动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021081501

# 千赫兹量级窄线宽半导体激光器研究进展

王　涛*

（中电科技集团重庆声光电有限公司，重庆 401332）

**摘　要：** 窄线宽半导体激光器由于其高单色性、低频率噪声、高可调谐性等优点，广泛应用于高速相干光通信、分布式传感、激光雷达等领域。随着高品质因子（$Q$）光学谐振腔、硅光异构集成芯片等技术的发展，窄线宽半导体激光器近十年经历了革命式发展，线宽压缩至千赫兹（kHz）量级，甚至到亚千赫兹量级。文章阐述了千赫兹量级窄线宽半导体激光器的最新进展，针对不同压缩线宽机制的窄线宽激光器进行了分类介绍，深入讨论了优化耦合系数、减少外腔损耗等对窄线宽激光器性能的影响，并针对未来应用需求展望了千赫兹量级窄线宽激光器在进一步压缩线宽、提升输出光功率方面的发展方向。

**关键词：** 半导体激光器；窄线宽；千赫兹

**中图分类号：** TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0767－009

## Research Progresses of Laser Diodes with kHz Linewidth

WANG Tao

（Chongqing Acoustic Optic Electronic Co. Ltd. of China Electronics Technol. Group，Chongqing 401332，CHN）

**Abstract：** Narrow linewidth semiconductor laser has been widely used in high-speed coherent optical communication，distributed sensing，lidar and other fields due to its high monochromatic，low frequency noise and high tunability. With the development of high quality factor（$Q$）optical resonator，silicon optical isomerization integrated chip and other technologies，the narrow linewidth semiconductor laser has experienced revolutionary development in the last decade. The linewidth has been compressed to the order of kHz or even sub-kHz. In this paper，the latest developments of kHz narrow linewidth semiconductor laser are described，and the narrow linewidth lasers with different linewidth compression mechanisms are classified. The influence of optimizing coupling coefficient and reducing external cavity loss on the performance of narrow linewidth laser is discussed. The development trends such as further compressing the line width and improving the output optical power are prospected.

**Key words：** laser diode；narrow linewidth；kHz

## 0　引言

线宽是表征激光器输出性能的参数之一，它衡量了激光的相干性。线宽越窄，相干长度越大，激光光源的空间相干性越好。半导体激光器的线宽展宽源于输出激光相位的不稳定：尽管输出激光中受激辐射占据支配地位，但不可避免地存在自发辐射，从而引起光子相位/频率的波动，使激光频谱发生展宽。另外，半导体激光器中载流子浓度的起伏引起腔体折射率的变化，折射率扰动会导致激光频率变化，这种扰动同样会使激光器输出光谱展宽。

由于自发辐射和载流子浓度涨落引起的半导体激光器线宽展宽，可由修正的 Schalow-Townes 公式表示为

**收稿日期：**2021－08－15.

*通信作者：王　涛

$$\Delta\nu = \frac{\Gamma_w v_g^2 h\nu n_{sp}(\alpha_i + \alpha_m)\alpha_m}{8\pi P_o}(1+\alpha^2) \quad (1)$$

式中，$v_g$ 是群速度，$n_{sp}$ 是自发辐射因子，$\alpha_i$ 是腔内损耗(包括吸收、衍射、散射等)，$\alpha_m$ 是谐振腔面损耗，$\alpha$ 为与材料结构相关的线宽增强因子，$P_o$ 是输出光功率。由上式可知，通过提高输出光功率、减小谐振腔损耗与腔内损耗、提高微分增益、减小光限制因子等途径可压窄半导体激光器线宽。对于外腔半导体激光器，还可以通过增加腔长等方式进一步压缩线宽。除上述内部因素外，温度变化及外部振动噪声也会展宽线宽，还需做好半导体激光器的热管理及抗振动管理。

近年来，在空间激光通信、光纤水听器、连续波调频(FMCW)激光雷达等相干体制激光传输/探测系统应用需求牵引下，具有高相干性的千赫兹(kHz)量级窄线宽激光器已成为半导体激光器领域的研究热点。研究人员采用内部光学反馈、外腔光学反馈、电反馈控制等多种技术途径，已实现线宽达到亚千赫兹量级的半导体激光器。

本文针对不同压缩线宽机制的窄线宽半导体激光器，分类介绍其研究进展，其中第 1 部分介绍基于内部光学反馈的窄线宽半导体激光器，包括分布式反馈(DFB)激光器和分布式布拉格反射(DBR)激光器；第 2 部分介绍基于外腔光学反馈的窄线宽半导体激光器，包括基于分立光学元件的外腔窄线宽激光器和基于集成光波导反馈的外腔窄线宽激光器；第 3 部分针对未来应用需求展望千赫兹量级窄线宽激光器在进一步压缩线宽、提升输出光功率方面的发展方向。本文中窄线宽半导体激光器的分类如图 1 所示。

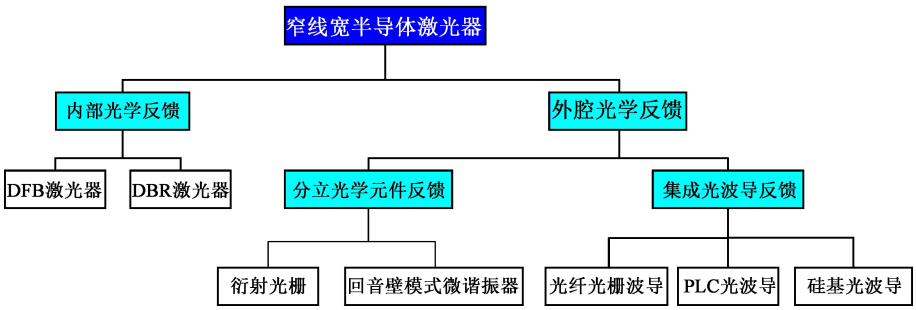
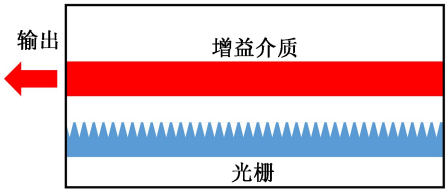


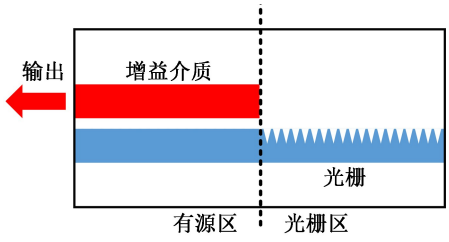

图 1 窄线宽半导体激光器按技术途径分类示意图

## 1 基于内部光学反馈的窄线宽半导体激光器

基于内部光学反馈的窄线宽半导体激光器通常采用布拉格光栅实现波长选择。布拉格光栅由高、低折射率的两种材料周期排列而成，利用两种材料的折射率差异，实现对特定波长光波的反馈，达到压缩线宽的目的。根据光栅的位置不同，又可分为将光栅置于增益区内的分布式反馈(DFB)激光器和将光栅置于增益区外的分布式布拉格反射(DBR)激光器，其结构分别如图 2(a)，(b)所示。




(a) DFB 激光器




(b) DBR 激光器

图 2 DFB 激光器和 DBR 激光器结构示意图

### 1.1 窄线宽 DFB 激光器

在 DFB 激光器中，谐振腔内部光场分布不均匀引起的空间烧孔效应[1]是引起激光器在高输出光功率下线宽展宽的重要因素。1990 年，Hitachi 中心研究实验室的 Okai 等[2]采用应变量子阱有源层降低线宽增强因子，采用周期调制光栅结构平滑谐振腔内光场分布，实现了线宽 170 kHz 的 DFB 激光器。2010 年，Spiessberger 等[3]采用大光腔外延结构降低量子阱光限制因子，降低了注入载流子噪声对线宽展宽的影响，在 2 mm 谐振腔长情况下实现了 22 kHz 内激光线宽，但是由于驱动电流噪声等因素，测试得到的总线宽为 234 kHz。

DFB 激光器中光栅内置于增益区内，增益区驱

动电流引入的噪声会导致光栅折射率发生波动，从而引起线宽展宽。采用电反馈法可以有效降低 DFB 激光器线宽：将部分输出激光引入鉴频器，探测出射激光波长的变化，将其转化为电信号，利用该反馈信号及微控制器来控制激光器的温度和驱动电流，从而稳定激光器的输出波长，实现窄线宽输出。

TeraXion 公司的窄线宽激光器采用鉴频器和电学反馈来降低线宽，原理如图 3 所示，线宽及输出功率见表 1。DFB 激光器的部分输出光发射到鉴频器中，通过比较，经过鉴频器后的光功率信号和 DFB 激光器封装包内的光电探测器提供的光功率参考信号，可将激光器的频率变化转换为光强度的变化。比较后产生的误差信号经过环路滤波器生成校正信号反馈作用于激光器，可降低激光器的线宽[4]。TeraXion 公司使用具有 π 相移的光纤光栅作为光学鉴频器来测量激光器的频率波动，基于该技术的 PureSpectrum NLL 激光器系列产品线宽可低于 5 kHz，输出功率可达 80 mW。

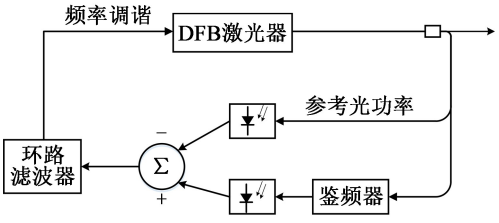



图 3　基于鉴频器的窄线宽半导体激光器原理

**表 1　TeraXion 公司 PureSpectrum NLL 激光器线宽及输出功率**

| 波长/nm | 输出功率/mW | 线宽/kHz | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 等级 1 | 等级 2 | 等级 3 |
| 1 525/1 565/1 617 | 40 或 80 | <5 | <10 | <20 |

可以看出，上述成果基于分立器件，体积较大。2020 年，Idjadi 等[5]报道了一种集成式硅纳米光子相位噪声滤波器，利用电光反馈回路抑制相位噪声。图 4 是系统框图，激光被单边带（SSB）强度调制后，其频率噪声被 MZI 和平衡探测器构成的频率噪声鉴频器检测，并利用环路增益抑制原始激光及压控振荡器（VCO）的相位噪声。由于滤波器与激光器彼此独立，因此滤波器的性能不受激光器特性的影响。相比传统的相位噪声抑制系统，该滤波器能在较宽的频带内（大于等于 20 MHz）降低相位噪声；而与前馈线宽压缩方案相比，该滤波器对增益和延迟的波动不敏感。图 5 为该混合集成纳米光子相位噪声滤波器的结构图。利用该滤波器，成功地将两只线宽分别为 2.55 MHz 和 200 kHz 的 DFB 激光器的输出线宽降低到 4 kHz 以下以及 320 Hz。光子芯片和 CMOS 芯片面积合计仅 3 mm$^2$。

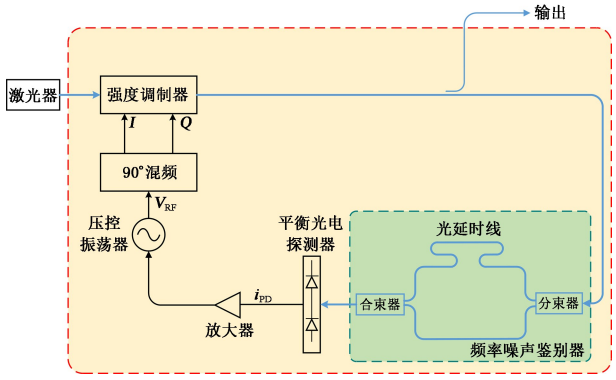



图 4　基于纳米光子相位噪声滤波器的窄线宽半导体激光器框图

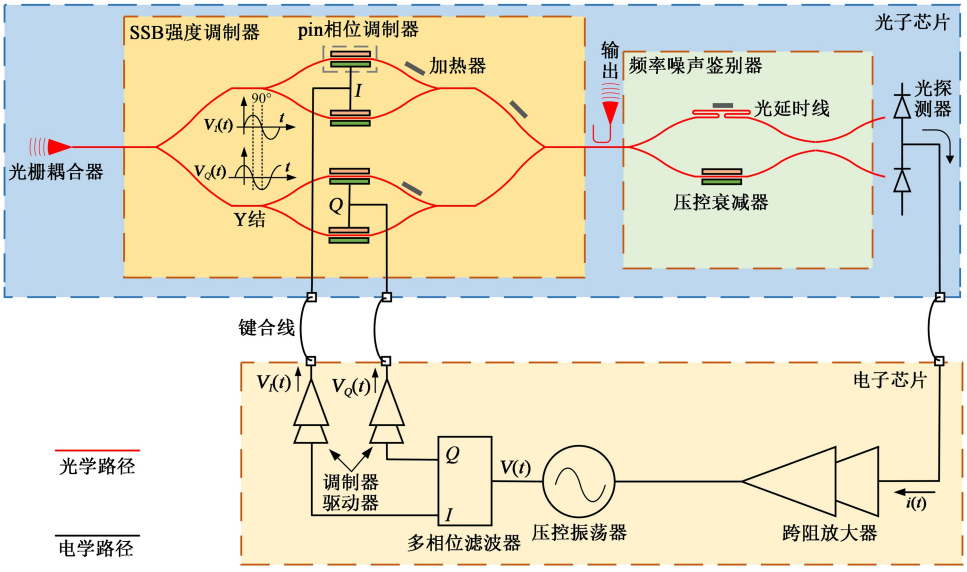



图 5　混合集成纳米光子相位噪声滤波器结构图

### 1.2 窄线宽 DBR 激光器

在 DBR 激光器中，增益区与光栅区分离，增益区驱动电流引入的噪声对光栅折射率波动影响较小，有利于实现较低的线宽。通过增加前腔面的反射率，可以提高 DBR 激光器的光谱稳定性，并且外部光反馈对 DBR 激光器的性能影响较小。

2011 年，Spiessberger 等[6]报道的 DBR 激光器包括一个 3 mm 长的有源增益区和一个 1 mm 长的无源 DBR 部分，DBR 反射镜的有效反射系数约为 60%，激光器后端面（即光栅侧）镀抗反射涂层，其反射率小于 0.1%，前端面的反射率为 30%。当该激光器输出波长为 1 056 nm、输出功率为 180 mW 时，固有线宽为 2 kHz，FWHM 线宽为 180 kHz。

Ⅲ-Ⅴ/硅异质集成为实现窄线宽半导体激光器带来了新的技术途径，该结构能对激光器的有源和无源部分进行单独优化。低噪声 DBR 激光器的设计思路参考了超低噪声光纤 DBR 激光器，其中，光栅占腔体长度的大部分，并作为激光器的前端反射镜。这种 DBR 激光器被称为扩展 DBR（E-DBR），利用较长的光栅来实现窄线宽和单模输出。2019 年，Huang 等[7]采用Ⅲ-Ⅴ/硅材料异质键合工艺制作了硅基集成 E-DBR，如图 6 所示，在超低损耗硅波导中集成一个 15 mm 长的低 $\kappa$ 值光栅反射器，实现功率超过 37 mW、线宽约 1.1 kHz 的激光输出。

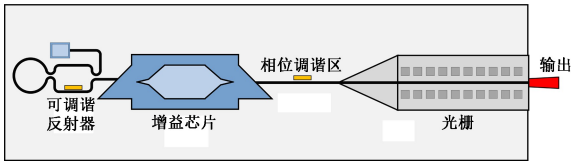



图 6 硅基集成 E-DBR 激光器结构

设计长度较长的、窄带宽的布拉格光栅的重点是降低波导损耗与折射率波动（即耦合系数 $\kappa$，或称为光栅强度，用于描述光栅与光学模式的相互作用，表征了前向和后向传播光学模式之间的耦合程度）。这一设计要求反映在实际制作工艺上，即是要求保证光栅几何尺寸的均匀性和重复性。然而，对于传统的侧面刻蚀或表面刻蚀光栅，耦合系数 $\kappa$ 与波导光栅的宽度或长度变化量成正比。因此，超低线宽半导体激光器需要极低的 $\kappa$，而在 $\kappa$ 趋近于 0 的极限下，对波导几何尺寸误差的容忍限将变得很低，难以仅凭现有工艺实现，还需在光栅设计上进行改进。

Wang 等[8-9]提出的解决方案是，特意使波导光栅两侧的几何形状发生一个相对偏移量 $\Delta L$，如图 7(a)、(b)所示。通过控制偏移量 $\Delta L$，就可以精确地控制 $\kappa$。其原理是可将这种光栅理解为两个存在相位偏移的光栅，当没有发生偏移时，两个光栅视为相位一致，反射光在布拉格波长处相干增强，而偏移引发的光栅相位偏移使得干涉增强幅度降低，意味着 $\kappa$ 值降低，在两个光栅相位相差 $\pi$ 的极端情况下，会产生相干抵消，基本上没有反射，实验结果表明，采用该结构，可实现 $\kappa$ 值接近 0 的光栅。该方案的缺点是可能会增加额外的光栅损耗。另一种既不增加损耗也能可控地降低光栅 $\kappa$ 值的方法是调制脊波导的侧壁，如 7(c)所示。因为在脊波导中，大部分光被限制在脊部下方，在脊波导和平板波导周围，光场与波导侧壁重叠度很低。因此，通过周期性地调制脊波导的脊部分或平板部分的侧壁，也能够改变光栅耦合系数 $\kappa$[9]。

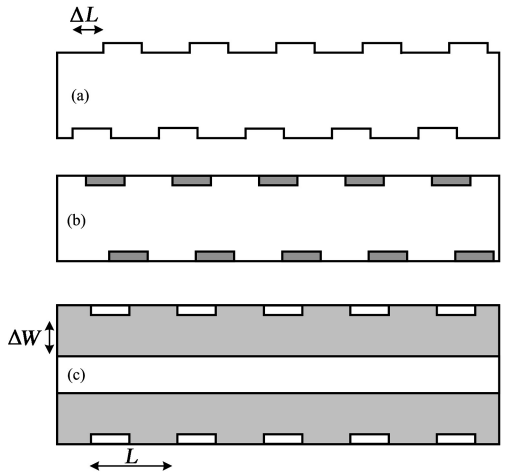



图 7 使用偏移光栅获得低 $\kappa$ 值(a)侧壁刻蚀；(b)表面刻蚀光栅中引入偏移量 $\Delta L$ 来控制 $\kappa$ 值；(c)利用光栅和脊波导的偏移量 $\Delta W$ 来控制 $\kappa$ 值

美国加州大学圣芭芭拉分校（UCSB）的团队提出了一种方案，即在采用脊波导光栅的情况下，可在平板波导区周期性地生长圆柱或刻蚀孔洞，这种光栅的 $\kappa$ 值与柱/孔和脊波导的间距成反比，因此可精确控制光栅的 $\kappa$ 值[10]，且柱/孔和波导之间的大间距还能保证波导具有较低的损耗，被认为是用于实现低噪声 E-DBR 的一种理想光栅设计。UCSB 的研究人员研究了图 8 所示的三种波导几何形状，分别通过改变纳米柱/孔与主波导的间距 $g$、波导宽度变化量 $\Delta W$、光栅阶数 $m$ 来达成设计目标。研究结果发现，采用在波导两侧制备周期性的纳米柱/孔的方式最有利于实现低 $\kappa$ 值光栅。

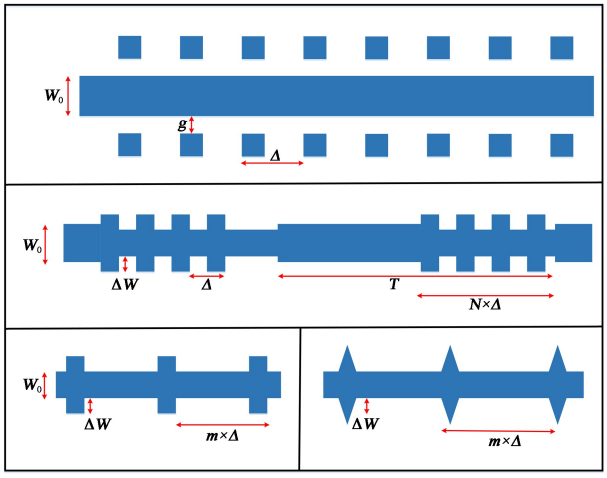



图 8　几种低 $\kappa$ 值波导设计($W_0$:标称波导宽度;$\Delta$:布拉格周期;$g$:间距;$\Delta W$:波导宽度变化量;$T$:取样周期;$N$:一个取样中的光栅周期数;$m$:光栅阶数)

## 2　基于外腔光学反馈的窄线宽半导体激光器

外腔激光器(ECL)采用外部光学元件构成外部腔体,通过延长光学谐振腔的有效长度来提高谐振腔的 $Q$ 值,实现窄线宽输出。ECL 通常使用的外部光频选择器包括衍射光栅和波导反馈元件。

外腔结构半导体激光器的线宽可以由修正后的 Schawlow-Towns 公式表示[11]:

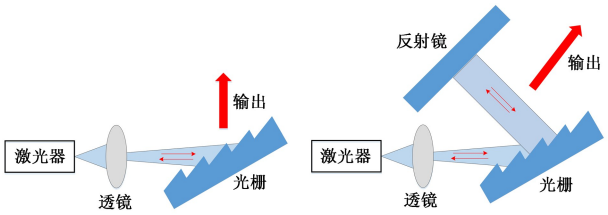
$$\Delta\nu = \frac{v_a(\Gamma_{xy}g_{th})}{\pi}\left(\frac{1}{N_pV_p}\right)n_{sp}(1+\alpha_H^2)\left(\frac{n_aL_a}{n_aL_a+n_pL_p}\right)^2 \tag{2}$$

其中,$v_a$ 为有源区的群速度,$\Gamma_{xy}$ 为横截面的限制因子,$g_{th}$ 为阈值增益,$N_p$ 为腔内光子密度,$V_p$ 为腔的体积,$n_{sp}$ 为粒子数反转因子,$\alpha_H$ 为线宽展宽因子,$n_a$ 为有源区群折射率,$n_p$ 为无源区群折射率,$L_a$ 和 $L_p$ 分别为有源区和无源区的长度。由上式可知,当增加无源外腔长度时,激光器线宽会被压缩。

### 2.1　基于分立光学元件的外腔窄线宽激光器

#### 2.1.1　基于衍射光栅的外腔窄线宽激光器

基于衍射光栅的 ECL 通常采用图 9 所示的 Littrow 或 Littman 结构。在 Littrow 结构中,通过改变光栅的倾斜角实现波长选择,获得窄线宽激光输出。而在 Littman 结构中,光栅固定,通过调谐反射器的角度实现波长选择,获得窄线宽激光输出。另外,还有直接使用体光栅(体全息光栅(VHG)或体布拉格光栅(VBG))的 ECL。这些激光器利用光栅的角色散性,使特定波长的纵模反馈回激光器,导致该纵模在模式竞争中优先起振,抑制其他纵模,压窄输出线宽。




(a)　Littrow 结构　　(b)　Littman 结构

图 9　基于衍射光栅的 ECL 结构

另外,ECL 的增益芯片可采用图 10 所示的单端面倾斜(SAF)增益芯片取代传统的 F-P 腔增益芯片。由于 SAF 增益芯片使用弯曲脊波导,可进一步降低芯片一端的反射,再加上弯曲脊波导对应的端面镀增透膜,几乎消除了对激光腔产生有害反馈的背反射。而传统镀增透膜的 F-P 腔增益芯片端面的残余反射经常会限制稳定性、输出功率和激光器的光谱质量。因此,当 SAF 增益芯片用于 ECL 时,优于 F-P 腔增益芯片。如 Shin 等[12]采用 SAF 增益芯片和闪耀光栅的 Littrow-ECL,最大注入电流为 195 mA,最大输出功率为 83 mW,洛伦兹线宽为 4.2 kHz,22.5 ms 后高斯线宽为 22 kHz。

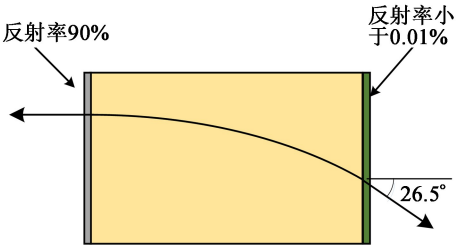



图 10　SAF 增益芯片结构

基于衍射光栅的外腔半导体激光器同样在向集成化发展。德国费迪南德布朗研究所针对空间应用研制了一系列微集成扩展腔二极管激光器(ECDL)。如针对精确钾光谱仪研制的 ECDL 由一

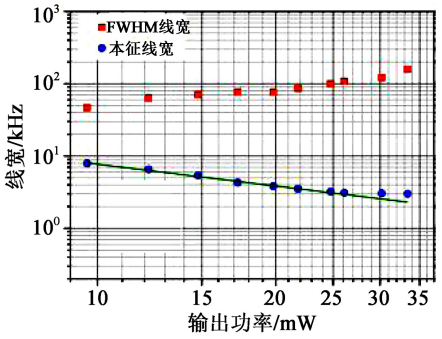



图 11　ECDL 的 FWHM 线宽、本征线宽和输出功率曲线

个 1 mm 长的 AlGaAs 双量子阱脊波导增益芯片组成，该芯片具有两个阳极部分、准直非球面微透镜、一个体全息布拉格光栅（VHBG）、一个微光学隔离器、一个微热电制冷器（μ-TEC）、一个微温度传感器和一个电子接口。所有的电子元件都焊接或粘合在 AlN 陶瓷底板上，面积仅 80 mm×25 mm。激光器芯片的前端与 VHBG 共同构成了约 30 mm 长的扩展腔，该激光器的输出功率及线宽见图 11[13]。

2.1.2 基于回音壁模式微谐振器的外腔窄线宽激光器

回音壁模式（WSM）是存在于圆形谐振器中的一类谐振模式，满足全反射条件的入射光在圆形谐振腔内连续反射，传播一周后与新进入谐振腔的光的相位差为 2π 的整数倍，此时，产生谐振，称为“光学回音壁模式”，使得入射光能以极小的损耗沿谐振器的弧形表面传播。采用 WGM 微谐振器作为外腔，有望将外腔的尺寸减少到毫米级。Liang 等[14]利用自注入锁定提高半导体激光器的输出光谱纯度，并利用半导体光放大器（SOA）或增压半导体光放大器（BOA）降低强度噪声，实现了有效线宽低于 100 Hz、功率超过 70 mW 的激光输出。具体设计如图 12 所示，DFB 激光器的输出光经微透镜准直后通过一个半导体光学移相器，经耦合棱镜耦合到一个 $Q$ 值为 $10^9$ 的 WGM 微谐振器中，微谐振器的表面和体积不均匀性引起谐振瑞利散射，产生一个相干的光学反馈给激光器芯片，将激光器的输出频率与谐振器的谐振频率锁定。

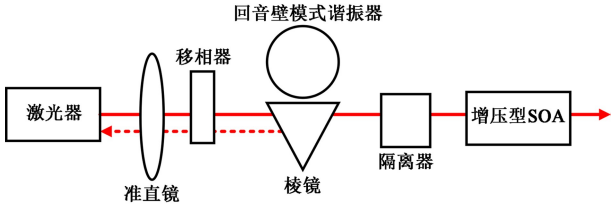



图 12 基于自注入锁定的窄线宽激光器设计

## 2.2 基于集成光波导的外腔窄线宽激光器

目前，采用低传输损耗的无源波导，已在光纤光栅、平面光波导（PLC）、低损耗 $Si_3N_4$ 和 Si 等平台实现了集成光波导外腔窄线宽半导体激光器。

2.2.1 基于光纤波导的外腔窄线宽激光器

随着特种光敏光纤制作工艺和光纤布拉格光栅刻写工艺的不断成熟，基于光纤光栅的 ECL 引起了国内外研究机构的重视。Morton 光子公司的超低噪声混合激光器（ULN-HL）采用了增益芯片结合外部 $SiO_2$ 布拉格光栅或光纤布拉格光栅的方式，结构如图 13 所示。目前，加长版激光器的洛伦兹线宽低至 15 Hz，输出功率超过 100 mW，标准版激光器洛伦兹线宽为 64 Hz，输出功率也超过 100 mW[15]。此外，该公司还在开发基于 ULN-HL 设计的集成光子 ULN 激光器，这些激光器将基于硅光子技术，异质集成Ⅲ-Ⅴ增益芯片与超低损耗波导。

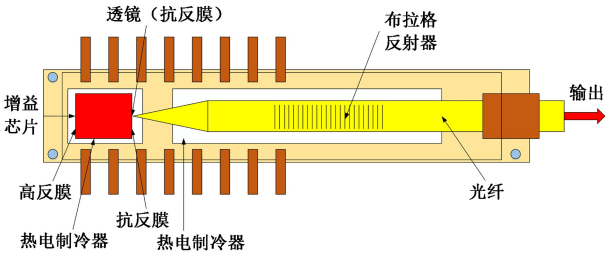



图 13 Morton 光子公司的 ULN-HL 激光器结构

增益芯片与光纤光栅的模式失配，会导致两者直接耦合时存在较大的耦合损耗，恶化窄线宽激光器性能，因此研究人员通过优化增益芯片结构，使其能够以更低的损耗与光纤波导耦合。SCOW 结构是一种集成了多模波导和平板波导的增益芯片波导优化结构。这种波导具有较大的光模尺寸、较小的横向光学限制因子和内损耗系数。通过对波导几何尺寸及波导之间耦合系数的设计，可使基模以最小的损耗在多模波导中传播，而高阶模式因在平板波导中传播损耗高而被过滤。林肯实验室将该概念与量子阱技术相结合，开发了 SCOW 激光器、放大器，并结合光纤布拉格光栅实现了大功率、窄线宽的外腔激光器[16]。这种 SCOW 外腔激光器（SCOW-ECL）如图 14 所示，包括一个长为 1 cm 的双通弯通道 SCOW 放大器（SCOWA）、一根具有抗反射涂层的透镜光纤、一根光纤布拉格光栅和一个尾纤 60 dB 的光学隔离器。

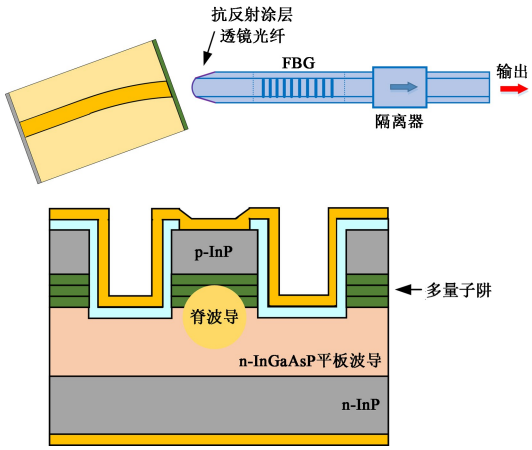



图 14 SCOW-ECL 结构示意图

Juodawlkis 等对 SCOW-ECL 进行了一系列优化，包括：(1)将光纤布拉格光栅的 FWHM 带宽降至 20 pm 以减少光栅反射带内的纵模数量；(2)将光栅反射率降至 20%以提高输出功率；(3)采用透镜光纤提高 SCOWA 与光栅的耦合效率；(4)设计有源区发射波长大于光栅的反射波长，降低线宽展宽因子。通过上述优化，获得了功率为 370 mW、洛伦兹线宽约为 1.75 kHz 的输出(高斯线宽 35 kHz)[17]。

2.2.2　基于 PLC 波导的外腔窄线宽激光器

2009 年，RIO 公司研制出了一种低成本窄线宽半导体激光器模块，如图 15 所示，其外腔为将光纤光栅刻在 PLC 光波导上而成，单只激光器输出功率可达 20 mW 以上，加上特殊设计的放大模块后，输出功率可达 5 W 及以上，线宽低至 3 kHz 以下。

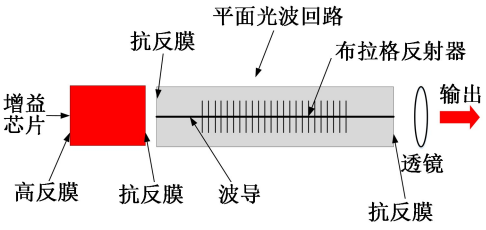



图 15　RIO 公司的窄线宽半导体激光器结构

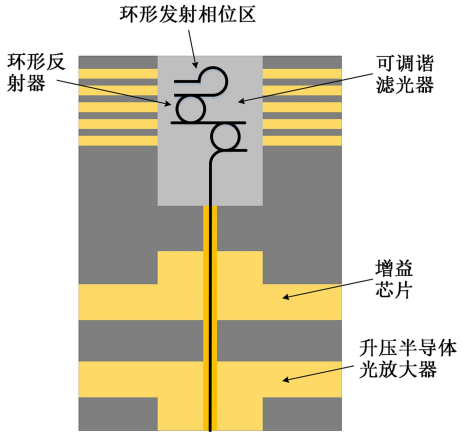
目前，RIO 公司依托在掺 Ge 的 $SiO_2$ PLC 上直接刻蚀布拉格光栅的工艺，以及能集成低噪声 InP 或 GaAs 增益芯片与 PLC 的混合集成工艺，开发一系列窄线宽半导体激光器。

国内，孙广伟等[18]报道的混合集成 ECL 采用 InP 单端面倾斜(SAF)增益芯片和保偏单模光纤光栅外腔混合集成的方案，利用保偏光纤布拉格光栅斜边处的大群时延特性压窄半导体激光器的线宽，输出功率不低于 30 mW，洛伦兹线宽为 4.85 kHz，本征线宽为 4.06 kHz。

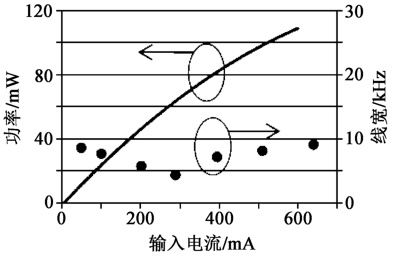
2.2.3　基于硅基波导的外腔窄线宽激光器

当光纤光栅、PLC 波导作为外腔激光器反馈元件时，其折射率较小，尺寸较大，加上自身材料吸收损耗较大，不利于提升激光器的功率。为此研究人员一直在寻找集成度更高、损耗更低的外腔元件。随着硅光芯片设计及工艺平台的不断成熟，基于 SOI，$Si_3N_4$ 等材料的外腔反馈元件层出不穷，并且借助于各种微腔结构，进一步压缩了外腔激光器的线宽。

环形谐振器通过合理的波导布局设计，较容易获得较长的腔体。2015 年，Kobayashi 等[19]采用无源对准技术，混合集成了增益芯片、升压半导体光放大器(SOA)和硅波导可调谐滤光器(含两个可调谐环形谐振器和一个相位调谐器)，尺寸为 4.5 mm×3.5 mm。两个环形谐振器的自由光谱范围略有不同，环可以通过热光相位调谐器环顶部的薄金属加热器的热光学效应来调谐，当两个环的透射谱峰值相同，且相位调谐至相同时，才产生激光出射，从而实现出射波长选择功能。该硅光子混合环形滤光器外腔(SHREC)激光器的输出功率及线宽特性见图 16，硅波导损耗低于 0.5 dB/cm。




(a)　结构示意图




(b)　输出功率及线宽特性曲线

图 16　SHREC 激光器结构及输出功率/线宽特性

2020 年，Boller 等[20]报道了一种 InP-$Si_3N_4$ 混合激光器，包括一个增益芯片和一个由两个微镜谐振器组成的游标滤光器，如图 17 所示。位于增益区和游标滤光器之间的 2π 移相器用于调节腔体长度。

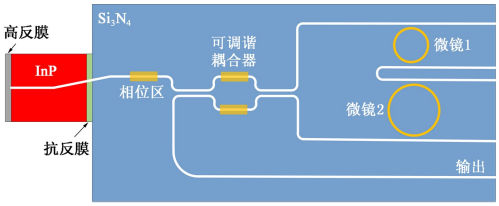



图 17　InP-$Si_3N_4$ 混合激光器结构

该激光器的电流-输出功率曲线如图 18 中蓝点所示。曲线中存在功率下降中断，这可能是电流增加导致波导温度上升，进而引起折射率变化，使得激

光腔长度发生改变，最终使振荡腔模式与游标滤光器的谐振分离，功率下降。而随着电流进一步加大，下一个腔模式与游标滤光器谐振，使得输出功率再次增大。为解决该问题，设计者引入了一个相位区，通过调整该相位区，可自动重新调整激光腔的长度，以获得持续增加的输出功率，如图 18 中红点所示，最大光纤耦合光功率为 24 mW。通过测量频率噪声的功率谱密度，根据频谱白噪声部分的上限确定固有线宽为 2.2±0.7 kHz[20]。

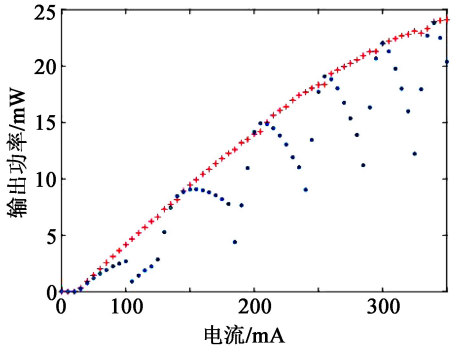



图 18 InP-$Si_3N_4$ 混合激光器电流-输出功率关系曲线

为了提高输出功率，另一种设计如图 19 所示，两个 700 μm 长的半导体光放大器构成激光腔的两端，低损耗 $Si_3N_4$ 环波导作为频率选择反射镜，置于激光腔中间。当对两个增益部分施加 100 mA 泵浦电流时，输出功率约 40 mW，通过白噪声上限确定的固有线宽约 320 Hz，与单增益区激光器相比，线宽降低了 7 倍，原因有两点：一是输出功率提升了 4 倍，这应使线宽降低 4 倍，二是频率选择反射镜位于激光腔中间，相比将反射镜作为激光腔端面的方案，可使腔长扩展效果加倍。

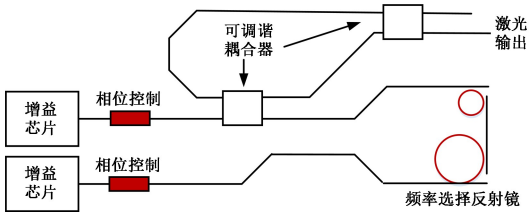



图 19 双增益区激光器设计

2020 年，Sia 等[21]通过混合集成Ⅲ-Ⅴ光学放大器和一个扩展、低损耗的硅基波长可调游标腔体（由两个微环谐振器和一个闭环多模干涉器组成外腔），实现了Ⅲ-Ⅴ/硅混合集成 1 647～1 690 nm 波长可调激光器，如图 20 所示。室温下连续波输出功率可达 31.1 mW，对应的最大边模抑制率为 46.01 dB，估计线宽为 0.7 kHz，该激光器的线宽是异质集成Ⅲ-Ⅴ/硅激光器中最低的。

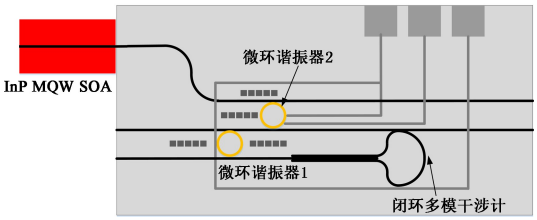



图 20 由两个微环谐振器和一个多模干涉计构成外腔的 ECL

McKinzie 等[22]提出一种 InP 光子集成电路（PIC）设计，如图 21 所示，采用传统的生长-蚀刻-再生长技术单片集成可调谐、窄线宽激光主振荡器的各组件以及 4 只半导体光放大器，主振荡器为光放大器阵列提供能量，这些光放大器的输出光在单模波导中相干合束，4 只热光相位调节器（$\phi_1$～$\phi_4$）用于控制各半导体光放大器的输出相位，保证相干合束，外腔调节器 $\phi_5$ 用于线宽控制。将该 PIC 与一个高 $Q$ 值 $Si_3N_4$ 微环谐振器混合集成，由微环谐振器构成外腔。该配置使输出光的 Schawlow-Townes 线宽缩小到约 3 kHz，$Si_3N_4$ 输出面的平均功率为 37.9 mW[22]。

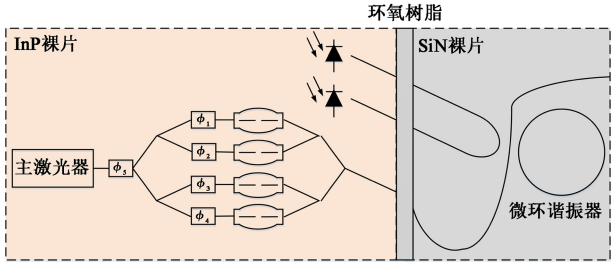



图 21 异质集成激光器 PIC 与 $Si_3N_4$ 微环谐振器

## 3 未来展望

目前，基于内部光学反馈或外腔电反馈、外腔光反馈，国内外研究机构及公司已经实现了线宽降至千赫兹量级，且具有数十毫瓦输出功率的半导体激光器。今后，为了继续降低半导体激光器的输出线宽，可能向以下方向发展：

（1）激光器有源区用量子点取代量子阱。线宽增强因子 $\alpha$ 对半导体激光器的线宽有重要影响。相比量子阱激光器，量子点激光器具有更低的线宽增强因子，从而实现更窄的激光线宽。目前，量子点 DFB 激光器的线宽已低于 100 kHz，通过采用外腔反馈等线宽压缩技术，有望将量子点激光器的线宽压缩到千赫兹量级。

（2）优化集成波导。半导体激光器常用的Ⅲ-Ⅴ

材料的传输损耗较高，是导致半导体激光器线宽较宽的因素之一。因此，用吸收损耗低的硅基波导材料取代Ⅲ-Ⅴ材料波导，通过异质集成构成谐振腔，可大幅提升激光器输出的相干性，此方案的重点是实现高 $Q$ 值谐振腔。目前的集成方案多采用硅波导，硅的双光子吸收特性，使得硅波导在高输出功率情形下的性能不理想。解决方案一是用反偏 pn 结提取产生的载流子；二是采用尺寸更大的硅波导，如超低损耗硅波导或微米级硅波导平台；三是采用损耗更低的 $Si_3N_4$ 波导。

## 参考文献：


[1] Soda H, Kotaki Y, Sudo H, et al. Stability in single longitudinal mode operation in GaInAs/InP phase adjusted DFB lasers[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1987, 23: 804-814.

[2] Okai M, Tsuchiya T, Uomi K, et al. Corrugation-pitch-modulated MQW-DFB laser with narrow spectral linewidth (170 kHz)[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(8): 529-530.

[3] Spiessberger S, Schiemangk M, Wicht A, et al. Narrow linewidth DFB lasers emitting near a wavelength of 1 064 nm [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 2010, 28(17): 2611-2616.

[4] Morin M, Ayotte S, Latrasse C, et al. What narrow-linewidth semiconductor lasers can do for defense and security? [J]. Proc. SPIE, 2010, 7677: 76770N.

[5] Idjadi M H, Aflatouni F. Nanophotonic phase noise filter in silicon[J]. Nature Photon., 2020, 14: 234-239.

[6] Spieβberger S, Schiemangk M, Wicht A, et al. DBR laser diodes emitting near 1 064 nm with a narrow intrinsic linewidth of 2 kHz[J]. Appl. Phys. B, 2011, 104: 813-818.

[7] Huang D, Tran M A, Guo Joel, et al. High-power sub-kHz linewidth lasers fully integrated on silicon[J]. Optica, 2019, 6(6): 745-752.

[8] Wang X, Wang Y, Flueckiger J, et al. Precise control of the coupling coefficient through destructive interference in silicon waveguide Bragg gratings[J]. Opt. Lett., 2014, 39(19): 5519-5522.

[9] Wang X, Shi W, Yun H, et al. Narrowband waveguide Bragg gratings on SOI wafers with CMOS-compatible fabrication process[J]. Opt. Express, 2012, 20(14): 15547-15558.

[10] Tan D T H, Ikeda K, Fainman Y. Cladding-modulated Bragg gratings in silicon waveguides[J]. Opt. Lett., 2009, 34(9): 1357-1359.

[11] Coldren L A, Corzine S W, Mashanovitch M L. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.

[12] 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 μm[J]. Opt. Express, 2016, 24(24): 27403-27414.

[13] Luvsandamdin E, Kurbis C, Schiemangk M, et al. Micro-integrated extended cavity diode laser for precision potassium spectroscopy in space[J]. Opt. Express, 2014, 22(7): 7790-7798.

[14] Liang W, Eliyahu D, Savchenkov A, et al. A low-RIN spectrally pure whispering-gallery-mode resonator-based semiconductor laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(22): 1933-1936.

[15] Morton P A, Morton M J. High-power, ultra-low noise hybrid lasers for microwave photonics and optical sensing[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(21): 5048-5057.

[16] Juodawlkis P W, Plant J J, O'Donnell F J, et al. Narrow-linewidth, high-power 1 556 nm slab-coupled optical waveguide external-cavity laser[C]// Conf. on Lasers & Electro-Optics, 2005: 411-413.

[17] Juodawlkis P W, Plant J J, Loh William, et al. High-power, low-noise 1.5 μm slab-coupled optical waveguide (SCOW) emitters: Physics, devices, and applications[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2011, 17(6): 1698-1713.

[18] 孙广伟，魏　芳，张　丽，等. 基于保偏光纤光栅的低噪声外腔半导体激光器[J]. 中国激光，2018，45(6)：20-26.
Sun Guangwei, Wei Fang, Zhang Li, et al. Low-noise external cavity semiconductor lasers based on polarization-maintaining fiber Bragg gratings[J]. Chinese J. of Lasers, 2018, 45(6): 20-26.

[19] Kobayashi N, Sato K, Namiwaka M, et al. Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers [J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(6): 1241-1246.

[20] Boller K-J, Rees Avan, Fan Y, et al. Hybrid integrated semiconductor lasers with silicon nitride feedback circuits[J]. Photon., 2020, 7(4): 1-33.

[21] Sia J X B, Li X, Wang W J, et al. Sub-kHz linewidth, hybrid Ⅲ-Ⅴ/silicon wavelength-tunable laser diode operating at the application-rich 1 647～1 690 nm[J]. Opt. Express, 2020, 28(17): 25215-25224.

[22] McKinzie K A, Wang C, Noman A A, et al. InP high power monolithically integrated widely tunable laser and SOA array for hybrid integration[J]. Opt. Express, 2021, 29(3): 3490-3502.


## 作者简介：

**王　涛**(1972—)，男，重庆市人，工程硕士，高级工程师，主要研究方向为通信电子。