动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.002

可调谐外腔半导体激光器研究进展

花金平，江　毅*

（北京理工大学 光电学院 信息光子技术工业和信息化部重点实验室，北京 100081）

摘　要： 可调谐外腔半导体激光器具有线宽窄、调谐范围宽、单模输出、输出功率高等优良特性，在白光干涉测量技术、波分复用系统、相干光通信、光纤传感等领域有着广泛的应用。文章首先介绍了可调谐外腔半导体激光器的基本原理以及各种典型外腔结构的调谐机理，然后根据外腔结构阐述了各种可调谐外腔半导体激光器的最新研究进展，分析了不同外腔结构的优缺点，最后对可调谐外腔半导体激光器的不足进行了总结，展望了其未来发展趋势。

关键词： 外腔半导体激光器；可调谐；窄线宽；衍射光栅；光纤光栅；波导

中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0011－09

Recent Progresses of Tunable External Cavity Diode Laser

HUA Jinping, JIANG Yi

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN)

Abstract: Tunable external cavity diode laser(ECDL) has excellent characteristics such as narrow linewidth, wide range tuning, single-mode output and high output power. Tunable ECDL is widely used in white light interferometry, wavelength division multiplexing system, coherent optical communication, optical fiber sensor technology, etc. In this paper, the basic principles of tunable ECDL and the tuning mechanisms of various typical external cavity structures are introduced firstly. Then the latest domestic and overseas research progresses of various tunable ECDL are expounded according to different external cavity structures, and the advantages and disadvantages are also analyzed. Finally, the existing shortcomings and future development trends of tunable ECDL are summarized and prospected.

Key words: ECDL; tunable; narrow linewidth; diffraction grating; fiber grating; waveguide

0　引言

可调谐外腔半导体激光器(ECDL)通过引入衍射光栅等光学反馈元件来提供光反馈，增大谐振腔品质因数(*Q* 值)，将激光器线宽压窄至千赫兹级别，将外腔光学反馈元件同时作为调谐元件，实现了波长宽范围调谐(大于 100 nm[1])、单模输出、大激光功率、稳定输出光谱、大边模抑制比等优良性能，并且易与光纤耦合，被广泛应用于白光干涉测量[2]、波分复用系统[3]、光学相干断层扫描[4]、相干光通信[5]、气体检测[6]、原子物理实验[7]、原子钟[8]等领域。

白光干涉测量利用可调谐 ECDL 的波长扫描光注入干涉仪中实现对实际距离的绝对测量，可达到纳米级的测量精度以及毫米级的测量范围，是目前精度最高的测量技术之一。光学相干断层扫描(OCT)的深度分辨率与光源的相干长度成正比，OCT 采用可调谐 ECDL 的窄线宽可实现体内生物组织的高分辨率横截面成像，被广泛应用于眼科等医学临床诊断中。波分复用技术(WDM)将多路不同载波波长的光信号耦合进一根光纤中同时进行传

收稿日期：2020－09－23.

基金项目：国家自然科学基金项目(61775020).

* **通信作者：**江　毅　**E-mail：** bitjy@bit.edu.cn

输，极大地提高了光纤的传输能力，成为提高通信系统带宽的关键技术。在5G时代和智能时代到来的背景下，WDM信道间隔朝着更窄的方向发展，对激光器光源提出了更高的要求。使用可调谐ECDL代替传统的分布式反馈(DFB)半导体激光器，WDM系统在灵活性、性价比、降低生产成本等方面具有显著的优势。

综上，可调谐ECDL凭借其独特的性能正成为越来越多应用领域中的理想光源。

1 可调谐外腔半导体激光器的基本原理

1.1 可调谐ECDL基本模型

ECDL由半导体激光器外部引入光学反馈元件构成，通过外部光学元件的反馈与选频作用，大大改善了激光器的性能，结构如图1所示。

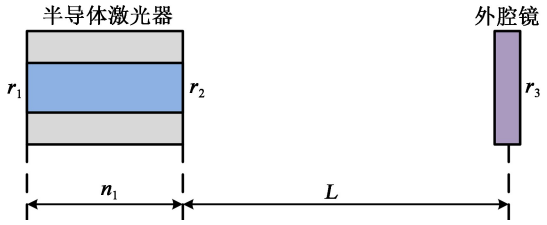


图1 ECDL基本结构示意图

半导体激光器(激光二极管，LD)两端面构成的谐振腔为内腔，LD与外腔镜之间构成的谐振腔称为外腔。外腔镜将LD部分输出光反馈回内腔，反馈光与内腔光场发生相互作用，外腔镜选择特定的单模波长输出激光。

清华大学柴燕杰等[9]推导出了ECDL的线宽表达式，引入外腔反馈因子和Henry线宽增强因子[10]，为了得到较窄的线宽，需增强外腔反馈因子，应选择长外腔长度、高衍射光栅反射率和低芯片后端面反射率。

通过调整外腔镜位置或旋转外腔镜等方式，改变激光器的外腔长度和外腔镜选频模式，使外腔镜反馈频率曲线和外腔频率曲线的移动速率相匹配，得到连续无跳模可调谐的单模输出，如图2所示。

可以作为外腔反馈元件的光学元件种类很多，常见的有衍射光栅、光纤光栅、体全息光栅、体布拉格光栅、低损耗波导、滤光片、F-P标准具、反射镜、波导滤波器等。根据谐振腔结构设计和外腔反馈光学元件的不同，将可调谐ECDL主要分为衍射光栅型、光纤光栅型和波导型ECDL等。

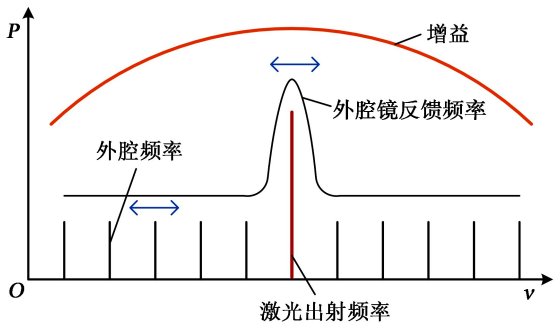
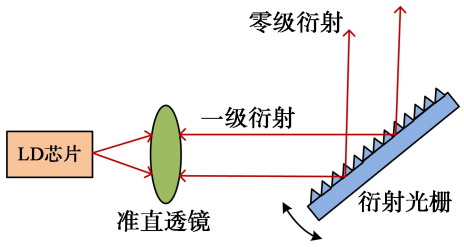


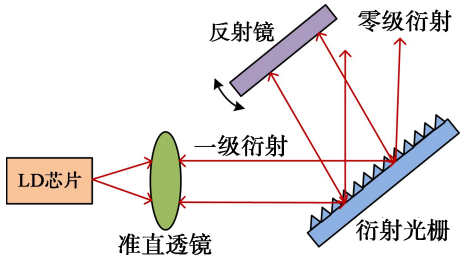
图2 外腔激光器波长调谐示意图

1.2 衍射光栅型ECDL

衍射光栅ECDL通常使用Littrow或Littman两种结构[11]，分别如图3(a)和(b)所示。



(a) Littrow-ECDL



(b) Littman-ECDL

图3 衍射光栅ECDL结构示意图

Littrow结构一般由LD增益芯片、准直透镜和衍射光栅组成，增益芯片前端面出射激光经准直透镜准直光束后进入衍射光栅发生衍射，一级衍射光沿原光路返回至增益芯片，激光从光栅零级衍射方向或芯片后端面输出。Littman结构是在Littrow结构的基础上增加一个反射镜，一级衍射光经反射镜反射发生第二次衍射，然后反馈进入增益芯片，形成谐振。经过模式竞争，一级衍射光模式得到放大，其他振荡模式得到抑制，激光器实现单模输出。

衍射光栅型ECDL的激射波长同时满足激光器相位条件公式和光栅方程：

$$\lambda = 2L/q \tag{1}$$

$$\lambda = 2d\sin\theta \tag{2}$$

式中，λ 为激射波长，L 为外腔激光器腔长，q 为模

式数，d 为光栅常数，θ 为入射角（与一级衍射角相等）。

Littrow 结构通过旋转衍射光栅、Littman 结构通过旋转反射镜同时改变光栅的一级衍射角和外腔腔长进行选模，实现激光调谐。

1.3　光纤光栅型 ECDL

光纤光栅型外腔半导体激光器（FBG-ECDL）由 LD 增益芯片输出端耦合 FBG 组成，如图 4 所示。

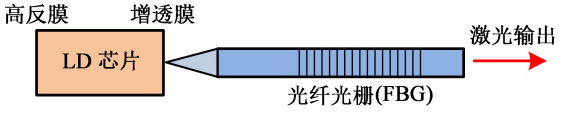


图 4　光纤光栅 ECDL 结构示意图

FBG 的功能本质是具有窄带高反特性的反射镜，将布拉格反射峰带宽内的特定波长反馈射入增益芯片，与有源区光相互作用，增加该振荡模式光子寿命，降低其阈值，通过模式竞争从而得到单模输出。利用锥形光纤耦合 LD 和 FBG 可以有效减小 LD 端面的反射光，抑制内腔 F-P 振荡模式。FBG 布拉格中心波长决定了激光器的激射波长：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{3}$$

式中，λ_B 为布拉格中心波长，n_{eff} 为纤芯折射率，Λ 为光栅周期。同时改变光栅布拉格波长和激光器外腔长度，能够实现激光器的连续调谐。FBG-ECDL 通常使用机械、温度、电流等方式拉伸 FBG 以实现波长的调谐。

1.4　波导型 ECDL

波导型可调谐 ECDL 通常由半导体光放大器（SOA）和集成光子芯片外腔耦合组成，SOA 提供增益放大，集成光子芯片外腔负责波长选择，图 5 给出了硅基波导的 ECDL 的典型结构。

SOA 耦合到硅基线波导的光波通过两个微环谐振器（MRR）发生滤波，其原理是设置两个 MRR 的半径略微不同，自由光谱范围（FSR）也不同[13]：

$$FSR = \lambda^2/2\pi r n_{eff} \tag{4}$$

其中，λ 为激光波长，r 为 MRR 半径，n_{eff} 为 MRR 硅波导有效折射率。两个 MRR 的透射光谱相互叠加，相互匹配峰的波长通过模式竞争决定激射波长，通过热光效应[14]，调节 Pt 加热器，MRR 的 FSR 发生变化，导致传输峰移动，然后通过游标效应，可以在宽范围内进行波长调谐。双微环谐振器的波长调谐工作原理如图 6 所示[12]。

图 6 中蓝色虚线和红色虚线是两个 MRR 的透射光谱，紫色实线为叠加光谱，波长调谐范围 $\Delta\lambda$ 是两个相邻匹配峰之间的波长范围，由下式给出[13]：

$$\Delta\lambda = \frac{FSR_1 \cdot FSR_2}{FSR_2 - FSR_1} \tag{5}$$

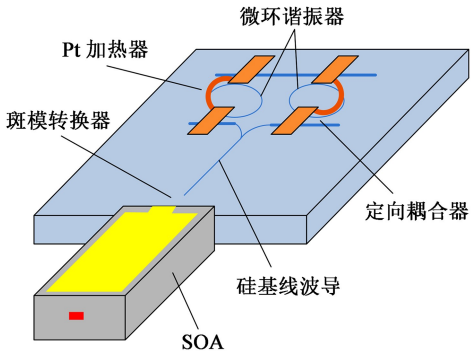


图 5　双 MRR 的硅基波导 ECDL 结构示意图

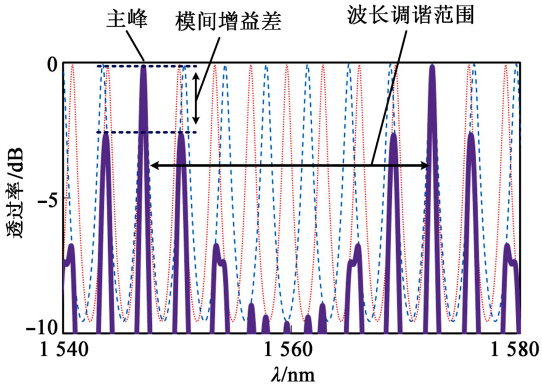


图 6　双 MRR 的波长调谐工作原理

2　ECDL 研究进展

2.1　衍射光栅型 ECDL 研究进展

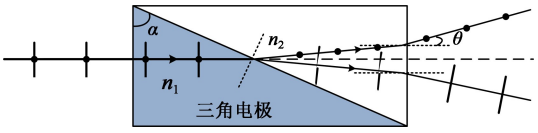
2.1.1　Littrow-ECDL

Littrow 型外腔半导体激光器（Littrow-ECDL）具有窄线宽、宽调谐范围、结构简单、输出功率大等优点，科研人员对其进行了大量研究。

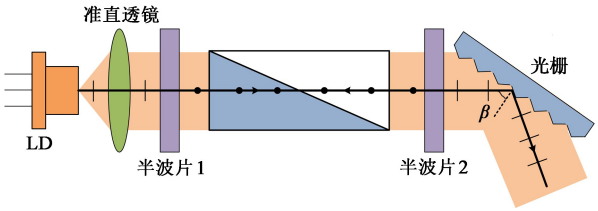
2011 年魏芳等[15]提出了一种使用锆钛酸铅镧陶瓷（PLZT）电光偏转器作为波长可调谐元件构成的稳定可调谐 Littrow-ECDL，其结构如图 7 所示，该激光器不用旋转光栅，通过调节 PLZT 上的电压，改变光束入射光栅角度，在 780.5 nm 处实现了 420 GHz 的单模大调谐范围（存在跳跃点），由于没有机械移动，激光器的稳定性较高。

2012 年 Britzger 等[16]提出了一种基于衍射光栅的二阶 Littrow-ECDL，采用三端口光栅耦合腔，结构如图 8 所示，原理是使用光栅二阶衍射光沿入射光路反馈回增益芯片，选择一级衍射方向为垂直光栅方向进行激光输出，该耦合腔的精细度高达

1 855，调谐范围超过几千兆赫兹。



(a) PLZT 的电光偏转原理图



(b) PLZT 可调谐 ECDL 结构示意图

图 7 PLZT-Littrow-ECDL 示意图

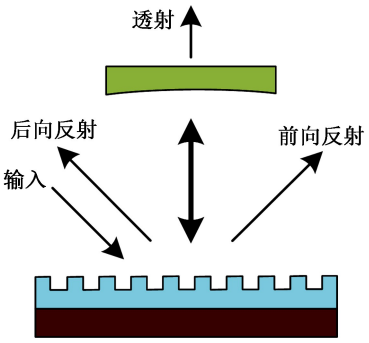


图 8 三端口光栅耦合腔示意图

为提高激光器的频率稳定性，2007 年袁杰等[17]采用普通的商用 LD 构建 Littrow-ECDL，实现线宽小于 1 MHz、连续可调谐范围大于 3 GHz 的 780 nm 波段输出，对激光器进行原子饱和吸收谱高次谐波稳频，得到了 10^{-12} 量级的短期频率稳定度。2016 年 Bayrakli[18]提出一种使用边缘稳定技术对频率进行主动稳定的 Littrow-ECDL，通过将激光频率锁定到 FPI 传输峰侧面，使激光的线宽从 160 kHz 缩小到 400 Hz，实现了 ECDL 的亚千赫兹频率稳定，同时通过旋转衍射光栅实现了 60 nm 波长调谐范围。

为了进一步抑制内腔 FP 振荡模式，研究人员使用单角度面(SAF)增益芯片构建 ECDL。2016 年，Shin 等[19]报道了使用 SAF 增益芯片和衍射闪耀光栅构成 Littrow-ECDL，SAF 单边倾斜出射激光，最大程度抑制了芯片内腔 FP 振荡模式和减少内腔与外腔之间的干扰，实现了 100 nm 的宽调谐范围、洛伦兹线宽为 4.2 kHz@22.5 ms、激光输出功率达 300 mW@600 mA 和良好的频率稳定性 40 kHz@11 h。

2017 年 Bayrakli[20]提出了一种双波长 Littrow-ECDL，其结构如图 9 所示，该激光器使用反射率仅为 0.005%的 SAF 增益芯片，芯片输出激光经准直后，通过分光器分为两束 TM 偏振光传输到两个衍射光栅分别进行反馈和选频，实现光谱 1 470～1 590 nm 范围、120 nm 双波长调谐。

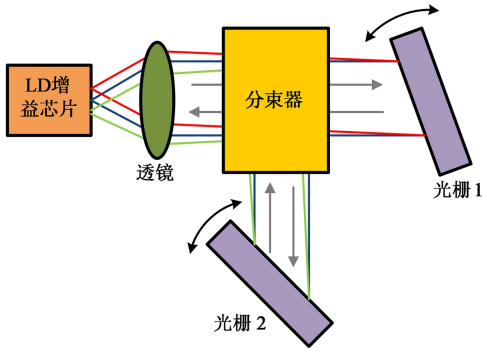


图 9 双波长 Littrow-ECDL 结构示意图

为了获得大功率的可调谐蓝光激光器，2017 年 Ding 等[21]提出了一种基于 GaN LD 的 Littrow-ECDL，通过光栅线与增益芯片 pn 结平面平行的方式，实现光谱线宽从 1 nm 压窄至 0.1 nm，中心波长的输出功率高达 1.24 W，调谐范围为 3.6 nm (443.9～447.5 nm)的可调谐大功率蓝光激光。同年李斌等[22]报道了使用反射全息光栅构建蓝光 Littrow-ECDL，该激光器实现了窄线宽为 50 pm、SMSR 大于 20 dB、调谐范围达 2 nm、最大输出功率为 500 mW 的稳定高功率 410 nm 蓝紫色激光。

2.1.2 Littman-ECDL

随着半导体制备工艺和光学镀膜技术的发展，Littman 型外腔半导体激光器(Littman-ECDL)在实现窄线宽的同时可以获得高激光输出功率。

2009 年陈迪俊等[23]研究了一种具有衍射光栅 Littman-ECDL 的偏振特性，理论分析了 ECDL 的偏振性能。2013 年，魏芳等[24]报道了一种采用星形柔性铰链调谐结构的 Littman-ECDL，该结构坚固紧凑，实现了工作波长为 780 nm 的单模输出，其线宽为 200 kHz，无跳模调谐范围大于 80 GHz。

为了实现外腔激光器的小型化，2012 年，张迪等[25]提出了一种基于单轴 MEMS 反射镜的小型超窄线宽可调谐 ECDL，如图 10 所示，由 SAF 增益芯片、准直透镜、熔融石英标准具、衍射光栅和单轴 MEMS 镜构成 Littman-ECDL，衍射光栅和 MEMS 镜组成可调谐光学滤波器(TOF)，TOF 与标准具滤波器结合使用，实现在 C 波段约 40 nm 的宽波长调谐范围以及小于 50 kHz 的窄线宽，激光器在整个调

谐范围的波长精度达到±1 GHz。

2017 年 Jimenez 等[26]研制了基于微型 Littman 结构、体全息光栅和微透射光栅三种结构的小型可调谐 ECDL。这种小型激光器被封装在紧凑的空间内，具有输出功率高、窄线宽、可调谐、边模抑制比大等特点，可实现便携性和手持设备操作，克服了传统外腔激光器不可携带的缺点。该三种结构 ECDL 在 1.4 μm 的水蒸气吸收带内具有超过 50 mW 的功率值，以及大于 50 dB 的边模抑制比和低于 100 kHz 的线宽，其中，体全息光栅 ECDL 具有 20 GHz 调谐范围，微透射光栅 ECDL 调谐范围大于 40 nm。

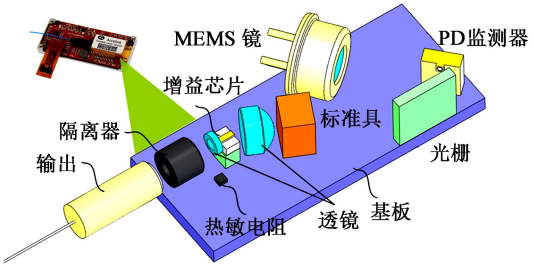


图 10　MEMS-ECDL 结构示意图

2.2　FBG-ECDL 的研究进展

随着光纤光栅的刻写工艺不断成熟，FBG-ECDL 引起了国内外研究机构的广泛关注。

2014 年，Duraev 等[27]报道了在单模光纤中形成 FBG 的单频可调谐 ECDL，通过调节 FBG 温度，实现了 1.5 nm 的波长调谐范围、窄线宽 10 kHz 和 5～10 mW 的输出功率。

2016 年，魏芳等[28]报道了一种采用光纤布拉格光栅 Fabry-Perot 腔(FBG-FP)进行自注入锁定的 ECDL，如图 11 所示，该设计由于长外腔和高品质因数的 FBG-FP 腔共振的光反馈，极大抑制了相位和频率噪声，实现了激光器洛伦兹线宽低至 125 Hz、相对强度噪声小于－142 dBc/Hz 和 0.8 nm 的调谐范围。

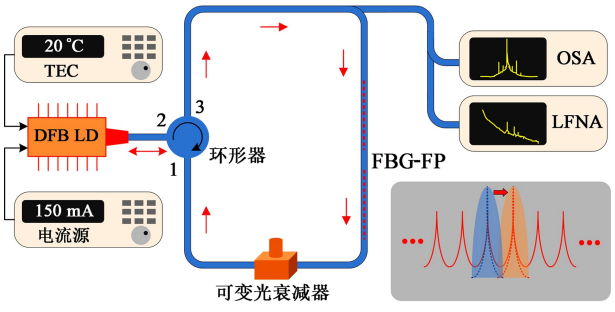


图 11　FBG-FP 外腔半导体激光器

2017 年张丽等[29]提出了一种基于增强热敏性 FBG 的紧凑无跳模 ECDL，实现了 65 pm/℃的高热调谐速度、0.5 nm 连续无跳模调谐范围和 35 kHz 窄线宽。

2018 年孙光伟等[30]研制了一种 1 550 nm 波段窄线宽低噪声的保偏 FBG-ECDL，如图 12 所示。增益芯片通过锥透镜与保偏单模 FBG 进行偏振耦合，可直接实现激光的保偏输出，蝶形封装后激光器输出功率大于 30 mW，洛伦兹线宽为 4.85 kHz，在 1 kHz 处的积分线宽为 15.9 kHz，相对强度噪声小于－155 dB/Hz@1 MHz，偏振消光比小于 25 dB，无跳模电流调谐范围大于 8 GHz，无跳模温度调谐范围大于 14 GHz，6 h 功率稳定度为 1.7%，频率漂移量小于 50 MHz。

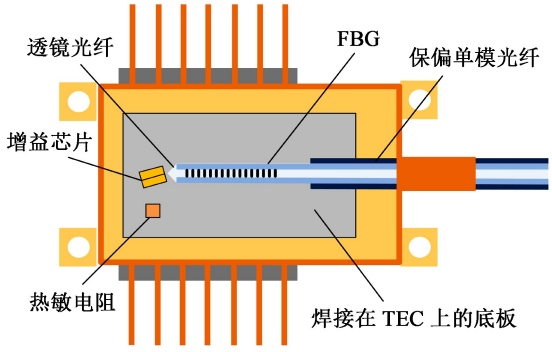


图 12　集成 FBG-ECDL 结构示意图

2.3　波导型外腔半导体激光器研究进展

2.3.1　硅基波导 ECDL

波导型 ECDL 具有外腔的窄线宽和宽调谐范围特性，同时具备单片集成激光器的低损耗、高集成度和高可靠性的特点，近年来受到了科研人员的青睐。

2006 年 Ishizaka 等[31]报道了采用 SiO_2 双环谐振器(MRR)的平面光波导(PLC)和半导体光放大器(SOA)组成的 ECDL，结构如图 13 所示，该激光器实现了 45 nm 的波长调谐范围。

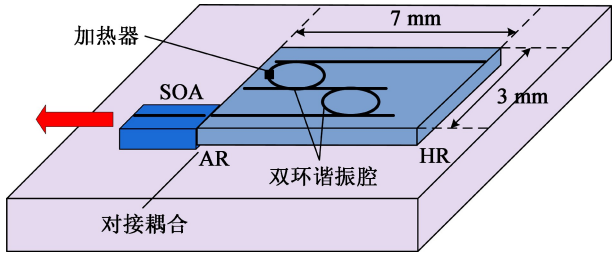


图 13　双 MRR-PLC-ECDL 结构示意图

2009 年 Takeuchi 等[13]提出了一种采用 SiON

波导三个 MRR 组成的 ECDL，将 SOA 无源对准并安装在 SiO_2 波导基板上，利用三环结构比双环结构有更大的模间增益差异，提供更稳定的激光发射，激光器具有超过 15 dBm 的高光纤输出功率和 60 nm 的宽可调谐范围（L 波段，50 GHz 间隔，147 个通道）。

与传统 SiON 波导相比，硅基波导具有尺寸小、功耗低、热光系数高、调谐范围大等优点。2009 年，储涛等[32]制作了第一台利用硅光子技术制造的可调谐 ECDL，如图 14 所示。该激光器主要由 SOA 和硅基双 MRR 的外腔芯片组成，器件结构紧凑，外腔面积仅为 700 μm×450 μm，在 26 mW 的调谐功耗下，获得了 38 nm 的最大调谐范围。

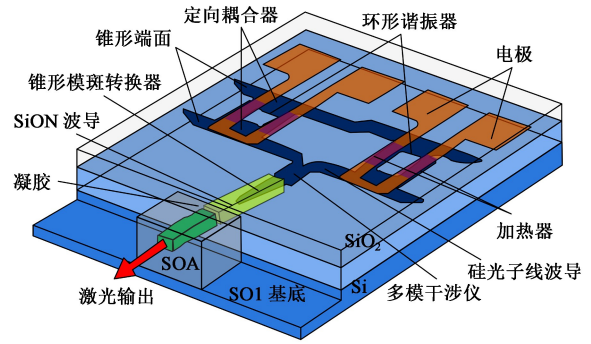


图 14 双 MRR 硅基波导 ECDL

2011 年 Suzuki 等[12]采用硅基线波导双 MRR 制作的 ECDL，实现了 225 kHz 的窄线宽和 45 nm 的波长调谐范围。在此基础上，2015 年 Kobayashi 等[33]报道了一种利用被动对准技术制作的硅基混合 MRR 外腔，通过腔长设计和两段 SOA 实现了高功率、窄线宽、高可靠性的可调谐 ECDL，该激光器在整个 C 波段实现了超过 100 mW 的光纤耦合输出功率和小于 15 kHz 的线宽。同年，Komljenovic 等[34]提出了一种采用腔长为 4 cm 的低损耗硅基波导构建宽调谐窄线宽的单片集成 ECDL，通过控制外腔双 MRR 的光反馈，实现窄线宽低于 100 kHz，在 O 波段大于 54 nm 的调谐范围。

Mach-Zehnder 干涉仪（MZI）具有窄带滤波的特性，使最大透射率处相邻波长的透射率最小，将 MZI 集成到 ECDL 中可提高波长选择性。2014 年，Debregeas 等[35]报道了反射型 SOA 和 SiO_2 平面光波导混合集成的 ECDL，外腔由两个 MRR 组成，第一个 MRR 的 FSR 设置为 25 GHz，第二个 MRR 内集成 MZI，实现了 +5 dBmW 输出功率、C 波段 35 nm 调谐范围，以及 2 kHz 超窄线宽。

2015 年 Tang 等[36]提出了一种具有高度非对称 MZI 的硅基波导 ECDL，如图 15 所示。外腔波导由两个具有不同半径的硅基 MRR 和一个高度非对称的 MZI 组成，高度不对称的 MZI 增加了模间增益差异，获得了 12 kHz 的光谱窄线宽以及 C 波段 42.7 nm 的宽调谐范围。

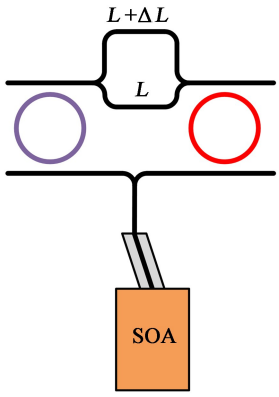


图 15 具有 MZI 的硅基波导 ECDL

2014 年 Fan 等[37]报道了使用两个 MRR 的 Si_3N_4/SiO_2 波导 ECDL，实现了激光输出功率 5.7 mW、SMSR 大于 50 dB，窄线宽 24 kHz，以及 1 531.0～1 577.8 nm 的宽可调谐范围 46.8 nm。

此后，该课题组不断改进激光器性能参数，2016 年他们[38]提出了首个 InP-RSOA 和 Si_3N_4 外腔波导集成的 ECDL，通过提高对准精度和增加驱动电流来改善激光器的性能，激光器实现了在 C 波段超过 43 nm 的调谐范围，窄线宽为 87 kHz，SMSR 为 35 dB，相对强度噪声小于 −135 dBc/Hz。2017 年该课题组[39]改进了 InP-Si_3N_4 集成的 ECDL，采用锥形波导高效率耦合 InP-RSOA 和 Si_3N_4 波导，如图 16 所示，外腔波导由相位调节部分、可调环形镜和三个高 Q 值 MRR（$Q_1\approx20\,000$，$Q_2\approx20\,000$，$Q_3\approx260\,000$）组成，获得了 290 Hz 的最小线宽和 81 nm 的最大调谐范围。

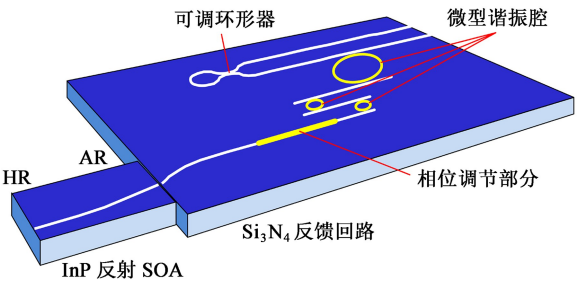


图 16 InP-Si_3N_4 型 ECDL 示意图

2017 年 Stern 等[40]报道了一种基于低损耗氮

化硅单环形波导的紧凑型窄线宽 ECDL，利用高 Q 值 Si_3N_4-MRR 的窄带背向反射特性，获得 13 kHz 的激光窄线宽，SMSR 为 41 dB，以及在 1 550 nm 波段获得 1.7 mW 的输出功率和 27 nm 的调谐范围。

2.3.2　其他波导 ECDL

2009 年 Hieta 等[41]报道了利用体全息光栅(VHG)作为频率选择反馈元件的长腔和短腔两种 ECDL，如图 17 所示。

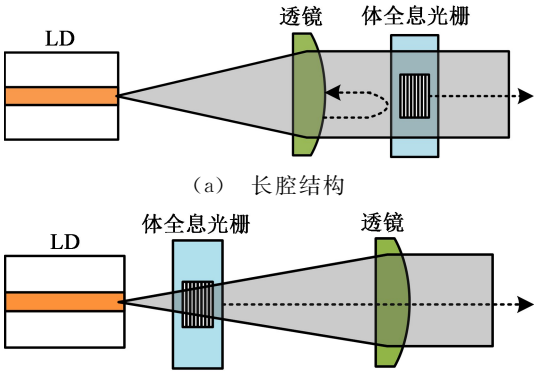


图 17　VHG-ECDL 结构示意图

长腔 ECDL 设计工作波长为 635 nm，腔长 15 mm，通过 PZT 同步调谐外腔长度和光栅角度，得到可调谐范围 28 GHz，线宽 900 kHz，SMSR 大于 35 dB。为了得到更大的调谐范围，提出了短腔设计，VHG 紧靠 LD，结构紧凑坚固，工作波长为 658 nm，通过温度调谐方法得到 145 GHz 的连续无模跳调谐范围，线宽为 30 MHz。

中国科学院半导体研究所[44-45]对利用光纤环反馈的 ECDL 进行了研究。2015 年余力强等[44]提出了一种基于光纤波导双循环自注入压缩线宽方法的可调谐 ECDL，如图 18 所示。它使用两个长度不同的光纤环路，目的是利用游标效应来抑制外腔中的有害杂散模式，实现线宽小于 10 kHz，与本征线宽 12.5 MHz 相比压窄了 3 900 倍，通过调节 DBR 电流，得到调谐范围为 13 nm，SMSR 大于 38 dB。

对使用干涉滤光片反馈的 ECDL 进行了研究。2012 年，Thompson 等[46]报道了采用具有多模带宽的干涉滤波器进行模式选择的 ECDL，实现了 26 kHz 的窄线宽和 14 nm 的波长调谐范围。2018 年，刘金玉等[47]报道了一种基于窄带干涉滤光片的反馈量可变猫眼型 852 nm ECDL，如图 19 所示。

将超窄带宽滤光片作为激光纵模选择元件，猫眼透镜配合平面反射镜进行光反馈，通过旋转窄带滤光片，从正入射 0°角到最大可旋转角 16°，得到激光波长粗调谐范围 14 nm，激光输出功率 56 mW，在单滤光片下线宽为 211 kHz，双滤光片下线宽为 187 kHz，利用压电陶瓷改变腔长，得到频率连续调谐范围大于 1.5 GHz。

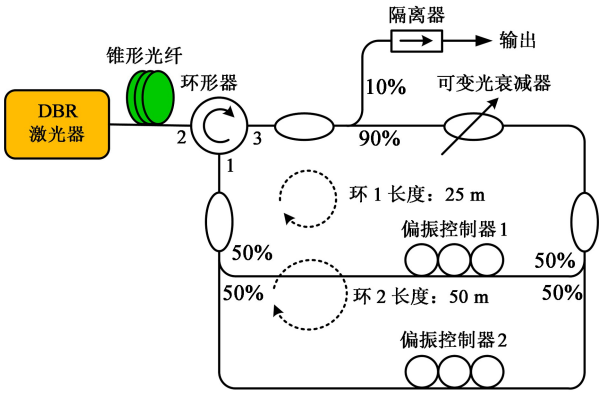


图 18　双光纤环的 DBR-ECDL 结构图

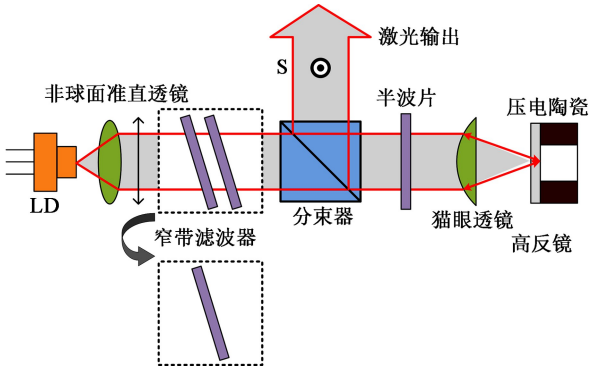


图 19　反馈量可调谐的双滤光片 ECDL 原理图

3　总结与展望

外腔半导体激光器由于具有宽调谐范围和窄线宽等优异特性而受到了广泛关注，目前研究的 ECDL 主要集中在 Littrow 与 Littman 衍射光栅型 ECDL、FBG-ECDL 和硅基波导 ECDL，表 1 对比了几种 ECDL 的性能参数。

ECDL 采用外腔反馈技术使得线宽得到极大压窄，一般都能达到千赫兹级别。衍射光栅 ECDL 通过改变光栅角直接获得大的调谐范围，输出光功率大，但是一般采用机械调谐，调谐速度较慢，虽然研究员对此进行了许多改进，但是调谐速度依然仅达到几十毫秒以上。衍射光栅 ECDL 的另一个缺点是体积较大，光路准直和激光稳定困难，通过结合 MEMS 技术来降低光路系统复杂性和提高稳定性，可以制作出结构紧凑坚固的激光器，甚至实现可携带的蝶形封装。光纤光栅 ECDL 具有结构简单、波

长稳定性和可控性好、易与光纤耦合的特点，被应用在许多光纤通信和传感系统中，但是激光器的调谐范围仅有几纳米，限制了其在其他方面的应用。得益于硅基光子技术的发展，波导 ECDL 近年来受到了人们的广泛关注，硅基波导 ECDL 具有结构紧凑、成本低、可大规模生产、封装一体化、体积小等优良特性，在实现窄线宽的同时具有宽的调谐范围，且 MRR 的 FSR 可以设置为 WDM 系统中 ITU-T 标准的波长间隔，被认为是未来 WDM 系统的最佳选择。目前硅基波导 ECDL 的技术难点是如何提高耦合效率和降低耦合处反射率。另外，热光效应调谐过程中的热积累和消散需要一定的时间，影响了高速调谐，如何进一步提高调制速度是一大挑战。

表 1 几种典型 ECDL 性能参数比较

ECDL 类型	Littrow	Littman	MEMS	FBG	硅基波导
调谐机制	机械	机械	MEMS	机械热	热
线宽/kHz	10	小于 10	几十	几十	10
调谐范围/nm	可达 100	几十	几十	几	几十
输出功率/mW	几十	高于几	几十	几	几十
SMSR/dB	50	50	50	40	50
调谐速度	慢	慢	小于 15 ms	ms	ms
成本	低	高	高	低	低
结构	简单	复杂	紧凑	简单	小

可调谐外腔半导体激光器正朝着窄线宽、宽调谐范围、高输出功率等方向发展。通过新材料(光学反馈元件、半导体激光器)的选择、新的外腔结构设计，以及主动稳频等技术来改善激光器的光谱质量，满足各种应用的要求，实现体积小、线宽窄、调谐范围宽、无模式跳变、扫描频率快、频率和波长稳定、相位和频率噪声低，以及与光纤耦合的高性能激光器，在未来光通信和精密测量等领域将有广泛的应用前景。目前，国内对可调谐外腔半导体激光器的研究正逐渐向国际先进水平靠拢，但在产品化和封装技术方面还有一定的差距，如何实现激光器产品化、小型化、集成化、封装化和提高制作生产工艺是今后的重点研究方向。

参考文献：

[1] Zorabedian P, Trutna W R. Interference-filter-tuned, alignment-stabilized, semiconductor external-cavity laser[J]. Opt. Lett., 1988, 13(10): 826-828.

[2] Enshasy H M, Cassidy D T. Sub-micrometre distance measurements with a broadly tunable short-external-cavity InGaAsP/InP diode laser[J]. IET Optoelectron., 2007, 1(4): 157-162.

[3] Sato T, Yamaoto F, Tsuji K, et al. An uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network systems[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 10(7): 1001-1003.

[4] Wang J, Cassidy D T. Broadly tuneable, short external cavity diode laser for optical coherence tomography [J]. IET Optoelectron., 2008, 2(1): 46-54.

[5] Daiber A. Narrow-linewidth tunable external cavity laser for coherent communication[C]// Proc. of 2014 IEEE Photonics Conf., 2014.

[6] Chen Xiao, Sui Qingmei, Miao Fei, et al. Multi-component gas high accuracy detection based on photoacoustic spectrometry and ultra-narrow-linewidth laser [J]. J. of Optoelectron. Laser, 2011, 22(11): 1679-1682.

[7] Wieman C E, Hollberg L. Using diode lasers for atomic physics[J]. Rev. of Scientific Instruments, 1991, 62(1): 1-20.

[8] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, et al. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16}-level laser stabilization [J]. Nature Photonics, 2011, 5: 158-161.

[9] 柴燕杰，吴 群，张汉一，等. 窄线宽外腔半导体激光器[J]. 激光与红外，1988(10)：9-11.
Chai Yanjie, Wu Qun, Zhang Hanyi, et al. Narrow linewidth external cavity diode laser[J]. Laser & Infrared, 1988(10): 9-11.

[10] Henry C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1982, 18(2): 259-264.

[11] Mroziewicz B. External cavity wavelength tunable semiconductor lasers-a review [J]. Opto-Electron. Rev., 2008, 16(4): 347-366.

[12] Suzuki K, Kita T, Yamada H, et al. Wavelength tunable laser diodes with Si-wire waveguide ring resonator wavelength filters[J]. Proc. of SPIE, 2011, 7943: 79431G1-79431G7.

[13] Takeuchi T, Takahashi M, Suzuki K, et al. Wavelength tunable laser with silica-waveguide ring resonators [J]. LEICE Trans. Electron., 2009, 92(1): 198-204.

[14] Corte D F G, Montefusco M E, Moretti L, et al. Temperature dependence analysis of the thermo-optic effect in silicon by single and double oscillator models[J]. J. of Appl. Phys., 2000, 88(12): 7115-7119.

[15] Wei Fang, Sun Yanguang, Chen Dijun, et al. Tunable external cavity diode laser with a PLZT electrooptic ceramic deflector[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(5): 296-298.

[16] Britzger M, Khalaidovski A, Hemb B, et al. External cavity diode laser in second-order Littrow configuration[J]. Opt. Lett., 2012, 37(15): 3117-3119.

[17] 袁 杰，陈徐宗，陈文兰，等. 外腔半导体激光器的设计与高次谐波稳频[J]. 红外与激光工程，2007，36(2)：152-154.
Yuan Jie, Chen Xuzong, Chen Wenlan, et al. Structure design and third-harmonic frequency stabilization of the external cavity semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engin., 2007, 36(2): 152-154.

[18] Bayrakli I. Frequency stabilization at the sub-kilohertz level

of an external cavity diode laser[J]. Appl. Opt., 2016, 55(9): 2463-2466.

[19] 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(20): 2703-2714.

[20] Bayrakli I. Investigation of double-mode operation and fast fine tuning properties of a grating-coupled external cavity diode laser configuration[J]. Opt. and Laser Technol., 2017, 87: 7-10.

[21] Ding Ding, Lv Xueqin, Chen Xinyi, et al. Tunable high-power blue external cavity semiconductor laser[J]. Opt. and Laser Technol., 2017, 94: 1-5.

[22] Li Bin, Gao Jun, Yu Anlan, et al. 500 mW tunable external cavity diode laser with narrow line-width emission in blue-violet region[J]. Opt. and Laser Technol., 2017, 96: 176-179.

[23] Chen Dijun, Fang Zujie, Cai Haiwen, et al. Polarization characteristics of an external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(14): 984-986.

[24] 魏　芳，陈迪俊，辛国锋，等. 紧凑坚固 Littman-Metcalf 型可调谐外腔半导体激光器[J]. 中国激光，2013，40(11)：1101012.
Wei Fang, Chen Dijun, Xin Guofeng, et al. A compact and rugged tunable external cavity diode laser with Littman-Metcalf configuration[J]. Chinese J. of Lasers, 2013, 40(11): 1101012.

[25] Zhang Di, Zhao Jianyi, Yang Qi, et al. Compact MEMS external cavity tunable laser with ultra-narrow linewidth for coherent detection[J]. Opt. Express, 2012, 20(18): 19670-19682.

[26] Jimenez A, Milde T, Staacke N, et al. Narrow-line external cavity diode laser micro-packaging in the NIR and MIR spectral range[J]. Appl. Phys. B, 2017, 123(7): 207.

[27] Duraev V P, Medvedev S V. Single-frequency tunable semiconductor lasers[J]. Semiconductors, 2014, 48(1): 120-122.

[28] Wei Fang, Yang Fei, Zhang Xi, et al. Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Opt. Express, 2016, 24(15): 17406-17415.

[29] Zhang Li, Wei Fang, Sun Guangwei, et al. Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2017, 29(4): 385-388.

[30] 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)：0601004.
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): 0601004.

[31] Ishizaka M, Yamazaki H. Wavelength tunable laser using silica double ring resonators[J]. Electronics and Communications in Japan, 2006, 89(3): 407-414.

[32] Chu Tao, Fujioka N, Ishizaka M. Compact, lower-power-consumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic-wire waveguide micro-ring resonators[J]. Opt. Express, 2009, 17(16): 14063-14068.

[33] Sato K, Kobayashi N, Namiwaka M, et al. Demonstration of silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers[C]// Proc. of European Conf. on Optical Communication, IEEE, 2015.

[34] Komljenovic T, Srinivasan S, Norberg E, et al. Widely tunable narrow-linewidth monolithically integrated external-cavity semiconductor lasers[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2015, 21(6): 1501909.

[35] Debregeas H, Ferrari C, Cappuzzo M, et al. 2 kHz linewidth C-band tunable laser by hybrid integration of reflective SOA and SiO_2 PLC external cavity[C]// Proc. of Semiconductor Laser Conf. IEEE, 2014: 50-51.

[36] Tang R, Kita T, Yamada H. Narrow-spectral-linewidth silicon photonic wavelength-tunable laser with highly asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2015, 40(7): 1504-1507.

[37] Fan Youwen, Oldenbeuving R, Klein E J, et al. A hybrid semiconductor-glass waveguide laser[C]// Proc. of Laser Sources and Applications Ⅱ. Inter. Society for Optics and Photonics, 2014.

[38] Fan Youwen, Epping J P, Oldenbeuving R M, et al. Optically integrated InP-Si_3N_4 hybrid laser[J]. IEEE Photon. J., 2016, 8(6): 1-11.

[39] Fan Youwen, Oldenbeuving R M, Hoekman M, et al. 290 Hz intrinsic linewidth from an integrated optical chip-based widely tunable InP-Si_3N_4 hybrid laser[C]// Proc. of IEEE Lasers & Electro-Optics, 2017.

[40] Stern B, Ji Xingchen, Dutt A, et al. Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator[J]. Opt. Lett., 2017, 42(21): 4541-4544.

[41] 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]. Opt. Commun., 2009, 282(15): 3119-3123.

[42] Zhao Yang, Peng Yu, Yang Tao, et al. External cavity diode laser with kilohertz linewidth by a monolithic folded Fabry-Perot cavity optical feedback[J]. Opt. Lett., 2011, 36(1): 34-36.

[43] Hansch T, Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity[J]. Opt. Commun., 1980, 35(3): 441-444.

（下转第 56 页）

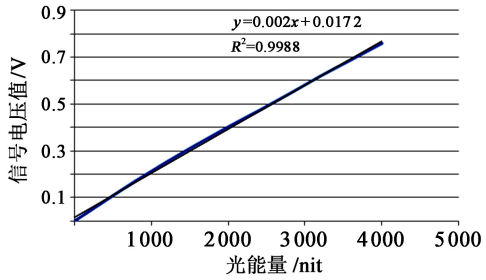


图 10 线性度测试曲线

5 结论

本文设计了一款长线列小像元 CMOS 图像传感器，像元尺寸为 20 μm×20 μm，阵列为 5×1 030，电路设计基于标准 0.35 μm 3.3 V 工艺。文章详细介绍了 CTIA 积分器的设计思路，采用单端放大器来减小器件功耗和面积；对于输出缓存器的设计，采用无体效应的 PMOS 源跟随器。仿真分析及芯片实测结果都证明采用无体效应的 PMOS 源跟随器寄生电容小，可有效提高信号的读出速率，且线性度好。通过优化版图，减小了寄生电阻和寄生电容的影响。经过流片测试验证，电路各项功能正常，器件在读出速率、线性度和摆幅方面都达到设计要求。

参考文献：

[1] 徐 敏，赵毅强，刘文娟，等. 基于长线列探测器的图像非均匀性研究与校正[J]. 传感器与微系统，2013，32(7)：15-17.
Xu Min，Zhao Yiqiang，Liu Wenjuan，et al. Research and correction of non-uniformity image based on long linear array detectors[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2013，32(7)：15-17.

[2] Xu Ruoyu，Yuan Jie. A 1/2.5 inch VGA 400 f/s CMOS image sensor with high sensitivity for machine vision[J]. IEEE J. Solid State Circuits，2014，49(10)：2342-2351.

[3] 李金洪，邹 梅. 低照度 CMOS 图像传感器设计与实现[J]. 红外与激光工程，2018，47(7)：0720002.
Li Jinhong，Zou Mei. Design and realization of low-light-level CMOS image sensor[J]. Infrared & Laser Engineering，2018，47(7)：0720002.

[4] 袁红辉. 一种单端输入的 CMOS 图像传感器设计[J]. 科学技术与工程，2011，32(11)：1671-1815.
Yuan Honghui. A design of a single-ended input CMOS image sensor[J]. Science Technology and Engineering，2011，32(11)：1671-1815.

[5] 袁红辉，陈永平，黄志伟，等. 一种四采样低噪声 CMOS 光电探测器读出电路[J]. 光电子，2019，9(2)：83-91.
Yuan Honghui，Chen Yongping，Huang Zhiwei，et al. Development of an optimized sampling readout circuit for CMOS detector[J]. Optoeletronics，2019，9(2)：83-91.

[6] 文 勇，刘思超，金友山，等. CTIA 型读出电路非线性的研究[J]. 激光与红外，2009，39(9)：978-981.
Wen Yong，Liu Sichao，Jin Youshan，et al. Investigation on the nonlinearity of CTIA readout circuit[J]. Laser & Infrared，2009，39(9)：978-981.

[7] 岳冬青，吉晶晶，宁 提，等. 小像元红外探测器读出电路设计[J]. 激光与红外，2019，49(9)：1130-1134.
Yue Dongqing，Ji Jingjing，Ning Ti，et al. Research on ROIC design of small pixel infrared detector[J]. Laser & Infrared，2019，49(9)：1130-1134.

[8] 王成刚，刘泽巍，袁 媛，等. 多谱段线列红外探测器读出电路设计优化[J]. 激光与红外，2019，47(6)：736-739.
Wang Chenggang，Liu Zewei，Yuan Yuan，et al. Optimization and design of ROIC for multispectral linear infrared detector array[J]. Laser & Infrared，2019，47(6)：736-739.

作者简介：

徐 星(1978—)，女，硕士，高级工程师，主要研究方向为 CMOS 图像传感器。

(上接第 19 页)

[44] Yu Liqiang，Lu Dan，Pan Biwei，et al. Widely tunable narrow-linewidth lasers using self-injection DBR lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2015，27(1)：51-53.

[45] Li Zhaosong，Lu Dan，He Yiming，et al. Improving the performance of narrow linewidth semiconductor laser through self-injection locking[C]// Proc. of IEEE Photon. Conf.，2017：655-656.

[46] Thompson D J，Scholten R E. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter[J]. Rev. of Scientific Instruments，2012，83(2)：023107.

[47] 刘金玉，何 军，王军民. 852 nm 窄带滤光片外腔反馈半导体激光器的优化[J]. 量子光学学报，2018，24(1)：98-106.
Liu Jinyu，He Jun，Wang Junmin. Optimization of 852 nm external-cavity diode laser with narrow-bandwidth filter[J]. J. of Quantum Opt.，2018，24(1)：98-106.

作者简介：

花金平(1996—)，男，硕士生，主要研究方向为光纤传感技术、外腔半导体激光器；

江 毅(1967—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光纤传感技术。