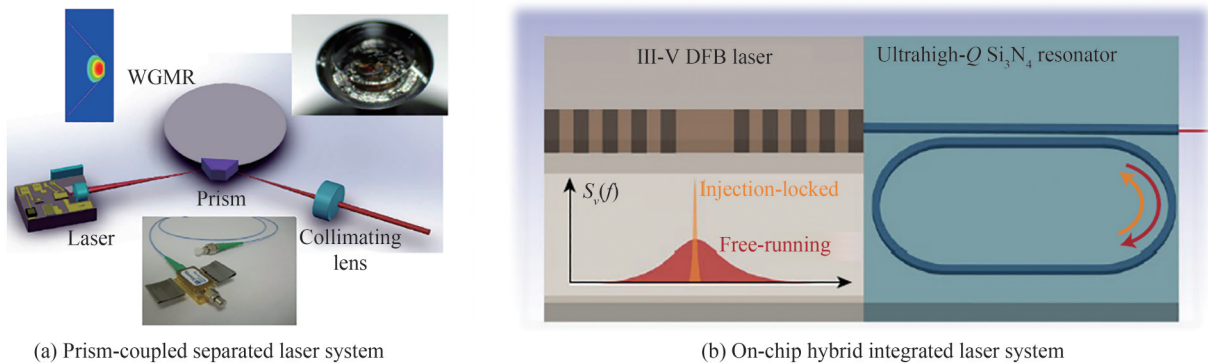


图 17 基于超高 Q 值微谐振腔窄线宽激光器<sup>[94-95]</sup>

Fig. 17 Narrow linewidth laser based on ultra-high Q micro resonator<sup>[94-95]</sup>

## 4 窄线宽激光器的典型应用

窄线宽激光器具有相干长度超长、相位噪声极低的优点,在光学传感、相干光通信和微波光子学系统等领域具有非常重要的研究价值和应用前景,本节将重点介绍窄线宽激光器在分布式光纤传感、激光相干通信以及片上光信息处理中的应用。

### 4.1 分布式光纤传感

随着对距离、精度的测量要求不断提高,分布式光纤传感系统中激光光源的性能提升至关重要。如在布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术中,光源的线宽决定了温度和应力的测量分辨率;在相干光频域反射(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)技术中,可调谐的激光光源是影响 OFDR 性能的关键因素,激光光源的相干性越好,系统的传感距离和测量精度越好;在相位干涉光时域反射(Phase Optical Time Domain Reflectometry,  $\phi$ -OTDR)技术中,超窄的激光光源线宽可以增强反射信号的干涉强度,进而大大提高测量灵敏度。2016年,意大利那不勒斯大学 MINARDO A 等利用输出线宽为 100 kHz 的外腔激光器,结合布里渊光频域反射(Brillouin Optical Frequency Domain Reflectometry, BOFDR)技术,在 5 km 的光纤长度上对 1 m 空间分辨率的布里渊频移进行了分布式测量<sup>[97]</sup>;2017年,南京大学张旭莘团队提出了一种基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)技术和互补编码相结合的 BOTDR 技术,该技术以线宽为 10 kHz 的 DFB 激光器为光源,达到 2 m 的空间分辨率,频率不确定度为 0.37 MHz,对应于  $0.37^\circ\text{C}$  温度分辨率或  $7.4 \mu\epsilon$  应变分辨率<sup>[98]</sup>;2020年,法国诺基亚贝尔实验室 AWWAD E 等提出了一种分布式声传感(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技术,利用 OEwaves 公司生产的在  $10 \mu\text{s}$  窗口处洛伦兹线宽低于 1 Hz 的超窄线宽激光器结合差分相位光学时域反射法( $\Delta\phi$ -OTDR)技术,

对 50 km 以上单模光纤的多个振动事件进行了检测和识别,其实验系统如图 18 所示<sup>[99]</sup>。

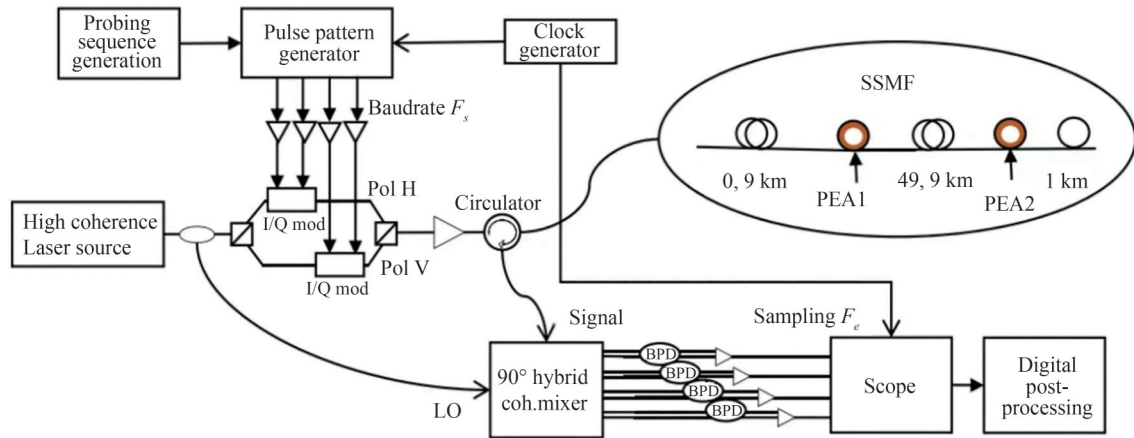


图 18 基于窄线宽激光器的分布式传感系统<sup>[99]</sup>

Fig. 18 Distributed sensing system based on narrow linewidth laser<sup>[99]</sup>

## 4.2 激光相干通信

信号的传输容限和距离是相干光通信系统中重要的限制因素,高阶光调制和相干检测等方式为信号的长距离和大容限传输提供了优秀的解决方案,在相干光通信系统中,窄线宽激光器为其提供了稳定的光源。高阶相位调制对激光线宽有很高的要求。以能够对信号的幅度信息和相位信息同时进行调制的  $m$  进制正交幅度调制 ( $m$ -Quadrature Amplitude Modulation,  $m$ -QAM) 为例,当系统采用 Square 16QAM 调制格式时,其激光线宽的容限在 120 kHz 左右,而采用 Square 64QAM 调制格式时,则要求激光线宽低于 1.2 kHz<sup>[100]</sup>。2016 年,武汉邮电科学研究院提出了一种基于硅基微环谐振器外腔的可调谐激光器,输出的激光线宽约为 150 kHz,其结构如图 19 所示,测试了偏振多路复用的 16 位正交幅度调制 (16-QAM) 格式下的信号传输速率,与稳定的商用窄线宽激光光源进行比较,商用窄线宽激光光源仅优于该系统 0.2 dB<sup>[101]</sup>。2018 年,美国哥伦比亚大学 GUAN H 等提出了一种硅基混合外腔可调谐激光器,该结构将一个 III-V 半导体增益芯片嵌入到硅芯片中,由环形谐振器构成反馈外腔,激光线宽达到 37 kHz,在 16QAM 格式下,传输速率达到 272 Gb/s,首次实现了完整的硅光子相干通信传输链<sup>[102]</sup>。

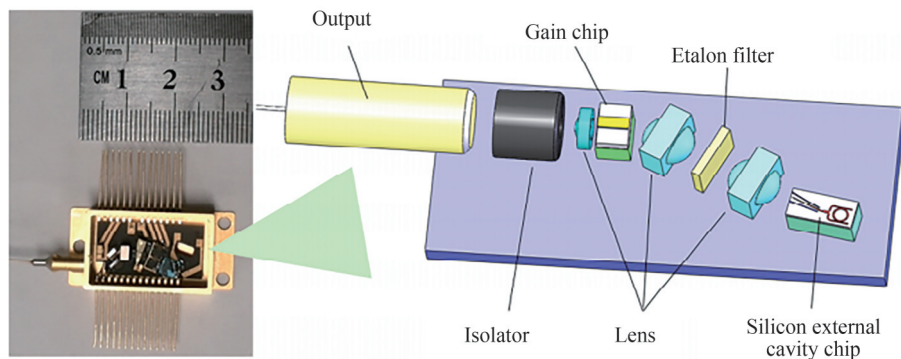


图 19 基于硅基微环谐振器的可调谐激光结构<sup>[101]</sup>

Fig. 19 Structure diagram of tunable laser based on silicon microring resonator<sup>[101]</sup>

## 4.3 片上光信息处理

随着硅光子学的发展,窄线宽激光器的片上集成成为国内外研究的热点之一,硅基光集成器件具有尺寸小、功耗低、易于与 CMOS 工艺兼容等优点,是实现微波光子、光频梳等系统小型化、集成化、低成本的途径之一。近年来,随着工艺的不断成熟,窄线宽激光器在微波光子、光频梳等应用领域的作用日益突出。2020 年,美国加州理工学院 VAHALA K J 团队设计了一种集成孤子微光梳芯片,通过将 DFB 激光器锁定到四个高 Q 的氮化硅微谐振器上,实现了重复频率低至 15 GHz 的微梳<sup>[103]</sup>。近期,北京大学使用铝砷化镓

(AlGaAs)上的微谐振器结合DFB激光器产生微光频梳,如图20所示,构建了高度集成的高可重组微波光子信号,实现了集成的光子链路传输<sup>[104]</sup>。利用光外差法是产生纯微波信号的重要方法,其核心是利用两束相关的光波在光电探测器(Photoelectric Detector, PD)中拍频,调节两束激光的工作波长,可方便地调节拍频信号的频率至微波波段。为了获得高质量微波源,对窄线宽激光器的线宽特性、频率稳定性和精密调谐性具有非常高的要求,这是因为微波光子信号的时频稳定性主要取决于激光器的线宽特性,低噪声微波光子信号的处理通常要求激光线宽达到Hz乃至Hz以下量级,同时微波信号的可调谐特性取决于窄线宽激光器的精密调谐能力。

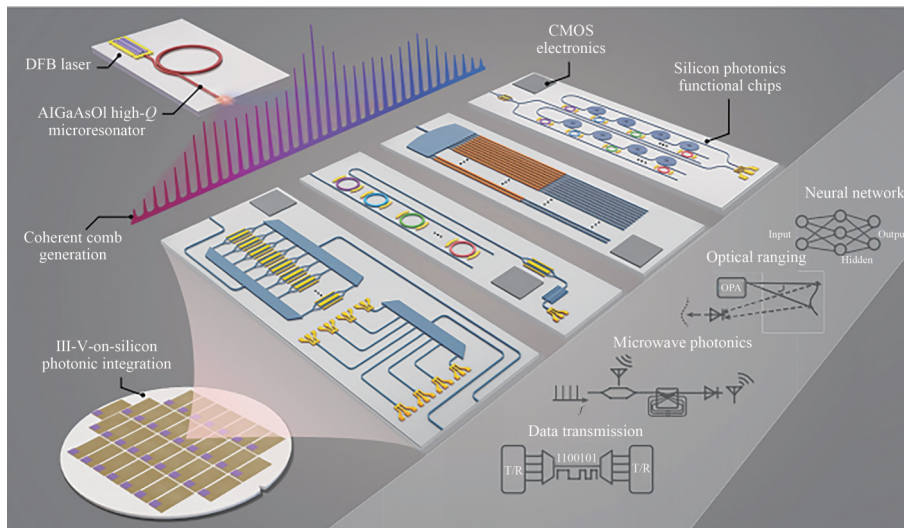


图20 基于片上光频梳的光电子系统结构示意图<sup>[104]</sup>

Fig. 20 Schematic diagram of photoelectronic system based on on-chip optical frequency comb<sup>[104]</sup>

## 4 结论

回顾过去几十年窄线宽激光器的整体发展历程,其研究已从具有简单固定外腔激光结构的实现、参数性能的提升,发展至更深层面自适应分布反馈新型激光构型的探索。例如,从最初具有固定外腔为主的激光构型到具有连续反馈特性的新型激光机制的开发应用,其激光线宽也从最初的几十kHz量级窄化至Hz量级,线宽特性发生了质的飞跃。基于自适应分布反馈窄线宽激光架构的发展,这种从“无序产生有序”的调控思想会进一步促进激光参数调控的深入研究。随着多种具有分布反馈特征光学元件的提出与实现,工业应用级的激光器正在快速跨越千赫兹和赫兹量级,亚赫兹量级的超窄线宽激光器也会快速出现。根据现有理论可知,利用自适应分布弱反馈可实现激光线宽Hz以下量级的压缩,但激光腔在受到外界温度波动和振动影响的情况下,仍然会造成线宽拓宽,因此需要更精细的技术实现对反馈结构的制作,实现结构紧凑、反馈功率适当或相位可控的人工可控反馈元件;另外,也需要对整个激光系统进行更高精度的恒温隔振控制。基于分布反馈的纯光学反馈特点,窄线宽激光器还将基于片上集成式反馈元件,实现与激光增益芯片的混合集成,为微纳光子学、片上光场调控、光量子调控和光电混合集成提供片上窄线宽光源方案。另一方面,分布反馈架构具有波长自适应特点,因此在线宽深压缩的基础上具有对波长进行精密和大范围调谐的巨大潜力。窄线宽激光的发展趋势不再局限于线宽参数性能的提升,更需要在窄线宽基础上实现具有大范围连续波长调谐的能力,以应对各种科学技术进步和工业应用发展的需求。

### 参考文献

- [1] MAIMAN T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] MAIMAN T H. Optical and microwave-optical experiments in ruby[J]. Physical Review Letters, 1960, 4(11): 564.
- [3] SONG Weilian. The developmental of laser processing technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(S): 755-758.  
宋威廉. 激光加工技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(S): 755-758.
- [4] MURRAY K K, SENEVIRATNE C A, GHORAI S. High resolution laser mass spectrometry bioimaging[J]. Methods, 2016, 104: 118-126.



- [5] PREDEHL K, GROSCHKE G, RAUPACH S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [6] UCHIDA A, AMANO K, INOUE M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 728-732.
- [7] WANG Ruifeng, ZHANG Yanpu, XU Zhiyan. Present situation and developing trend of application of laser technique to military[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 308-311.  
王瑞凤, 张彦朴, 许志艳. 激光技术军事应用的现状及发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 308-311.
- [8] GORDON J P, ZEIGER H J, TOWNES C H. The maser—new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer[J]. *Physical Review*, 1955, 99(4): 1264.
- [9] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers[J]. *Physical Review*, 1958, 112(6): 1940.
- [10] HENRY C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(2): 259-264.
- [11] GUAN B O, TAM H Y, LAU S T, et al. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 17(1): 169-171.
- [12] FOSTER S B, CRANCH G A, HARRISON J, et al. Distributed feedback fiber laser strain sensor technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3514-3530.
- [13] ZHENG Y, GAO C, WANG R, et al. Single frequency 1645 nm Er: YAG nonplanar ring oscillator resonantly pumped by a 1470 nm laser diode[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 784-786.
- [14] HUANG S, ZHU T, YIN G, et al. Tens of hertz narrow-linewidth laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5286-5289.
- [15] RYBALTOVSKY A A, BUTOV O V, VASILIEV S A, et al. Continuous-wave operation of an erbium-doped short-cavity composite fiber laser[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102832.
- [16] GRAVEL J F Y, DOUCET F R, BOUCHARD P, et al. Evaluation of a compact high power pulsed fiber laser source for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(7): 1354-1361.
- [17] WRIGHT M W, FRANZEN D A, HEMMATI H, et al. Qualification and reliability testing of a commercial high-power fiber-coupled semiconductor laser for space applications[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 054204.
- [18] LI R, MADAMPOULOS N, ZHU Z, et al. Performance comparison of an all-fiber-based laser Doppler vibrometer for remote acoustical signal detection using short and long coherence length lasers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5011-5018.
- [19] DANG L, HUANG L, CAO Y, et al. Side mode suppression of SOA fiber hybrid laser based on distributed self-injection feedback[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 147: 107619.
- [20] WANG Z, SHANG J, LI S, et al. All-polarization maintaining single-longitudinal-mode fiber laser with ultra-high OSNR, sub-KHz linewidth and extremely high stability[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107135.
- [21] LIU Y, ZHANG M, ZHANG J, et al. Single-longitudinal-mode triple-ring Brillouin fiber laser with a saturable absorber ring resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1744-1749.
- [22] JIANG L, SHI L, LUO J, et al. Narrow linewidth VCSEL based on resonant optical feedback from an on-chip microring add-drop filter[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2320-2323.
- [23] VOO N Y, HORAK P, IBSEN M, et al. Anomalous linewidth behavior in short-cavity single-frequency fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 546-548.
- [24] PETERMANN K. External optical feedback phenomena in semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1995, 1(2): 480-489.
- [25] CENDEJAS R A, PHILLIPS M C, MYERS T L, et al. Single-mode, narrow-linewidth external cavity quantum cascade laser through optical feedback from a partial-reflector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26037-26045.
- [26] HAMELIN B, YANG J, DARUWALLA A, et al. Monocrystalline silicon carbide disk resonators on phononic crystals with ultra-low dissipation bulk acoustic wave modes[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-8.
- [27] CHEN H, ZHANG S, FU H, et al. Sensing interrogation technique for fiber-optic interferometer type of sensors based on a single-passband RF filter[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2765-2773.
- [28] STACK D T, LEE P J, QURAISHI Q. Simple and efficient absorption filter for single photons from a cold atom quantum memory[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6822-6832.
- [29] DANG L, HUANG L, SHI L, et al. Ultra-high spectral purity laser derived from weak external distributed perturbation[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6: 210149.
- [30] LI F, IKECHUKWU I P, LAN T, et al. Rayleigh scattering assisted ultra-narrow linewidth linear-cavity laser[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8): 082001.
- [31] DANG L, HUANG L, LI Y, et al. A longitude-purification mechanism for tunable fiber laser based on distributed feedback[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(1): 206-214.

- [32] MA W, XIONG B, SUN C, et al. Linewidth narrowing of mutually injection locked semiconductor lasers with short and long delay[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1436.
- [33] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, et al. A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 687-692.
- [34] SPIRIN V V, ESCOBEDO J L B, KOROBKO D A, et al. Stabilizing DFB laser injection-locked to an external fiber-optic ring resonator[J]. Optics Express, 2020, 28(1): 478-484.
- [35] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, et al. A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 687-692.
- [36] LEWOCZKO-ADAMCZYK W, PYRLIK C, HÄGER J, et al. Ultra-narrow linewidth DFB-laser with optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Perot cavity[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9705-9709.
- [37] KOMLJENOVIC T, SRINIVASAN S, NORBERG E, et al. Widely tunable narrow-linewidth monolithically integrated external-cavity semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 214-222.
- [38] SHEN Rensheng, ZHANG Yushu, DU Guotong. Latest development of fiber lasers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(1): 1-5.  
申人升, 张玉书, 杜国同. 光纤激光器研究进展[J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 1-5.
- [39] LANG Xingkai, JIA Peng, CHEN Yongyi, et al. Advances in narrow linewidth diode lasers[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2019, 49(6): 649-662.  
郎兴凯, 贾鹏, 陈泳屹, 等. 窄线宽半导体激光器研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(6): 649-662.
- [40] KOGELNIK H, SHANK C V. Stimulated emission in a periodic structure[J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(4): 152-154.
- [41] NAKAMURA M, YARIV A, YEN H, et al. Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback [J]. Applied Physics Letters, 1973, 22: 515-516.
- [42] BELT M, HUFFMAN T, DAVENPORT M, et al. Arrayed narrow linewidth erbium-doped waveguide-distributed feedback lasers on an ultra-low-loss silicon-nitride platform[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4825-4828.
- [43] DUAN J, HUANG H, LU Z, et al. Narrow spectral linewidth in InAs/InP quantum dot distributed feedback lasers[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(12): 121102.
- [44] HUANG D, TRAN M, GUO J, et al. Sub-kHz linewidth extended-DBR lasers heterogeneously integrated on silicon [C]. 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), IEEE, 2019: 1-3.
- [45] SPIEGELBERG C, GENG J H, HU Y D, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57-62.
- [46] YANG C, GUAN X, LIN W, et al. Efficient 1.6  $\mu\text{m}$  linearly-polarized single-frequency phosphate glass fiber laser[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29078-29085.
- [47] WALASIK W, TRAORE D, AMAVIGAN A, et al. 2  $\mu\text{m}$  narrow linewidth all-fiber DFB fiber bragg grating lasers for Ho- and Tm-doped fiber-amplifier applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5096-5102.
- [48] SUZUKI A, TAKAHASHI Y, YOSHIDA M, et al. An ultralow noise and narrow linewidth  $\lambda/4$ -shifted DFB Er-Doped fiber laser with a ring cavity configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(19): 1463-1465.
- [49] COLLODO M C, SEDLMEIR F, SPRENGER B, et al. Sub-kHz lasing of a  $\text{CaF}_2$  whispering gallery mode resonator stabilized fiber ring laser[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19277-19283.
- [50] ZHANG J, SHENG Q, ZHANG L, et al. 2.56 W single-frequency all fiber oscillator at 1720 nm [J]. Advanced Photonics Research, 2021: 2100256.
- [51] FENG T, WEI D, BI W, et al. Wavelength-switchable ultra-narrow linewidth fiber laser enabled by a figure-8 compound-ring-cavity filter and a polarization-managed four-channel filter[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31179-31200.
- [52] KANE T J, BYER R L. Solid-state non-planar internally reflecting ring laser: US, US4578793 A[P]. 1986.
- [53] NILSSON A C, GUSTAFSON E K. Eigenpolarization theory of monolithic nonplanar ring oscillators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(4): 767-790.
- [54] WANG H, GAO M. High power single-frequency laser output from a diffusion-bonded monolithic nonplanar Ho: YAG ring oscillator[C]. 2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications, International Society for Optics and Photonics, 2020, 11437: 1143703.
- [55] DENG W, YANG T, CAO J, et al. High-efficiency 1064 nm nonplanar ring oscillator Nd: YAG laser with diode pumping at 885 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1562-1565.
- [56] SHIN D K, HENSON B M, KHAKIMOV R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0-1.1  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27403-27414.
- [57] CHEN D, FANG Z, CAI H, et al. Polarization characteristics of an external cavity diode laser with Littman - Metcalf

- configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(14):984-986
- [58] HIETA T, VAINIO M, MOSER C, et al. External-cavity lasers based on a volume holographic grating at normal incidence for spectroscopy in the visible range[J]. Optics Communications, 2009, 282(15): 3119-3123.
- [59] MCRAE T, LEE K, MCGOVERN M, et al. Thermo-optic locking of a semiconductor laser to a microcavity resonance[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21977-21985.
- [60] STERN B, JI X C, DUTT A, et al. Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator[J]. Optics Letters, 2017, 42: 4541-4544.
- [61] XIANG C, MORTON P A, BOWERS J E. Ultra-narrow linewidth laser based on a semiconductor gain chip and extended  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Bragg grating[J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3825-3828.
- [62] WEI F, YANG F, ZHANG X, et al. Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 17406-17415.
- [63] SCHUNK N, PETERMANN K. Noise analysis of injection-locked semiconductor injection lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(5): 642-650.
- [64] SCHUNK N, PETERMANN K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(7): 1242-1247.
- [65] YABRE G, DE W, VAN D, et al. Noise characteristics of single-mode semiconductor lasers under external light injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(3): 385-393.
- [66] LAU E K, WONG L J, WU M. Enhanced modulation characteristics of optical injection-locked lasers: a tutorial[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 618-633.
- [67] TRAN M, HUANG D, BOWERS J. Tutorial on narrow linewidth tunable semiconductor lasers using Si/III - V heterogeneous integration[J]. APL Photonics, 2019, 4(11): 111101.
- [68] ZHANG X, ZHU N H, XIE L, et al. A stabilized and tunable single-frequency erbium-doped fiber ring laser employing external injection locking [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(4): 1027-1033.
- [69] ZHANG Y N, ZHANG Y F, ZHAO Q L, et al. Ultra-narrow linewidth full C-band tunable single-frequency linear-polarization fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26209.
- [70] ZHAO Q L, ZHANG Z T, WU B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5  $\mu\text{m}$  single-frequency fiber laser towards coherent optical detection[J]. Photonics Research, 2018, 6(4): 326-331.
- [71] HAO L, WANG X, JIA K, et al. Narrow-linewidth single-polarization fiber laser using non-polarization optics [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3769-3772.
- [72] JI J, WANG H, MA J, et al. Narrow linewidth self-injection locked fiber laser based on a crystalline resonator in add-drop configuration[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1525-1528.
- [73] ZHENG S B. Jaynes-Cummings model with a collective atomic mode[J]. Physical Review A, 2008, 77(4): 045802.
- [74] ROMANELLI A. Generalized Jaynes-Cummings model as a quantum search algorithm[J]. Physical Review A, 2009, 80(1): 014302.
- [75] PEANO V, THORWART M. Quasienergy description of the driven Jaynes-Cummings model[J]. Physical Review B, 2010, 82(15): 155129.
- [76] CHEN Q H, LIU T, ZHANG Y Y, et al. Exact solutions to the Jaynes-Cummings model without the rotating-wave approximation[J]. Europhysics Letters, 2011, 96(1): 14003.
- [77] LI F, LAN T, HUANG L, et al. Spectrum evolution of Rayleigh backscattering in one-dimensional waveguide[J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(8): 190012.
- [78] ZHU T, BAO X, CHEN L, et al. Experimental study on stimulated Rayleigh scattering in optical fibers [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22958-22963.
- [79] ZHU T, BAO X, CHEN L. A self-gain random distributed feedback fiber laser based on stimulated Rayleigh scattering[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1371-1374.
- [80] WANG H, LU P, CHEN C, et al. Stabilizing Brillouin random laser with photon localization by feedback of distributed random fiber grating array[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 20712-20724.
- [81] DOSTOVALOV A V, WOLF A A, PARYGIN A V, et al. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16232-16237.
- [82] SKVORTSOV M I, WOLF A A, DOSTOVALOV A V, et al. Narrow-linewidth Er-doped fiber lasers with random distributed feedback provided by artificial Rayleigh scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(6): 1829-1835.
- [83] LEE H, CHEN T, LI J, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 369-373.
- [84] GAO R, YAO N, GUAN J, et al. Lithium niobate microring with ultra-high Q factor above  $10^8$  [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1): 011902.



- [85] ZHANG X, YIN Y, YIN X, et al. Characterizing microring resonators using optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2400-2403.
- [86] ZHU T, BAO X, CHEN L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(12): 1802-1807.
- [87] ZHU T, CHEN F Y, HUANG S H, et al. An ultra-narrow linewidth fiber laser based on Rayleigh backscattering in a tapered optical fiber[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055110.
- [88] ZHU T, HUANG S, SHI L, et al. Rayleigh backscattering: a method to highly compress laser linewidth[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33): 4631-4636.
- [89] HUANG S, ZHU T, CAO Z, et al. Laser linewidth measurement based on amplitude difference comparison of coherent envelope[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 759-762.
- [90] LI Y, HUANG L, GAO L, et al. Optically controlled tunable ultra-narrow linewidth fiber laser with Rayleigh backscattering and saturable absorption ring[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26896-26906.
- [91] DANG L, HUANG L, CAO Y, et al. Side mode suppression of SOA fiber hybrid laser based on distributed self-injection feedback[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 147: 107619.
- [92] HUANG S, ZHU T, CAO Z, et al. Laser linewidth measurement based on amplitude difference comparison of coherent envelope[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 759-762.
- [93] HUANG S, ZHU T, LIU M, et al. Precise measurement of ultra-narrow laser linewidths using the strong coherent envelope[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41988.
- [94] LIANG W, ILCHENKO V S, ELIYAHU D, et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 1-6.
- [95] JIN W, YANG Q F, CHANG L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 346-353.
- [96] LI Y, ZHANG Y, CHEN H, et al. Tunable self-injected Fabry - Perot laser diode coupled to an external high-Q Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> microring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3269-3274.
- [97] MINARDO A, BERNINI R, RUIZ-LOMBERA R, et al. Proposal of Brillouin optical frequency-domain reflectometry (BOFDR)[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29994-30001.
- [98] WANG F, ZHU C, CAO C, et al. Enhancing the performance of BOTDR based on the combination of FFT technique and complementary coding[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3504-3513.
- [99] AWWAD E, DORIZE C, GUERRIER S, et al. Detection-localization-identification of vibrations over long distance SSMF with coherent  $\Delta\varphi$ -OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(12): 3089-3095.
- [100] SEIMETZ M. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation [C]. OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, IEEE, 2008: 1-3.
- [101] LI S, ZHANG D, ZHAO J, et al. Silicon micro-ring tunable laser for coherent optical communication [J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6341-6349.
- [102] GUAN H, NOVACK A, GALFSKY T, et al. Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7920-7933.
- [103] SHEN B, CHANG L, LIU J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. Nature, 2020, 582(7812): 365-369.
- [104] SHU H, CHANG L, TAO Y, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems [J]. Nature, 2022, 605(7910): 457-463.

## Narrow Linewidth Laser Technology and Development (Invited)

ZHU Tao, DANG Laiyang, LI Jiali, LAN Tianyi, HUANG Ligang, SHI Leilei  
(Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems (Education Ministry of China), Chongqing University,  
Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Narrow linewidth lasers have extremely high spectral purity, high peak spectral density, ultra-long coherence length and extremely low phase noise, so they are used as core light sources in fields of gravitational wave detection, optical clocks, cold atom physics, coherent optical communication, optical precision measurement and microwave photonic signal processing. With the development of laser and its application research, higher and higher requirements are placed on the comprehensive parameter

performance of lasers. Narrow linewidth lasers are developing in the direction of ultra-narrow linewidth, ultra-stable time-frequency parameter and wavelength arbitrary tunability. Among them, the laser linewidth is the key factor that determines laser coherence, and it has always been the focus of scientists' research on laser technology. The essence of the existence of linewidth is that the laser will be affected by the phase and intensity disturbances caused by spontaneous radiation in the gain during operation, which makes the laser output signal inherently broadened by Gaussian white noise. In addition, the laser is also easily affected by the classical noise caused by the temperature change and vibration in the external environment, which further widens the laser linewidth. The above-mentioned factors have greatly reduced the coherence of the laser, thus limiting the development of the laser in promoting scientific research and industrial application to a great extent. Therefore, laser linewidth compression technology has become a key scientific issue for obtaining high-coherence light sources. At present, lasers with fiber-doped rare earth ions and semiconductors as gain have the advantages of long life, small size, low cost, high reliability, and easy industrialization, and have become the most studied and widely used solid-state lasers. However, due to the lack of control technology, the linewidth of conventional short-cavity fiber and semiconductor lasers is usually maintained at the order of tens of kHz or even MHz, and it is difficult to meet the requirements of various technological developments for the performance of laser linewidth parameters. Based on the interaction principle of the spontaneous emission and stimulated emission in the laser cavity, the structure innovation of the laser cavity is the main research routine to achieve the extreme control of narrow linewidth laser parameters. Since the invention of the laser, it has gradually experienced three stages of cavity structures to suppress the spontaneous emission: the main cavity laser, the fixed external-cavity feedback laser, and the adaptive distributed feedback laser. Here, the laser frequency stabilization technology based on the external servo electrical feedback and the external cavity feedback technology based on the photon lifetime extension are the common means to realize the narrow linewidth laser output. However, the extra-cavity servo electrical feedback technology not only requires high-precision and high-sensitivity external detection and control devices, but also requires precise control of the operating environment of the reference cavity. Hence, this laser frequency stabilization technology has a complex structure and high cost, which is not conducive to the large-scale integrated development of lasers. The latest laser structure with adaptive distributed feedback is mainly based on the fixed spatiotemporal perturbation provided by the distributed feedback, which deeply suppresses the random spatiotemporal perturbation by the spontaneous emission, so as to achieve the laser linewidth deep compression of the laser cavity with the feature of wavelength self-adaptation. This review first introduces the application requirements and structure evolution of narrow linewidth lasers, and then introduces the research progress of the main cavity laser and the fixed external-cavity feedback laser. Then, the adaptive distributed feedback laser recently developed is introduced. The physical ideas, core devices and system performance of this new type of laser are discussed. Eventually, the application characteristics of narrow linewidth lasers are introduced in typical fields of the distributed optical fiber sensing, laser coherent communication and on-chip optical information processing. The development trends of narrow linewidth lasers are also prospected.

**Key words:** Laser; Narrow linewidth; Coherence; Adaptive distributed feedback; Rayleigh scattering; Optical fiber sensing; Coherent communication; On-chip photonics

**OCIS Codes:** 300.3700; 030.1640; 140.3490; 280.4788; 200.3050