

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311791

窄线宽外腔半导体激光器研究进展*

秦晓敏¹, 史田田², 王志洋¹, 史航博¹, 陈景标^{1,3}

(1. 北京大学电子学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室量子电子学研究所 北京 100871;
2. 北京大学集成电路学院微米/纳米加工技术国家级重点实验室 北京 100871; 3. 合肥国家实验室 合肥 230088)

摘要:窄线宽外腔半导体激光器具有结构简单、可调谐、噪声低等优势,广泛应用于量子精密测量、光通信、激光雷达等领域。根据外腔选频器件的不同,本文主要介绍光栅型激光器、干涉滤光型激光器、波导型激光器和法拉第激光器四类外腔半导体激光器,分析各类激光器的基本结构与选频机制,介绍各自的优缺点以及国内外研究进展。其中,前三类激光器采用非量子器件进行频率选择,而法拉第激光器利用共振法拉第旋光效应选频,输出波长直接对应原子跃迁谱线,对激光二极管的电流与温度变化具有良好的鲁棒性。随后介绍外腔半导体激光器的应用情况,尤其是在精密测量领域中的典型应用。最后总结并展望窄线宽外腔半导体激光器的未来发展方向。

关键词:外腔半导体激光器;法拉第激光器;窄线宽;精密测量;外腔选频器件。

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research progress of narrow-linewidth external cavity diode lasers

Qin Xiaomin¹, Shi Tiantian², Wang Zhiyang¹, Shi Hangbo¹, Chen Jingbiao^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Institute of Quantum Electronics, School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, School of Integrated Circuits, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

Abstract: Narrow-linewidth external cavity diode lasers (ECDLs) have the advantages of compact structure, tunable wavelength, and low noise. They are widely used in quantum precision measurement, optical communication, laser radar, and other fields. In this article, four types of narrow linewidth ECDL using different frequency selection devices are introduced, including grating-ECDL, interference filtering ECDL, waveguide-ECDL, and Faraday laser. The article presents the basic structure and frequency selection mechanism, advantages and disadvantages of the ECDLs, as well as their international research progress. The first three types of ECDLs use non-quantum devices for frequency selection, while Faraday lasers utilize the resonant Faraday optical rotation effect for frequency selection. Therefore, the output wavelength corresponds to the atomic transition line directly and has good robustness against the fluctuations of the diode temperature and current as well. Then, the applications of these ECDLs are introduced, especially their typical applications in precision measurement. Finally, the future development of narrow linewidth ECDL is summarized and prospected.

Keywords: external cavity diode laser; Faraday laser; narrow linewidth; precision measurement; external-cavity frequency selection device

0 引言

精密测量技术的发展极大地推动了物理发展的进

程,在众多物理量的测量中,时间频率测量凭借其优良的准确度和稳定度脱颖而出,成为目前精度最高的可测量物理量。1967年,第十三届国际计量大会对时间单位秒进行重新定义,从基于地球公转的“天文秒”改成基于原

收稿日期:2023-08-11 Received Date: 2023-08-11

* 基金项目:科技创新2030—“量子通信与量子计算机”重大项目(2021ZD0303200)、中国博士后科学基金项目(BX2021020)、温州市重大科技创新重点项目(ZG2020046)资助

子跃迁的“原子秒”,规定铯 133 (cesium 133, ^{133}Cs) 原子基态两个超精细能级间跃迁对应辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间为 1 s^[1]。这里提到的跃迁为不受外场干扰的 ^{133}Cs 原子基态超精细能级 $^2S_{1/2} F=4, M=0 \rightarrow F=3, M=0$ 跃迁,并且铯原子在绝对零度时是静止的。2018 年,第 26 届国际计量大会决定重新定义秒,将 ^{133}Cs 原子非扰动基态超精细跃迁频率定义为常数 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$,并用该常数表示时间单位秒,1 s = 9 192 631 770 / $\Delta\nu_{\text{Cs}}$,2019 年 5 月 20 日起生效^[2]。利用量子能级跃迁产生准确、稳定的时间频率的设备称为原子钟,其被广泛应用于前沿科学探索^[3-4]、守时授时^[5]、导航定位^[6]等领域。随着冷原子物理、激光稳频等技术的不断发展,原子钟的性能日益提升,目前国际上性能最好的离子光钟,其系统频移不确定度已进入 10^{-19} 量级^[7-8]。半导体激光光源作为原子钟的核心器件之一,其特性对钟性能的影响至关重要。在被动型光钟以及吸收谱测量中,为了精确探测到窄线宽的量子跃迁谱线,要求激光线宽要小于跃迁谱线的线宽;此外还要求所用激光单色性好、频率稳定度高,因此亟需发展高性能的窄线宽激光器。

外腔半导体激光器 (external cavity diode laser, ECDL) 结构紧凑、效率高、可靠性强,相较于传统半导体激光器具有线宽窄、可调谐、频率稳定性高等优势,可以很好地满足精密测量领域对光源的要求,是新型原子钟、原子磁力仪^[9]、原子重力仪^[10-11]等应用的优选激光光源。除了可以应用于量子频率标准^[12]、激光冷却^[13]和高分辨率光谱学^[14]等基础研究之外,窄线宽、可调谐的 ECDL 还被广泛应用于光存储^[15]、光通信^[16]、激光传感^[17-18]、激光雷达^[19]等领域。

1980 年前后,Lang 和 Fleming 等证实了外腔反馈具有压窄激光线宽的效果^[20-21],采用外腔反馈的方法增加纵模选择,减小发射光谱宽度,并可以压制自发辐射噪声,从而有效压窄激光线宽。外腔半导体激光器的输出激光线宽可以表示为^[22]:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_{\text{LD}}}{[1 + (L_{\text{D}}/nL_{\text{LD}})]} \quad (1)$$

其中, n 为激光二极管透光部分的折射率, L_{D} 为外腔长度, L_{LD} 为激光二极管的长度, $\Delta\nu_{\text{LD}}$ 为普通半导体激光器的激光线宽,可采用修正后的 Schawlow-Townes 公式表示^[23]:

$$\Delta\nu_{\text{LD}} = \frac{2\pi h\nu_0(\Delta\nu_{1/2})^2\mu}{P}(1 + \alpha^2) \quad (2)$$

其中, P 为输出功率, $\mu \equiv N_2/(N_2 - N_1)$ 表征粒子数反转, N_1 和 N_2 分别表示下能级和上能级粒子数, $\Delta\nu_{1/2}$ 为谐振腔的腔模线宽, α 为 Henry 耦合参数,1982 年由 Henry 提出^[24], $(1 + \alpha^2)$ 表征由自发辐射引起的 Schawlow-

Townes 线宽修正因子。上式表明,采用外腔可以将半导体激光器的线宽有效压窄。但同时,外腔结构引起的谐振腔长增加会导致相邻纵模间隔减小,以至于远小于半导体激光二极管的增益带宽,很难实现稳定的单纵模输出,因此外腔激光器需要同时搭配外腔选模器件进行模式选择^[22]。

根据外腔器件的不同,本文将外腔半导体激光器划分为光栅型、干涉滤光型、波导型和法拉第激光器四种,其中前三类激光器均采用宏观器件选频,而法拉第激光器利用共振法拉第旋光效应选频。并详细介绍各种类型外腔半导体激光器的结构、原理、研究现状与在精密测量领域的应用情况。

1 研究进展

1.1 光栅型外腔半导体激光器

光栅型外腔半导体激光器采用光栅作为外腔选频器件,实现波长的调谐和线宽的压窄。衍射光栅是由厚度周期性变化、折射率恒定的介质或者折射率周期性变化、厚度恒定的介质组成,它的波长选择性可以用衍射公式表示^[22]:

$$m\lambda = a(\sin\theta_i + \sin\theta_d) \quad (3)$$

其中, λ 为输出波长, m 为衍射阶数, a 为衍射常数, θ_i 和 θ_d 分别为入射角和衍射角。常用的衍射光栅包括反射光栅、透射光栅、闪耀光栅等不同种类。

此外,随着微集成技术的发展,体全息光栅 (volume holographic gratings, VHG) 也被作为外腔反馈元件,应用到 ECDL 中,由于其具有体积小、低于 0.1 nm 的窄光谱响应、低于 0.1° 的空间接收角、衍射效率可接近 100% 等优点^[25],并且具有宽的工作波段和优异的热稳定性,因此在微型化高可靠度的激光器中具有重要意义。光栅型外腔半导体激光器主要分为 Littrow 型和 Littman 型两种构型,它们采用不同的结构实现激光选频。

在 Littrow 外腔半导体激光器中,衍射光栅同时作为选频与反馈器件,其结构如图 1(a) 所示,激光二极管输出的光经过衍射光栅后,一阶衍射光与入射光重合,在腔内振荡形成反馈,零阶衍射光作为输出光,通过调节衍射光栅的角度调节输出激光的波长,同时控制激光输出的方向。其缺点在于,在调节光栅角度进行波长选择时,输出激光的方向也会随之改变,不利于实际应用。通过进一步改变结构,使激光从二极管的后端面输出^[26],这一问题得到了有效的解决,其结构如图 1(b) 所示。目前,Littrow-ECDL 的研究方案大多都是基于改进的 Littrow 结构。

Littman 半导体激光器采用折叠腔结构,在 Littrow 外腔半导体激光器基础上加入一个反射镜,衍射光栅只作

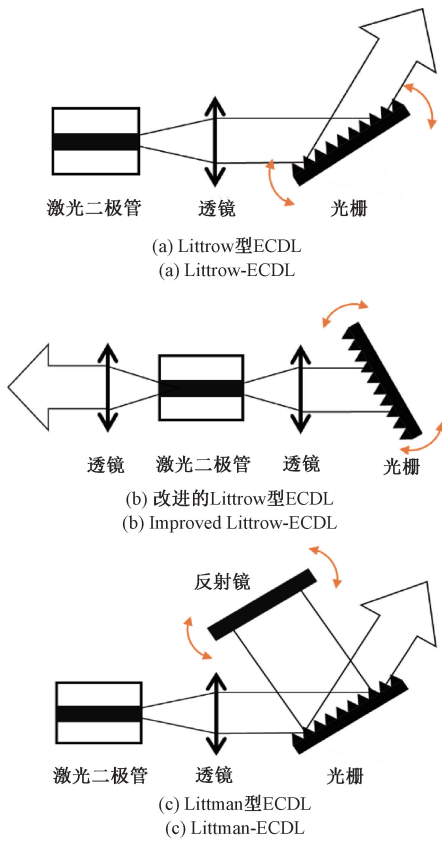


图1 光栅型 ECDL 结构示意图

Fig. 1 Diagram of grating-ECDL architecture

为选频器件,激光反馈通过外腔镜实现,其结构如图1(c)所示,衍射光线经过反射镜反射后再次回到衍射光栅,发生二次衍射后直接反馈回激光二极管,零阶衍射光作为输出激光,通过旋转反射镜的角度调节输出激光的波长。后者的优势在于,经过光栅的两次衍射选频,可以获得更好的模式选择特性;光栅保持固定,在调节输出激光波长的过程中,激光输出方向不会发生变化;且激光波长与入射角无关,因此可以选择大的入射角,提高分辨率。缺点在于,反射镜的引入增加了系统的复杂度。此外,二次衍射会增加腔内损耗,因此需要高反射率的光栅。

1) Littrow 型

早在20世纪60年代,人们就提出利用 Littrow 结构进行多波长激光器的波长选择^[27],并探究如何在选择不同波长时保证输出激光方向不变的方案。经过改进与发展,目前实现的 Littrow-ECDL 已经实现了 kHz 量级的窄线宽和大于 100 nm 的调谐范围。

2019年,中国台湾成功大学的 Chen 等^[28]报道了基于传统 Littrow 结构的 445 nm 蓝光 InGaN 半导体激光器。该激光器通过压电陶瓷 (piezo-electric transducer, PZT) 调节全息光栅,实现了波长调谐范围超过 4 nm,最大输

输出功率为 20 mW,线宽为 4.7 MHz 的单纵模激光输出。

为了克服直脊波导背反射和内腔模的干扰,实现更稳定的激光输出,研究人员提出了采用单角度面 (single-angled-facet, SAF) 增益芯片替代传统增益芯片的方案。2016年,澳大利亚国立大学的 Shin 等^[29]采用 SAF 实现 1 080 nm 的单模 ECDL。波长可调谐范围超过 100 nm,自由运行 ECDL 在 22.5 ms 的积分时间内的高斯拟合线宽达到 22 kHz,洛伦兹拟合线宽为 4.2 kHz,长期频率稳定性优于 40(20) kHz @ 11 h。2020年,Kapasi 等^[30]报道了一种用于引力波探测的 2 μm 波段窄线宽可调谐激光器。采用商用的 SAF 增益芯片和衍射光栅组成 Littrow 型外腔结构,光栅由 PZT 控制,10 ms 的积分时间内线宽达到 20 kHz。可用激光输出功率超过 9 mW,在二极管大电流下可达 15 mW,波长调谐范围为 120 nm。

2) Littman 型

1978年,Littman 和 Metcalf^[31]首次提出 Littman-Metcalf 外腔结构,并将其用于染料激光器。1994年,Chen 等^[32]将该结构应用到 ECDL 中。目前这种结构已成为光栅型 ECDL 的经典结构之一。在 Littman 结构中,衍射光栅用于频率选择,输出激光的调谐通过旋转反射镜的角度实现。相较于 Littrow-ECDL,Littman-ECDL 输出激光方向不变,通过两次衍射选频,输出激光线宽相对较窄,但输出激光功率更小。

2018年,Torcheboeuf 等^[33]报道了用于工作波长为 2.2 μm 的微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 可调谐 Littman-ECDL,该系统由镀增透膜激光二极管、准直透镜、衍射光栅和 MEMS 反射镜构成。输出激光的可调谐范围为 222 nm,该范围内功率为 8~24 mW,边模抑制比 >50 dB,频率调谐范围 ~18 GHz。

2019年,德国 Sacher Lasertechnik 公司的 Hoppe 等^[34]提出一种基于 MEMS 的新型 Littman-ECDL,包括弯曲波导的增益芯片、准直透镜、MEMS 反射镜和反射光栅,激光在腔内形成振荡后从半导体增益芯片的背面耦合输出。利用 MEMS 旋转反射镜可以同时改变腔长和角度,并且可以在无跳模的情况下调谐波长,调谐速度可达 kHz 量级。在此基础上,2021年,他们报道了波长覆盖 1 980~2 090 nm 的 MEMS-ECDL^[35]。采用弯曲波导的 GaSb 基激光二极管和共振驱动的 MEMS 驱动器,实现了可快速调谐、无模式跳变的 ECDL。在不同的中心波长下,具有从 8.4~34 GHz 的无跳模频率范围,可用于环境监测、医学等应用领域。

3) 体全息光栅型

VHG 具有体积小、光谱响应窄、空间接收角小、衍射效率高等优点,随着微集成技术的发展,被逐渐应用于微型高稳定度激光器中。VHG-ECDL 采用 VHG 作为外腔选频器件,所有微型元件集成在一个基板上,结构紧凑,

体积小,对机械振动的稳定性好;采用微型热电制冷片(thermo-electric cooler, TEC)精确控温,环境适应性更好^[36],有望实现小体积、高稳定性和高可靠性的窄线宽激光器。

2012年,德国斐迪南布劳恩研究所首次提出第一代微集成 ECDL^[37],用于空间铷原子干涉测量实验。该 ECDL 由脊波导增益芯片、准直透镜和 VHG 构成,所有元件均贴装在同一基板上,输出激光功率可达 120 mW, 10 μ s 积分线宽小于 100 kHz,激光连续调谐范围可达几 GHz 以上。在 28.5°C、164 mA 的工作环境下,短期线宽为 60 kHz,本征线宽 3.6 kHz。随后该小组对该 ECDL 的温度控制模块和电路模块进一步优化,2014 年报道的第三代微集成 ECDL^[38]输出功率超过 35 mW,短期线宽小于 47 kHz,本征线宽 3 kHz,连续可调谐范围超过 27.5 GHz,具有出色的机械稳定性和可靠性。2020 年,斐迪南布劳恩研究所为 JOKARUS 任务研制了一款微集成窄线宽 ECDL^[39],采用主振荡光放大机制实现光功率的放大,输出激光中心波长 1 064.490 nm,光功率 570 mW,1 ms 积分线宽为 13 kHz。该 ECDL 通过了 8.8 g_{RMS} 振动测试,被用于太空探测火箭中的碘光谱分析模块。

总的来说,光栅型 ECDL 采用衍射光栅作为外腔选频器,可以同时实现选频与光反馈的功能,激光线宽可以压窄到几 kHz 到几十 kHz 水平,并且能够在微米波段实现 100 nm 甚至亚微米级的调谐范围。然而,传统的光栅型 ECDL 线宽已经很难进一步压窄,并且其输出激光的模式和功率对环境压力、机械变形与温度波动敏感。随着光子集成和 MEMS 技术的发展,实现体积更小、噪声更低、系统更加稳定的 ECDL 将扩展光栅 ECDL 的应用场景,是未来的发展趋势。

1.2 干涉滤光型外腔半导体激光器

传统的 Littrow 和 Littman-Metcalf 型 ECDL 使用衍射光栅进行波长选择,需要精确对准,因此对温度和机械干扰很敏感。窄带滤光器提供了波长选择的另一种方法,因其具有足够窄的带宽,可以确保激光单模运行。此外,这种外腔结构可以采用猫眼反射镜结构,具有自校准特性,能够提高机械鲁棒性。常用的窄带滤光器包括干涉滤光片(interference filter, IF)、法布里-珀罗(Fabry-Pérot, FP)标准具、原子滤光器等,其中 IF 和 FP 标准具采用多光束干涉效应进行选频,本节将对其进行详细介绍。1.4 节将对采用原子滤光器进行选频的法拉第激光器展开介绍。

1) 干涉滤光片型

干涉滤光片是利用多光束干涉原理制成的、只允许特定光谱范围光通过的光学薄膜,具有高透过率和窄带宽的优点。其特点是,透射光和反射光波长会随着入射

光方向的改变而改变,激光输出波长 $\lambda(\theta)$ 和入射光 λ_0 与干涉滤光片夹角 θ 的关系为^[40]:

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \sin^2 \theta / n_{\text{eff}}^2} \quad (4)$$

其中, n_{eff} 表示有效折射率,由式(4)可知,输出波长随入射光与干涉滤光片的夹角可调谐。通过对角度求解偏微分,可以发现该结构对角度的敏感度小于光栅型 ECDL,因此具有更好的抗震动能力。

干涉滤光片型 ECDL^[40-41]的结构如图 2 所示,二极管输出的光经过准直透镜后通过 IF,而后经过猫眼反射镜反射后形成光反馈,通过调整滤光片的角度可以改变输出激光的波长。与 Littrow 或 Littman 结构相比,采用 IF 和猫眼反射镜取代光栅选择激光波长,形成外腔,可以更容易地调整激光频率和优化光反馈,具有更大的对准公差和更宽的可调谐性,可以提供更好的鲁棒性和稳定性,并且具有窄线宽和可调谐的特点。

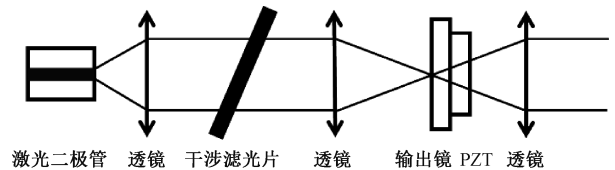


图2 干涉滤光片型 ECDL 结构示意图

Fig. 2 Diagram of IF-ECDL architecture

2006年,法国巴黎天文台 Baillard 等^[40]使用 IF 作为选频元件搭建了 ECDL,在可见光(698 nm)和近红外(852 nm)波段实现了不同波长的原型机,线宽低至 14 kHz,具有 20 nm 以上的调谐范围。该激光器被用于激光冷却等 Cs, Rb 和 Sr 的原子物理实验。2011年, Schmidt 等^[42]搭建了紧凑 IF-ECDL。该激光器腔长为 80 mm,输出功率高达 50 mW,本征线宽小于 10 kHz,通过控制增益比实现了约 9 GHz 的无跳模范围,可以覆盖⁸⁷Rb 原子 D2 线。利用该激光器作为光源,他们搭建了用于高精度原子干涉测量实验的激光系统。同年,清华大学和北京大学 Wang 等^[43]实现了输出波长为 657 nm 的 IF-ECDL,洛伦兹拟合的瞬时线宽达 7 kHz。2012年,墨尔本大学 Thompson 等^[44]报道了采用宽带(3 nm)的 IF 进行选频的单模 ECDL,实现了宽范围的激光输出波长。波长调谐范围超过 14 nm,激光线宽为 26 kHz,采用猫眼结构作为反射镜,频率噪声和对振动的灵敏度大大降低。2020年,国家授时中心 Zhang 等^[45]研制了一种紧凑、高稳定的 IF-ECDL,输出波长为 698 nm,专用于空间铯光钟。激光线宽约为 180 kHz,输出激光功率为 35 mW,具有超过 40 GHz 的电流控制调谐范围和 3 GHz 的 PZT 控制调谐范围。该 ECDL 已应用于空间超稳定激光系统的原理样机中。

2) FP 标准具型

FP 标准具选频通常包括两种形式:一种是腔内放置倾斜的 FP 标准具,另一种是由两个反射镜构成的标准具直接作为谐振腔。由于多光束干涉效应,FP 标准具对腔内不同频率的光具有选择透过性。只有某些特定频率的光可以透过标准具从而在腔内往返传输形成振荡,其他频率的光由于损耗过大,无法振荡输出。采用高 Q 值 FP 标准具进行选频可以实现很窄的激光线宽,随着技术的发展,人们实现的 FP 腔 Q 值愈来愈高,线宽压窄效果也愈发显著。

1975 年, Voumard 等^[46]报道了采用 FP 标准具作为激光选频器件的方案,他们采用未镀膜的半导体激光器结合 FP 标准具实现 ECDL,采用精细度 $F \approx 20$ 的标准具时,在不改变总的输出功率的情况下,发射带宽有效压窄到 0.04 nm。此外,他们提出采用更高精细度的标准具可以进一步压窄发射带宽。

2014 年,东北大学 Aoyama 等^[47]报道了一种采用相干光学负反馈系统实现的 ECDL,如图 3 所示。该系统仅由一个透镜和一个 FP 标准具组成,输出线宽从 6.4 MHz 压窄到 6.5 kHz。他们还通过实验证明,这种相干光学负反馈方法可以在不影响相对强度噪声 (relative intensity noise, RIN) 的情况下有效地降低谱线宽度和频率调制 (frequency modulation, FM) 噪声。

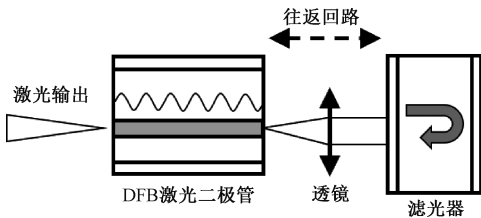


图3 FP-ECDL 结构示意图^[47]

Fig. 3 Diagram of FP-ECDL architecture^[47]

2021 年,南京大学 Hao 等^[48]报道了用高质量因数光纤 FP (fiber fabry-perot, FFP) 谐振器制造的自注入锁定二极管激光器。采用分布式反馈 (distributed feedback laser diode, DFB) 激光器作为光源,该 FFP 谐振腔的 Q 值为 3.95×10^7 , 两端安装插口,可与标准 PC 光纤连接器兼容,在全光纤反馈环路中实现即插即用。激光器自由运行线宽为 145 Hz,白噪声为 $50 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$,与未锁定的 DFB 激光器相比降低了 42 dB 以上。

2023 年,中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所的 Liang 等^[49]通过将 DFB 激光器自注入锁定到体积为 0.5 ml 的高 Q 值 (7.7×10^8) 微型 FP 腔,实现了一个体积为 67 ml 的小型窄线宽激光器,洛伦兹线宽达到 60 mHz,积分线宽约为 80 Hz。其中,高 Q 值微型 FP 腔是将一个平面镜和一个凹面镜连接到一个 7 mm 长的空心熔融硅垫片上制成的。该激光器的频率噪声性能超过

了商用窄线宽激光器和自注入锁定到高 Q 片上环形谐振器的混合集成窄线宽激光器,未来可批量生产并运用到实验室外应用中。

在采用外腔技术压窄激光器线宽方面,李天初院士团队开展了一系列工作。2011 年,他们提出采用一个由石英玻璃制成的单片折叠 FP 标准具 (monolithic folded fabry-perot cavity, MFC) 实现光反馈的 689 nm ECDL^[50]。激光器基于掠射衍射构型,通过低带宽 Hänsch-Couillaud 伺服环路将外腔频率锁定在 MFC 谐振频率上,锁定后线宽约为 6.8 kHz。利用锁相环将该 MFC-ECDL 和参考激光器进行锁定,通过 PZT 反馈给 MFC 实现锁相,开环伺服回路的最小的单位增益频率为 10.2 kHz。这种光反馈 MFC-ECDL 具有结构紧凑、更好地开环频率和功率稳定性、较好的低频噪声和窄线宽的优势。2012 年,提出一种采用耦合腔结构实现外部光反馈的窄线宽 ECDL^[51],利用高精度 (10 000) 的双镜非共焦 FP 标准具,通过调整 PZT 电压控制 ECDL 激光频率与 FP 标准具的共振频率一致,并实现反馈相位匹配。激光线宽压窄到 100 Hz,瞬时线宽减小到 30 Hz。在 10 Hz 到 10 kHz 的频率范围内,激光相位噪声显著降低了 50 dB 以上。同年^[52],他们采用高精度 FP 标准具外部光反馈技术,首次实现了赫兹级相对线宽 DFB 激光器,在整个测量频率范围内,激光相位噪声被显著抑制。特别是在近似于 FP 参考腔线宽的傅里叶频率为 17 kHz 时,激光相位噪声被明显抑制了 92 dB 以上。在洛伦兹拟合中,单套激光的 FWHM 线宽从 7 MHz 减小到 4.4 Hz,采用两套相同激光器拍频,瞬时线宽达到 220 mHz。

此外,李天初院士团队^[53]还在 2011 年提出了光栅反馈二极管激光器中往返相移的一般解析形式。利用新形式,当仅满足一个约束条件时,在一阶近似下,往返相移可以与旋转角度无关,称之为准同步调谐 (quasi synchronous tuning, QST) 条件。在 QST 区域,可以获得相当大的无跳模调谐范围。准同步枢轴不受光栅表面及其外延的严格限制,只需要一个自由度的调整结构就可以准确地找到和定位准同步枢轴。这意味着外腔二极管激光器的设计更加简单,激光器的输出更加稳定可靠。2014 年,他们通过实验验证了 QST 理论^[54]。通过准同步调谐,实现了一个 Littman-Metcalf 型 ECDL,具有超过 2 THz (6 nm) 的无跳模范围,其中轴心点距离传统的严格同步旋转中心有 65 mm 的位移。该工作提出了一种判断实际枢轴位置与准同步调谐线相对位置的实验方法,只需一个运动自由度的调整结构便足以精确定位枢轴点,实现超过 1 THz 的无跳模调谐范围精度被放宽到 300 μm 以上。由于调整结构的简化,与传统的严格同步调谐 (rigorous synchronous tuning, RST) 的情况相比, ECDL 的设计可以更容易,激光器可以更稳定可靠。

干涉滤光型 ECDL 采用多光束干涉原理进行滤光,相较于光栅型 ECDL 更加稳定,并且具有优于 kHz 的线宽压窄效果。未来在保证窄线宽性能的同时,可以借助 QST 理论实现更大的可调谐范围;采用集成工艺实现更小体积、系统更加稳定的激光器。

1.3 波导型外腔半导体激光器

随着光子集成技术的发展,波导外腔结构成为分立外腔、组合外腔之外的另一种可选方案。在利用波导外腔实现窄线宽的同时,大大减小了系统的尺寸、体积,并且可以与其他部件集成到一起,提高了系统的稳定性和可靠性,成为近年来的研究热点。本文主要介绍基于光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 和基于硅基波导的两种结构。

1) 光纤布拉格光栅型

FBG-ECDL 结构如图 4 所示,增益芯片一端镀高反射率 (high reflectivity, HR) 膜,另一端镀有抗反射 (anti-reflection, AR) 膜。FBG 一端通过锥形光纤透镜直接耦合到增益芯片 AR 面,另一端作为外腔的端反射器。通过选择合适的 FBG 确定其布拉格波长,从而确定激光波长。

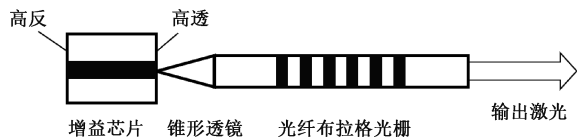


图 4 FBG-ECDL 结构示意图

Fig. 4 Diagram of FBG-ECDL architecture

2016 年,英国南安普顿大学 Lynch 等^[55]报道了一种基于集成光纤 (integrated optical fiber, IOF) 的 ECDL,将光敏光纤融合到硅衬底上,采用直接紫外写入工艺将布拉格光栅写入光纤,并将该器件与半导体增益芯片对接形成激光腔。实现的 ECDL 在乙炔 P13 线 (1 532.83 nm) 上单模工作,输出功率为 9 mW,线宽小于 14 kHz,具有比商用 ECDL 更好的相对强度噪声特性。该激光器通过将平面玻璃波导集成到硅片上,获得了良好的机械和热稳定特性;借助高度发达的光纤技术,实现了更好的光敏性,更低的损耗以及更高的波导结构复杂性和精度。

2016 年,中科院上海光机所 Wei 等^[56]报道了一种结合长外腔和高 Q 值 FP 腔光反馈优势的亚千赫兹线宽 1 550 nm 半导体激光器。将商用 DFB 激光器通过光程长度为 4 m 的保偏光纤环自注入锁定在 FBG-FP 腔的共振透射峰上,腔的 Q 因子为 6.5×10^6 ,线宽从 1 MHz 压窄至 1 kHz 左右。频率大于 1 kHz 时,激光器的频率噪声低至 $40 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$,并提供超过 0.8 nm 的准连续可调性,适用于需要具有超低频率噪声的窄线宽激光器的高级应用。

2017 年,中科院上海光机所 Zhang 等^[57]采用具有增强热敏性的 FBG 设计了一种无跳模 ECDL,采用具有 AR 涂层和角度面的增益芯片作为有源部分,将 FBG 封装到胶合填充的 V 型槽中,并将增益芯片与 FBG 固定在氮化铝衬底上,从而确保 TEC 具有良好的导热性。该激光器具有 35 kHz 的窄线宽和 $65 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ($8.125 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$) 的高线性热调谐速度,连续无调模范围为 0.5 nm,是腔模间距的 5 倍。2022 年^[58],该团队进一步改进了 ECDL 模块的结构,并将外腔集成到 14 pin 蝶形封装中,利用保偏全光纤环形谐振器实现了频率稳定传递技术。输出激光的本征洛伦兹线宽为 15 kHz,相对频率稳定性达到 10^{-12} 数量级,可用作 CO_2 探测激光雷达光源。

2019 年,美国加州大学圣巴巴拉分校 Huang 等^[59]报道了一种完全集成在 Si 上的扩展 DBR (extended DBR, E-DBR) 激光器,将 III-V 增益材料和超低损耗 Si 波导集成在同一芯片上,并在波导中添加 15 mm 长的低损耗、弱扰动的布拉格光栅反射器。激光器线宽约为 1 kHz,输出功率超过 37 mW。在腔体中加入一个高 Q 值环,实现了一种线宽小于 500 Hz 的高 Q 值环形辅助 DBR 激光器 (ring-assisted E-DBR, RAE-DBR)。该激光器能同时保证窄线宽和优异单模稳定性的关键在于采用了低波导损耗 ($0.16 \text{ dB}/\text{cm}$) 和窄带宽 (2.9 GHz) 的长 FBG。

FBG 结构相比于传统的布拉格反射器提供了更长的腔长,因此具有更好的线宽压窄效果,能够达到几 kHz 甚至低于 1 kHz。然而,由于其调谐方法有限,波长调谐范围非常小,一般只有几个纳米,而且材料的吸收损耗比较大。

2) 硅基波导型

硅基波导型 ECDL 是将有源增益和无源波导集成到一起的激光器,其中,波导作为外部谐振腔。它的 3 个关键技术在于^[60]: (1) 采用低损耗的波导材料,包括氮化氧硅 (SiON)、二氧化硅 (SiO_2)、氮化硅 (Si_3N_4)、绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 等; (2) 通过增加腔长压窄线宽,目前主要采用微环谐振器 (micro-ring resonators, MRR) 和螺旋波导增加有效光程; (3) 采用有效方案实现有源增益和无源腔的集成。

传统的 FBG-ECDL 性能会受到光纤光栅对振动敏感性的影响,2009 年,美国 RIO 公司发明了一种 1 550 nm ECDL^[61],将窄带布拉格光栅刻在硅基二氧化硅平面光波导上,与半导体增益芯片共同构成腔体,并集成到一个 14 pin 蝶形封装中。激光器线宽小于等于 2.6 kHz,相位/频率噪声与长腔光纤激光器相当,频率为 1 kHz 时 $\text{RIN} \leq -147 \text{ dB}/\text{Hz}$,功率大于 10 mW。这种平面 ECDL 集成度高、抗震性强,可在振动和恶劣环境条件下工作。

2018 年,清华大学 Li 等^[62]报道了一种新型片上半导体激光器,将商用 FP 半导体激光器与外部高 Q 值

(2×10^5) 微谐振腔对接耦合, 利用其引入的游标效应 (vernier effect) 和光学自注入效应, 实现线宽压窄。激光器具有 17 nm 的宽波长调谐范围和 8 kHz 的窄线宽。此外, 该激光器的片上输出功率为 7 dBm, 典型侧模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 大于 45 dB, 是一种实现窄线宽、宽可调谐范围片上半导体激光器的新方案。

2020 年, 荷兰特温特大学 Fan 等^[63] 报道了一种混合集成的 InP-Si₃N₄ 宽可调谐 ECDL, 本征线宽为 40 Hz。使用宽带隙的 Si₃N₄ 波导电路, 可以克服双光子吸收对窄带隙 Si 波导的影响。该激光器包括 InP 增益部分和一个用于延长腔长的低损耗 Si₃N₄ 波导反馈电路, 其中, 光学腔长度的延长是通过一个 33 mm 长的螺旋来实现的, 同时通过腔内 3 个级联的微环谐振器的谐振激发来实现光学长度的增加, 最终芯片上的腔长扩展到 0.5 m。该激光器单模振荡的最大光纤耦合输出功率达 23 mW, 1.55 μm 波长处的光谱覆盖范围超过 70 nm, 输出功率为 3 mW, 边模抑制超过 60 dB。

由于 SiN 波导的损耗比最先进的 Si 波导低几个数量级, 因此基于 SiN 构建完全集成的低噪声光子平台是理想的选择。高功率、低噪声半导体激光器在相干通信、激光雷达和遥感等许多应用中至关重要。SiN 上完全集成的激光器消除了对自由空间或光纤耦合到 SiN 波导的需求, 提高了设备的可扩展性和稳定性。

2021 年, 加州大学圣巴巴拉分校与美国加州理工学院 Xiang 等^[64] 采用多层异质集成的方法实现了集成在氮化硅 (silicon nitride, SiN) 波导上的高性能激光器, 通过波导输出的功率为几十毫瓦, 并具有亚 kHz 的基本线宽。相关工作还表明, 将该激光器与超低损耗的高 Q 值 SiN 环形谐振器对接耦合, 可以实现赫兹级本征线宽。同年, 他们报道了一种混合集成激光器^[65]。将传统的 DFB 激光自注入锁定到具有高 Q 因子 (超过 2.6×10^8) 和精细度 (超过 4.2×10^4) 的 Si₃N₄ 微环谐振器中, 噪声降低了 5 个数量级, 频率噪声达到 $0.2 \text{ Hz}^2 \text{ Hz}^{-1}$, 相应的短期线宽为 1.2 Hz。

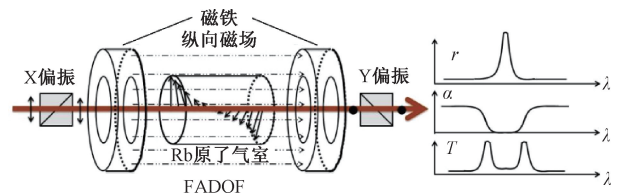
2023 年, 美国哥伦比亚大学 Zanarella 等^[66] 报道了一个芯片级的可见激光平台, 可以实现从近紫外到近红外波长的可调谐窄线宽激光器。他们设计了一种基于环形谐振腔的宽带低损耗光反馈方案, 利用高 Q 值的微米级 Si₃N₄ 谐振器和商用 FP 激光二极管, 实现了 12.5 nm 的粗调谐和 33.9 GHz 的无模式跳变精细调谐范围, 本征线宽低至几 kHz。此外, 该激光器还具有 $267 \text{ GHz } \mu\text{s}^{-1}$ 的微调速度, 10 mW 的光纤耦合功率和超过 35 dB 的典型边模抑制比。

对于波导型 ECDL, 其最大的优势在于高度集成, 可灵活选择选频元件, 并可以实现长的有效腔长, 具有优异的线宽和噪声性能, 拥有很好的商业化制备与应用前景。

1.4 法拉第激光器

在光钟、原子磁力仪、原子重力仪等精密测量系统中, 需要波长对应原子跃迁谱线、频率稳定的激光。传统 ECDL 采用光栅、干涉滤光片、FP 标准具等宏观器件进行选频, 需要借助波长计, 通过调节电流、温度、甚至是选频器件的角度调节波长, 使其对准原子谱线, 其选频效果也易受到机械振动等影响。利用窄透射带宽的法拉第反常色散原子滤光器 (Faraday anomalous dispersion optical filter, FADOF) 作为选频器件, 使用原子或分子的量子跃迁谱线作为频率参考, 输出频率可以直接对应原子跃迁, 无需调节。并且采用原子滤光器选频可以克服机械振动、二极管电流和温度对透射谱的干扰, 具有更好的鲁棒性。

FADOF 在结构上包括两个偏振方向正交的偏振片和充有碱金属原子的原子气室, 另外还包括方向平行于原子气室的磁场和保温装置, 其结构如图 5 所示, 其中, 黑色箭头表示光的偏振方向。法拉第旋光效应可以用塞曼效应 (Zeeman effect) 的经典解释来理解^[67]: 在纵向磁场下, 磁场决定的量子化轴方向与光传播方向一致, 本征偏振光场为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。在外加磁场的作用下, 气室内的工作原子磁子能级发生塞曼分裂, 导致两个圆偏振分量的共振跃迁频率发生变化, 进而使原子对信号光的吸收和色散曲线发生分裂, 色散强度与信号光的折射率成正比, 因此, 左旋与右旋圆偏振光色散曲线的分裂将会导致同一频率处二者折射率的不同, 进而导致它们在原子气室内传播相同路径后的相位不再相同, 从原子气室出射后光的偏振方向发生变化。通过设置合适的气室长度, 可以使位于特定量子跃迁频率附近的偏振光发生接近 90° 的角度偏转, 从而通过检偏器输出, 实现原子滤光。



注: r 为原子气室的旋光特性, α 为原子气室的透射谱, T 为 FADOF 透射谱

图 5 FADOF 结构与工作原理^[68]

Fig. 5 Schematic of FADOF^[68]

作为 FADOF 的一个重要指标, 透射谱可以很好地描述 FADOF 的特性。FADOF 透射谱谱线的中心频率、透射带宽和峰值透过率受到磁场和温度的影响, 通过研究透射谱是确定 FADOF 的工作参数一个重要手段。目前, 对于 FADOF 透射谱计算的理论研究已经很深入^[69], 并

且,利用 ElecSus 开源软件可以实现小光强下透射谱的计算^[70]。

1956年,Öhman^[71]首次实现法拉第原子滤光器,将气体介质放置于两个正交偏振器之间,同时施加平行方向的强磁场,基于原子共振 Faraday 旋光效应实现背景光的滤除,并将其应用于太阳光谱的观察中。1969年,IBM 沃森实验室的 Sorokin 等^[72]实现了 Na-FADOF,并首次将其应用于染料激光稳频,FADOF 透射峰对应钠原子 $3S_{1/2} \rightarrow 3P_{1,3/2}$ 跃迁。1991年,Dick 和 Shay^[73]报道了 Rb-FADOF 的实验演示结果。该工作研究了铷原子 $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ 超精细跃迁的原子滤光器,测量得到的带宽为 1 GHz,透过率为 63%,带外抑制率为 10^5 。2011年,北京大学 Miao 等^[74]实现了透射带宽为 1.3 GHz 的 Rb-FADOF,中心波长为 780.241 nm,并将其应用于 ECDL 选频实现了法拉第激光器。2012年,北京大学 Wang 等^[75]利用法拉第磁致旋光效应与饱和吸收效应实现了工作在铯原子 $6S_{1/2}, F=3 \rightarrow 7P_{3/2}, F'=2, 3$ 跃迁能级,带宽为 3.9 MHz 的 FADOF。2022年,山西大学 Yan 等^[76]实验证明了一种工作在铷 D1 和 D2 线上的双波长带通法拉第滤光器(DW-FADOF)。这种 FADOF 提供了覆盖两个典型原子跃迁的透射带,可以用作双信号载波,在波分复用通信和微弱信号提取方面具有重要的应用潜力。2023年,北京邮电大学、中国计量科学研究所和北京大学 Guan 等^[77]利用激光冷却技术,实现了基于⁸⁷Rb 冷原子的 FADOF,该方案有效地克服多普勒展宽对 FADOF 带宽的影响,实现了 420 nm 窄带宽 FADOF,在峰值透过率为 3.2%时具有 2.7(2) MHz 通带,是目前已知的带宽最窄的 FADOF。为了提高峰值透过率,他们引入圆偏振光泵浦,实现了峰值透过率为 15.6%,透射带宽为 6.6(4) MHz 的 780 nm 窄带 FADOF^[78]。

根据工作方式分类,FADOF 可分为主动式和被动式,二者区别在于:被动式原子滤光器中原子跃迁的下能级为基态,主动式原子滤光器中原子跃迁的下能级为激发态,主动式原子滤光器的出现丰富了 FADOF 的工作波长,扩展了其应用范围。目前已实现的 FADOF 工作原子及其对应波长主要包括以下几类:铯原子 455 nm^[76,79]、459 nm^[80]、852 nm^[81]、894 nm^[15]、1 529 nm^[82],铷原子 420 nm^[83]、532 nm^[84]、776 nm^[85]、780 nm^[86]、795 nm^[87]、1 529 nm^[16],钾原子 766 nm^[88]、770 nm^[89],钠原子 589 nm^[90],铟原子 461 nm^[91]和钙原子 423 nm^[92],典型透射带宽在 GHz 量级。FADOF 具有高透射率、窄带宽、频率稳定、大视场、快速时间响应等特性,而且多数原子物理实验需要将半导体激光器的输出波长调谐到原子跃迁波长,因此可以利用 FADOF 作为外腔半导体激光器的选频器件。

早在 20 世纪 60 年代,人们便开始将 FADOF 用于激

光器频率稳定。1969年,IBM 沃森实验室的 Sorokin 等^[72]将钠原子法拉第滤光器放入带宽为 6 GHz 的染料激光器腔内,得到了激光频率在钠蒸汽 D 线附近的窄线宽输出激光。1992年,新墨西哥州立大学 Wanninger 等^[93]采用铷原子 FADOF 作为外腔选频器件进行频率锁定,实现了可调谐范围为 0.9 nm,线宽低于 6 MHz 的 780 nm 单频激光输出。1993年,Themotrex 公司的 Choi 等^[94]报道了一种采用铯原子 FADOF 选频的 852 nm 半导体激光器,输出激光功率为 34 mW,线宽小于等于 30 MHz,并证实了输出激光对激光二极管的温度和电流波动不太敏感。1995年,北京大学汤俊雄等将激光二极管的频率锁定在 FADOF 透射谱的峰值频率上,得到了 ± 100 kHz 的频率稳定度,并将其应用在空间光通信中^[95]。随后,该小组报道了将频率锁定在 Rb-FADOF 的 4 个透射峰上的工作,观察到输出激光的线宽被压窄至 3 MHz,通过改变所加磁场可以实现大于 0.2 GHz 的调谐^[96]。2005年,中科院武汉物理与数学研究所李发泉等^[97]将 Cs-FADOF 置于半导体激光器外腔中进行选频,利用光反馈稳频实现了激光波长在 FADOF 4 个透射峰对应波长处的调谐,电流变化 3~4 mA 时,激光输出波长保持不变。上述激光器所采用的激光二极管均未镀增透膜,因此激光器性能会受到二极管腔模的影响,存在随激光器电流、温度大范围变化易跳模的问题。

2011年,北京大学 Miao 等^[74]采用镀增透膜的激光二极管(anti-reflection-coated laser diode, ARLD)作为增益介质,并利用 Rb-FADOF 进行选频,实现了 780 nm 的 ECDL。其中,FADOF 气室内所充气体为自然铷,透射带宽为 1.3 GHz,单模输出的激光线宽为 69 kHz,ARLD 电流和温度在 55~142 mA 和 15℃~35℃ 范围内变化时,波长波动均在 2 pm 内,展现了优异的电流和温度鲁棒性。2015年,Tao 等^[98]利用充同位素气体的⁸⁷Rb-FADOF 作为选频元件,削减了自然铷中⁸⁵Rb 气体对激光频率的影响,实现了输出波长为 780.245 6 nm 的 ECDL,其输出激光频率始终对应⁸⁷Rb $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ 跃迁,线宽小于 221 kHz,可直接应用到原子钟等领域。在这个工作中,他们正式将这种采用 ARLD 作为增益介质,利用 FADOF 进行选频的 ECDL 命名为法拉第激光器,其结构如图 6 所示。2016年^[99],他们利用 1.2 km 的光纤扩展外腔长度,采用透射带宽为 29.1 MHz、透过率为 20.5%的超窄带 Rb-FADOF 进行选频,实现的 780 nm 法拉第激光器自由光谱范围为 83 kHz,在 0.06~1 s 的采样时间内,激光器自由运行的 Allan 方差约为 6.0×10^{-11} 。同年,英国杜伦大学 Keaveney 等^[100]报道了法拉第激光相关研究,通过设置合适的 Rb-FADOF 温度磁场参数,实现了高透射率(93%)的单透射峰 FADOF。利用法拉第激光器的输

输出功率,作为 PID 反馈的信号,对法拉第激光器的 PZT 进行电学反馈控制,保证激光频率始终对应 FADOF 透射峰最高点。最终实现的激光器长期稳定度优于 1 MHz、短期线宽优于 400 kHz,小于碱金属原子 D 线线宽,可用于激光冷却系统。

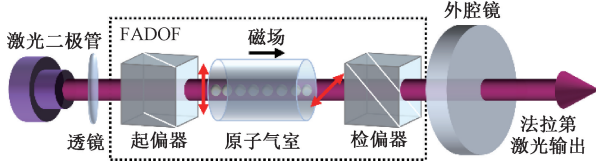


图 6 法拉第激光器结构示意图^[101]

Fig. 6 Diagram of Faraday laser architecture^[101]

除了采用 Rb-FADOF 实现的 780 nm 法拉第激光器外,研究人员也开展了其他波段的法拉第激光器的研究。2017 年,Chang 等^[16]利用性能改进的基于无极放电灯的激发态 FADOF (electrodeless discharge lamp-based excited-state FADOF, LESFADOF) 实现了工作在 Rb 激发态 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ 跃迁的 1 529 nm 法拉第激光器。通过设置温度和磁场参数,LESFADOF 峰值透过率达到 46%,透射带宽为 600 MHz,法拉第激光器线宽为 15.5 kHz,10 kHz 处的相对强度噪声优于 -110 dBc/Hz,可用于微波光子学、光通信等领域。2019 年,他们采用 Cs-FADOF 作为选频器件,首次实现了 852 nm 法拉第激光器^[102],工作波长在激光二极管 60~130 mA 和 14~35°C 的范围内变化不超过 ± 2 pm,线宽为 17 kHz。2021 年,北京大学 Shi 等^[101]报道了一种工作在 Cs-D2 线的 852 nm 双频法拉第激光,随着原子气室温度的变化,两个激光模式之间的频率差在 1.4 GHz 范围内可调,且每种模式的线宽均小于 33 kHz,两个模式拍频的最可几线宽为 902.95 Hz。双频法拉第激光器的激光频率对应原子跃迁谱线、频差可调、两个模式相干性强,在线宽压窄、激光稳频、相干布居数囚禁原子钟、微波源等方面具有研究潜能。

在大功率法拉第激光器方面,美国空军学院与国防科技大学开展了相关工作。2018 年,美国空军学院 Rotondaro 等^[103]利用 Cs-FADOF 实现了输出功率为 600 W 的商用堆栈 ARLD 的选频与光谱压窄,将二极管激光 3 THz 的外腔反馈光谱压窄至 10 GHz,激光输出功率达 518 W。2021 年,国防科技大学 Tang 等^[104]利用 ^{85}Rb -FADOF 选频,实现了输出功率为 18 W 的输出激光,激光带宽压窄到 1.2 GHz。2022 年^[105],他们实现了一种对偏振不敏感的窄线宽法拉第激光器,激光频率锁定在 Rb D2 线上,带宽压窄至 2.6 GHz,输出功率为 38.3 W。

近几年,北京大学采用调制转移谱稳频方案实现了法拉第激光器频率的进一步稳定,该工作是将法拉第激

光器拓展到原子钟等应用中的关键一步。2022 年,Chang 等^[106]首次实现了基于法拉第激光的铯原子光学频率标准。所采用的法拉第激光器可以工作在 852 nm 单频和双频模式,自由运行的线宽为 17 kHz,利用调制转移谱(modulation transfer spectroscopy, MTS) 技术进行稳频,得到单频条件下稳频后的自评估频率稳定度为 $3 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$,双频条件下稳频后两个模式的拍频线宽压窄至 85 Hz。同年,Shi 等^[107]采用双层原子气室作为频率参考,减小温度波动对量子参考带来的影响,利用 MTS 技术,实现了更高稳定度的激光频率稳定,短期自评估稳定度达到 $5.8 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$ 。

图 7 总结了采用 FADOF 光反馈进行稳频的半导体激光器与法拉第激光器线宽的发展趋势,可以发现采用 FADOF 进行外腔选频,可以直接将激光线宽压窄到十几 kHz,无需外部的锁定环路,并且克服了激光二极管内腔模的影响。值得一提的是,采用 MTS 技术对法拉第激光器稳频后,激光器的线宽也会被进一步压窄,研究人员希望线宽可以到达 Hz 水平,从而在某些特定应用中,克服对 PDH 超稳腔的依赖,实现直接利用原子同时实现线宽压窄和稳频两种功能。

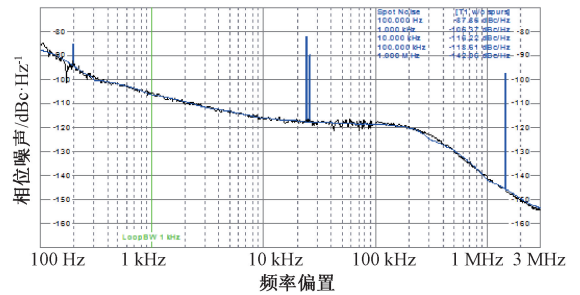


图 7 FADOF 选频激光器线宽发展趋势

Fig. 7 The laser linewidth evolution of the diode lasers using FADOF as the frequency selection

法拉第激光器利用原子跃迁频率进行选频,具有线宽窄、频率稳定、对电流和温度波动鲁棒性强、多种波长可选等优势。输出波长与原子谱线直接对应的特性,使得法拉第激光器没有波长大范围变化的问题,因此对环境的适应性好,无需人工调节波长,在卫星应用等特殊领域具有独特的优势。这种高性能激光器可以应用于原子钟、光通信、激光雷达、导航授时等领域。未来可以通过研制微型 FADOF 或空心光纤内的 FADOF,结合集成工艺进一步实现小型化,压缩体积,提高稳定度,扩展其应用场景。

2 应用

窄线宽 ECDL 结构紧凑、效率高、可调谐好,被广泛应用于光存储^[15]、光通信^[16]、激光传感^[17-18]、激光雷达^[19]等领域。除此之外,窄线宽 ECDL 在量子频率标准^[12]、激光冷却^[13]和高分辨率光谱学^[14]等研究中也具有重要应用价值。在新型原子钟、原子重力仪等应用中,需要用到频率对准原子跃迁频率的激光,法拉第激光器具有输出波长自动对应原子跃迁谱线的特性,并且输出波长对电流和稳定波动的鲁棒性好,在相关应用中具有独特优势。

在微波原子钟的研究中,小型铯原子钟长期稳定性高,在实际应用中发挥着重要的作用。其中,光抽运铯原子钟具有原子利用率高、结构简单等优点,相较于磁选态铯束原子钟可以实现更高的频率稳定度。国际上最具代表性之一的光抽运小铯钟为美国 5071A 铯钟,其优质管秒级稳定度为 5×10^{-12} ,百秒级稳定度为 8.5×10^{-13} ,长期频率稳定度超过 1×10^{-14} 。近期,北京大学与中国电子科技集团第十二研究所合作开展了将法拉第激光器应用到光抽运小铯钟上的研究,系统如图 8 所示。采用单个法拉第激光器作为光源,利用调制转移谱技术将输出激光锁定到铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=5$ 跃迁上,并分为两束,一束作为探测光,另一束经过声光调制器(acoustic optical modulator, AOM)移频 251.4 MHz 后对应 $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=4$ 跃迁作为抽运光。因其具有窄线宽、频率不易漂移、短期稳定度好的优势,目前已实现短期稳定度 $7.45 \times 10^{-13} @ 1 \text{ s}$,百秒稳定度 $2.90 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$ 。

目前世界上性能指标最高的光钟系统频移不确定度已进入 10^{-19} 量级^[7-8]。在空间微重力环境下,光学时钟的性能有望进一步提高。中国国家授时中心拟采用 698 nm 的窄线宽 IF-ECDL 作为主激光器实现一种可移动铯原子光晶格钟^[45]。将线宽为 180 kHz 的 IF-ECDL 通过 PDH 技术锁定,获得 Hz 甚至亚 Hz 级超

窄线宽激光器,进而探测 $\text{Sr } ^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ 的钟跃迁信号。目前,该激光器已应用于空间超窄激光系统原理样机中。

窄线宽 ECDL 在主动光钟领域也有很高的应用价值。主动光钟于 2005 年首次由北京大学提出^[108],它采用原子系综作为增益介质,受激辐射可直接作为钟激光信号。2014 年,北京大学 Zhuang 等^[12]报道了利用坏腔法拉第激光器实现的主动光钟,中心频率由铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F'=4, 5$ 交叉跃迁谱线决定。由于激光工作在坏腔区域,具有腔牵引抑制和窄线宽的优势,可以有效克服腔长热噪声的问题。利用两套相同的独立设备进行光外差拍频得到的线宽为 281 Hz,根据线宽推算出稳定度为 $8 \times 10^{-13} @ 0.1 \text{ s}$ 。

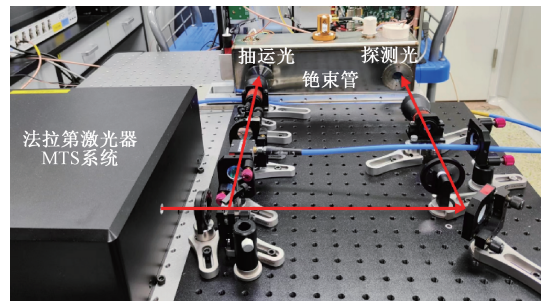


图 8 法拉第激光器用于光抽运小铯钟实验装置图
Fig. 8 Experiment setup of the optically pumped compact cesium clock using Faraday laser

ECDL 也可以应用于水下光通信中。高灵敏度水下无线光通信会受太阳噪声和其他背景噪声干扰,2022 年,北京邮电大学 Zhang 等^[109]采用 852 nm 法拉第激光器和带宽为 1 GHz 的 FADOF,实现了抗背景噪声的空气-水和水下无线光通信,其实验结构如图 9 所示。实验结果表明,使用法拉第激光器后,系统的 Q 因子比使用干涉滤波器时提高了 3.37 dB,在接收端加入 FADOF 滤波, Q 因子相较于无 FADOF 时提高了 14.67 dB,验证了法拉第激光器与 FADOF 的引入可以提升宽带背景噪声干扰下水下光通信的性能。



图 9 法拉第激光器与 FADOF 用于水下光通信实验装置图^[109]

Fig. 9 Experiment setup of the optically pumped compact cesium clock using Faraday laser and FADOF^[109]

除上述应用外, ECDL 还被广泛应用于激光传感、激光雷达、激光冷却、高分辨率激光光谱等领域。随着国产小型集成化 ECDL 的不断发展,未来将会进一步带动下

游产业与应用,在基础研究、民用设备、军工装备等领域发挥更大价值。

3 结 论

ECDL 采用外腔延长腔长,进而压窄激光线宽,并具有可调谐的特点。文章根据不同的选频机制,介绍了采用分立元件的光栅、IF、FP 标准具、FADOF 实现的 ECDL,以及采用波导结构实现的集成 ECDL。

传统的窄线宽 ECDL 采用光栅、IF、FP 标准具等器件进行频率选择,已在各领域应用中发挥了重要的作用。光栅型 ECDL 线宽可以达到 kHz 量级,但很难继续压窄。IF-ECDL 和 FP-ECDL 采用多光束干涉选频,并引入猫眼结构,系统相较于光栅型 ECDL 更加稳定,并且 FP-ECDL 线宽可以压窄到 Hz 量级。对于此类 ECDL,如何在保证窄线宽、宽调谐性能的基础上,结合集成工艺实现更加集成稳定的小型化系统,从而面向更多应用场景,是未来发展的方向。波导型 ECDL 易于集成、线宽窄、噪声低,可实现低成本商业化制备,具有很好的应用前景。未来,通过优化波导材料和结构,采用有效集成方案提升增益芯片与波导外腔的耦合效率,可以进一步提升整体性能。

上述宏观选频器件不可避免会受到机械振动、温度等环境因素的干扰。此外,在原子钟等精密测量相关应用中,需要通过精确控制选频元件角度或位置实现对应原子跃迁频率的激光输出。而法拉第激光器采用原子滤光器中原子的跃迁谱线作为频率选择依据,输出激光的频率可自动对准原子跃迁频率,可以实现更好的频率稳定性。其显著优势在于:线宽窄、波长对应原子谱线、对激光二极管温度和电流波动的鲁棒性好,未来有望成为半导体激光器领域的研究热点。

目前实现的法拉第激光器主要基于被动式 Rb-FADOF 和 Cs-FADOF,未来可以实现基于其他碱金属原子 FADOF 和主动式 FADOF 的法拉第激光器,以进一步拓展法拉第激光器的工作波段,丰富其应用场景;FADOF 的透射谱会受到激光光强的影响,而目前激光器腔内光强无法精确计算,通过对激光器内部光强开展理论研究,可以更精准确定 FADOF 透射谱的情况,从而更加精确调控激光器性能;此外,通过制备微型 FADOF 或光纤 FADOF,可实现小型法拉第激光器,具有重要的实用价值,是当前正在突破的方向。这种小型化、窄线宽的法拉第激光器未来有望应用到光通信、激光冷却、高分辨率光谱学、激光传感、激光雷达等领域,成为优质的激光光源。并有望很快应用到基准型原子钟、原子重力仪等大型精密测量装置中,减小系统体积,提升系统性能,拓展更广的应用场景。

作为众多应用的核心光源,窄线宽 ECDL 具有重要研究价值。未来,随着光子集成技术的不断发展,高性能

的窄线宽 ECDL 势必会趋于全自动化与芯片化,从而激发更大的应用潜力,带动半导体激光器及下游应用的发展。

致谢

感谢国内外各研究组提供丰富的研究成果和启发,感谢李天初院士在窄线宽半导体激光器及其在量子精密测量应用中做出的贡献。尤其感谢李天初院士在本研究组开展激光稳频、主动光钟与原子束光钟等研究时提供的宝贵支持与帮助。李天初院士治学严谨、勇于创新,为我国时间频率发展做出了卓越贡献。谨以此文纪念李天初院士。

参考文献

- [1] TERRIEN J. News from the International Bureau of Weights and Measures [J]. *Metrologia*, 1968, 4(1): 41-45.
- [2] STOCK M, DAVIS R, DE MIRANDÉS E, et al. The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology [J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 022001.
- [3] DEREVIANKO A, POSPELOV M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks [J]. *NATURE PHYSICS*, 2014, 10(12): 933-936.
- [4] DELVA P, LODEWYCK J, BILICKI S, et al. Test of Special Relativity Using a Fiber Network of Optical Clocks [J]. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2017, 118(22): 221102.
- [5] 赵书红,董绍武,白杉杉,等. 基准频标与守时频标联合的频率驾驭算法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 67-75.
ZHAO SH H, DONG SH W, BAI SH SH, et al. Research on the frequency steering algorithm of time-keeping frequency standard and primary frequency standard [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 67-75.
- [6] MALEKI L, PRESTAGE J. Applications of clocks and frequency standards: From the routine to tests of fundamental models [J]. *METROLOGIA*, 2005, 42(3): S145-S153.
- [7] BREWER S M, CHEN J S, HANKIN A M, et al. Al^{+27} quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033201.
- [8] ZHIQIANG Z, ARNOLD K J, KAEWUAM R, et al. $^{176}Lu^{+}$ clock comparison at the 10^{-18} level via correlation

- spectroscopy [J]. *Science Advances*, 2023, 9(18): 1971.
- [9] YUDIN V I, TAICHENACHEV A V, DUDIN Y O, et al. Vector magnetometry based on electromagnetically induced transparency in linearly polarized light [J]. *Physical review A, Atomic, molecular, and optical physics*, 2010, 82(3): 033807.
- [10] MERLET S, VOLODIMER L, LOURS M, et al. A simple laser system for atom interferometry [J]. *Applied physics B, Lasers and optics*, 2014, 117(2): 749-754.
- [11] 吕梦洁, 王光明, 颜树华, 等. 原子干涉重力仪集成光源系统综述 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 1-10.
- LYU M J, WANG G M, YAN SH H, et al. Review of compact laser system for atom interferometry gravimeter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 1-10.
- [12] ZHUANG W, CHEN J. Active Faraday optical frequency standard [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6339-6342.
- [13] SESKO D, FAN C G, WIEMAN C E. Production of a cold atomic vapor using diode-laser cooling [M]. *Collected Papers of Carl Wieman*, 2008: 267-269.
- [14] LENTH W. Optical heterodyne spectroscopy with frequency-and amplitude-modulated semiconductor lasers [J]. *Optics letters*, 1983, 8(11): 575-577.
- [15] PORTALUPI S L, WIDMANN M, NAWRATH C, et al. Simultaneous Faraday filtering of the Mollow triplet sidebands with the Cs-D₁ clock transition [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-6.
- [16] CHANG P, PENG H, ZHANG S, et al. A Faraday laser lasing on Rb 1529 nm transition [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-8.
- [17] ANDREEV S N, MIRONCHUK E S, NIKOLAEV I V, et al. High precision measurements of the ¹³CO₂/¹²CO₂ isotope ratio at atmospheric pressure in human breath using a 2 μm diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(1): 73-79.
- [18] KUDENOV M W, PANTALONE B, YANG R. Dual-beam potassium Voigt filter for atomic line imaging [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(17).
- [19] YU S, ZHANG Z, LI M, et al. Multi-frequency differential absorption lidar incorporating a comb-referenced scanning laser for gas spectrum analysis [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12984-12995.
- [20] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [21] FLEMING M, MOORADIAN A. Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1981, 17(1): 44-59.
- [22] RIEHLE F. *Frequency Standards: Basic and Applications* [M]. WILEY-VCH, 2004.
- [23] YARIV A. *Optical electronics in modern communications* [M]. Beijing: House of Electronics Industry, 2002.
- [24] HENRY C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1982, 18(2): 259-264.
- [25] STECKMAN G J, LIU W, PLATZ R, et al. Volume Holographic Grating Wavelength Stabilized Laser Diodes [J]. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 2007, 13(3): 672-678.
- [26] ZEDIKER M S, STRY S, HILDEBRANDT L, et al. Compact tunable diode laser with diffraction-limited 1 Watt for atom cooling and trapping [Z]. *High-Power Diode Laser Technology and Applications II*. 2004. 10.1117/12.525059.
- [27] HARD T. Laser wavelength selector and output coupler [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1969, 5(6): 321-321.
- [28] CHEN M-H, HSIAO S-C, SHEN K-T, et al. Single longitudinal mode external cavity blue InGaN diode laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 116: 68-71.
- [29] 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]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27403-27414.
- [30] KAPASI D P, EICHHOLZ J, MCRAE T, et al. Tunable narrow-linewidth laser at 2 μm wavelength for gravitational wave detector research [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3280-3288.
- [31] LITTMAN M G, METCALF H J. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander [J]. *Applied optics* (2004), 1978, 17(14): 2224-2227.
- [32] CHEN N, CHEN H-C, LIANG C P, et al. A tunable

- diode laser[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Hamamatsu, Japan, 1994.
- [33] TORCHEBOEUF N, DROZ S, SIMONYTE I, et al. MEMS tunable littman-metcalf diode laser at 2.2 μm for rapid broadband spectroscopy in aqueous solutions[C]. 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference, 2018.
- [34] HOPPE M, ROHLING H, SCHMIDTMANN S, et al. New wide tunable external cavity interband cascade laser based on a micro-electro-mechanical system device[Z]. MOEMS and Miniaturized Systems XVIII. 2019. 10.1117/12.2507176.
- [35] HOPPE M, SCHMIDTMANN S, ABMANN C, et al. High speed external cavity diode laser concept based on a resonantly driven MEMS scanner for the mid-infrared region[J]. Applied Optics, 2021, 60(15): C92-C97.
- [36] 齐志强, 胡文良, 沈征征, 等. 外腔窄线宽半导体激光器研究进展[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(2): 1-10.
- QI ZH Q, HU W L, SHEN ZH ZH, et al. Advances in narrow-linewidth external-cavity diode lasers[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(2): 1-10.
- [37] KÜRBIŠ C, LUVSANDAMDIN E, SAHM A, et al. Micro-integrated, narrow linewidth extended cavity diode laser for atom interferometry in space [C]. 2013 Conference on Lasers & Electro-Optics Europe & International Quantum Electronics Conference, Munich, 2012.
- [38] LUVSANDAMDIN E, KÜRBIŠ C, SCHIEMANGK M, et al. Micro-integrated extended cavity diode lasers for precision potassium spectroscopy in space [J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7790-7798.
- [39] KÜRBIŠ C, BAWAMIA A, KRÜGER M, et al. Extended cavity diode laser master-oscillator-power-amplifier for operation of an iodine frequency reference on a sounding rocket[J]. Applied Optics, 2020, 59(2): 253-262.
- [40] BAILLARD X, GAUGUET A, BIZE S, et al. Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers[J]. Optics Communications, 2006, 266(2): 609-613.
- [41] ZORABEDIAN P, TRUTNA W R. Interference-filter-tuned, alignment-stabilized, semiconductor external-cavity laser[J]. Optics Letters, 1988, 13(10): 826-828.
- [42] SCHMIDT M, PREVEDELLI M, GIORGINI A, et al. A portable laser system for high-precision atom interferometry experiments [J]. Applied Physics B, 2010, 102(1): 11-18.
- [43] WANG Z, LV X, CHEN J. A 657 nm narrow bandwidth interference filter-stabilized diode laser [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(4): 041402.
- [44] THOMPSON D J, SCHOLTEN R E. Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(2): 023107.
- [45] ZHANG L, LIU T, CHEN L, et al. Development of an interference filter-stabilized external-cavity diode laser for space applications[J]. Photonics, 2020, 7(1): 12.
- [46] VOUMARD C, SALATHÉ R, WEBER H. Mode selection by etalons in external diode laser cavities[J]. Applied Physics, 1975, 7(2): 123-126.
- [47] AOYAMA K, YOSHIOKA R, YOKOTA N, et al. Experimental demonstration of linewidth reduction of laser diode by compact coherent optical negative feedback system[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(12): 122701.
- [48] HAO L, WANG X, GUO D, et al. Narrow-linewidth self-injection locked diode laser with a high-Q fiber Fabry-Perot resonator [J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1397-1400.
- [49] LIANG W, LIU Y. Compact sub-hertz linewidth laser enabled by self-injection lock to a sub-millimeter FP cavity[J]. Optics Letters, 2023, 48(5): 1323-1326.
- [50] ZHAO Y, PENG Y, YANG T, et al. External cavity diode laser with kilohertz linewidth by a monolithic folded Fabry-Perot cavity optical feedback [J]. Optics letters, 2011, 36(1): 34-36.
- [51] ZHAO Y, LI Y, WANG Q, et al. 100 Hz Linewidth Diode Laser With External Optical Feedback[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1795-1798.
- [52] ZHAO Y, WANG Q, MENG F, et al. High-finesse cavity external optical feedback DFB laser with hertz relative linewidth [J]. Optics letters, 2012, 37(22): 4729-4731.
- [53] ZANG E, WANG S, ZHAO Y, et al. Quasi synchronous tuning for grating feedback lasers [J]. Applied Optics, 2011, 50(26): 5080-5084.
- [54] WANG S, LI Y, ZHAO Y, et al. Mode-hopping-free

- scanning over 2 THz by means of quasi-synchronous tuning[J]. *Applied physics B, Lasers and optics*, 2014, 114(3): 381-384.
- [55] LYNCH S G, HOLMES C, BERRY S A, et al. External cavity diode laser based upon an FBG in an integrated optical fiber platform [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8391.
- [56] 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.
- [57] ZHANG L, WEI F, SUN G, et al. Thermal Tunable Narrow Linewidth External Cavity Laser With Thermal Enhanced FBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 385-388.
- [58] SU Q, WEI F, SUN G, et al. Frequency-Stabilized External Cavity Diode Laser at 1572 nm Based on Frequency Stability Transfer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(4): 203-206.
- [59] HUANG D, TRAN M A, GUO J, et al. High-power sub-kHz linewidth lasers fully integrated on silicon [J]. *Optica*, 2019, 6(6): 745-752.
- [60] LUO C, ZHANG R, QIU B, et al. Waveguide external cavity narrow linewidth semiconductor lasers[J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(4): 041308.
- [61] ALALUSI M, BRASIL P, LEE S, et al. Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors[Z]. *Fiber Optic Sensors and Applications VI*. 2009. 10. 1117/12. 828849.
- [62] LI Y, ZHANG Y, CHEN H, et al. Tunable Self-Injected Fabry-Perot Laser Diode Coupled to an External High-Q $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ Microring Resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3269-3274.
- [63] FAN Y, VAN REES A, VAN DER SLOT P J M, et al. Hybrid integrated InP- Si_3N_4 diode laser with a 40 Hz intrinsic linewidth[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21713-21728.
- [64] XIANG C, GUO J, JIN W, et al. High-performance lasers for fully integrated silicon nitride photonics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6650.
- [65] 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.
- [66] CORATO-ZANARELLA M, GIL-MOLINA A, JI X, et al. Widely tunable and narrow-linewidth chip-scale lasers from near-ultraviolet to near-infrared wavelengths[J]. *Nature Photonics*, 2022, 17(2): 157-164.
- [67] 罗斌. 原子滤光器原理及技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2018.
- LUO B. Principle and Technology of Atomic Filter[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2018.
- [68] 缪新育. 对电流温度变化免疫的外腔半导体激光器[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- MIAO X. An external-cavity diode laser immune to the current and temperature fluctuations[D] Beijing: Peking University, 2011.
- [69] YIN B, SHAY T M. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter[J]. *Optics letters*, 1991, 16(20): 1617-1619.
- [70] KEAVENEY J, ADAMS C S, HUGHES I G. ElecSus: Extension to arbitrary geometry magneto-optics [J]. *Computer physics communications*, 2018, 224: 311-324.
- [71] ÖHMAN Y. On some new auxiliary instruments in astrophysical research VI. A tentative monochromator for solar work based on the principle of selective magnetic rotation[J]. *Stockholms Observatoriums Annaler*, 1956, 19(4): 9-11.
- [72] SOROKIN P P, LANKARD J R, MORUZZI V L, et al. Frequency-Locking of Organic Dye Lasers to Atomic Resonance Lines[J]. *Applied Physics Letters*, 1969, 15(6): 179-181.
- [73] DICK D J, SHAY T M. Ultrahigh-noise rejection optical filter[J]. *Optics letters*, 1991, 16(11): 867-869.
- [74] MIAO X, YIN L, ZHUANG W, et al. Note: Demonstration of an external-cavity diode laser system immune to current and temperature fluctuations [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(8): 086106.
- [75] WANG Y, ZHANG S, WANG D, et al. Nonlinear optical filter with ultranarrow bandwidth approaching the natural linewidth [J]. *Optics letters*, 2012, 37(19): 4059-4061.
- [76] YAN Y, YUAN J, WANG L, et al. A dual-wavelength bandpass Faraday anomalous dispersion optical filter

- operating on the D1 and D2 lines of rubidium[J]. *Optics Communications*, 2022, 509: 127855.
- [77] GUAN X, ZHUANG W, SHI T, et al. 420 nm Faraday Optical Filter With 2.7 MHz Ultranarrow Bandwidth Based on Laser Cooled ^{87}Rb Atoms[J]. *IEEE photonics technology letters*, 2023, 35(12): 672-675.
- [78] GUAN X, ZHUANG W, SHI T, et al. Cold-atom optical filtering enhanced by optical pumping[J]. *Frontiers in physics*, 2022, 10.
- [79] MENDERS J, SEARCY P, ROFF K, et al. Blue cesium faraday and voigt magneto-optic atomic line filters[J]. *Optics letters*, 1992, 17(19): 1388-1390.
- [80] XUE X, PAN D, ZHANG X, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter at ^{133}Cs weak 459 nm transition[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 275-278.
- [81] XIONG J, LUO B, YIN L, et al. The Characteristics of Ar and Cs Mixed Faraday Optical Filter Under Different Signal Powers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(8): 716-719.
- [82] SUN Q, HONG Y, ZHUANG W, et al. Demonstration of an excited-state Faraday anomalous dispersion optical filter at 1529 nm by use of an electrodeless discharge rubidium vapor lamp [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211102.
- [83] LING L, BI G. Isotope ^{87}Rb Faraday anomalous dispersion optical filter at 420 nm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3324-3327.
- [84] PENG Y, ZHANG W, ZHANG L, et al. Analyses of transmission characteristics of Rb, ^{85}Rb and ^{87}Rb Faraday optical filters at 532nm [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 236-241.
- [85] SUN Q, ZHUANG W, LIU Z, et al. Electrodeless-discharge-vapor-lamp-based Faraday anomalous-dispersion optical filter[J]. *Optics letters*, 2011, 36(23): 4611-4613.
- [86] XUE X, TAO Z, SUN Q, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter with a single transmission peak using a buffer-gas-filled rubidium cell [J]. *Optics letters*, 2012, 37(12): 2274-2276.
- [87] ZIELIŃSKA J A, BEDUINI F A, GODBOUT N, et al. Ultranarrow Faraday rotation filter at the Rb D1 line[J]. *Optics letters*, 2012, 37(4): 524-526.
- [88] ZHANG Y, JIA X, MA Z, et al. Potassium Faraday optical filter in line-center operation [J]. *Optics communications*, 2001, 194(1): 147-150.
- [89] DRESSLER E T, LAUX A E, BILLMERS R I. Theory and experiment for the anomalous Faraday effect in potassium[J]. *Journal of the Optical Society of America B, Optical physics*, 1996, 13(9): 1849-1858.
- [90] CHEN H, SHE C Y, SEARCY P, et al. Sodium-vapor dispersive Faraday filter [J]. *Optics letters*, 1993, 18(12): 1019-1021.
- [91] GELBWACHS J A, CHAN Y C. Passive Fraunhofer-wavelength atomic filter at 460.7 nm [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1992, 28(11): 2577-2581.
- [92] CHAN Y C, GELBWACHS J A. A Fraunhofer-wavelength magneto-optic atomic filter at 422.7 nm [J]. *IEEE journal of quantum electronics*, 1993, 29(8): 2379-2384.
- [93] WANNINGER P, VALDEZ E C. Diode-laser frequency stabilization based on the resonant Faraday effect [J]. *IEEE photonics technology letters*, 1992, 4(1): 94-96.
- [94] CHOI K, MENDERS J, SEARCY P, et al. Optical feedback locking of a diode laser using a cesium Faraday filter [J]. *Optics communications*, 1993, 96(4-6): 240-244.
- [95] JUNXIONG T, QINGJI W, YIMIN L, et al. Experimental study of a model digital space optical communication system with new quantum devices [J]. *Applied optics (2004)*, 1995, 34(15): 2619-2622.
- [96] 鲁学军, 汤俊雄, 郑乐民. 采用 Rb-Faraday 反常色散滤波器的外腔半导体激光器实验研究[J]. *电子学报*, 1997, 25(2): 79-82.
- LU X J, TANG J X, ZHENG L M. The experimental study of external cavity laser using Rb-Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Acta Electronic Sinica*, 1997, 25(2): 79-82.
- [97] 李发泉, 王玉平, 程学武, 等. 半导体激光器的原子法拉第反常色散光学滤波器光反馈稳频[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1317-1320.
- LI F Q, WANG Y P, CHENG X W, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter atomic frequency stabilized semiconductor laser through optical feedback[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1317-1320.
- [98] TAO Z, HONG Y, LUO B, et al. Diode laser operating on an atomic transition limited by an isotope ^{87}Rb Faraday filter at 780 nm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4348-4351.
- [99] TAO Z, ZHANG X, PAN D, et al. Faraday laser using

- 1.2 km fiber as an extended cavity [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2016, 49(13): 13LT01.
- [100] KEAVENEY J, HAMLYN W J, ADAMS C S, et al. A single-mode external cavity diode laser using an intracavity atomic Faraday filter with short-term linewidth <400 kHz and long-term stability of <1 MHz [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 095111.
- [101] SHI T, GUAN X, CHANG P, et al. A Dual-Frequency Faraday Laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 1-11.
- [102] CHANG P, CHEN Y, SHANG H, et al. A Faraday laser operating on Cs 852 nm transition [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(12): 230.
- [103] ROTONDARO M D, ZHDANOV B V, SHAFFER M K, et al. Narrowband diode laser pump module for pumping alkali vapors [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9792-9797.
- [104] TANG H, ZHAO H, WANG R, et al. 18W ultra-narrow diode laser absolutely locked to the Rb D₂ line [J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 38728-38736.
- [105] TANG H, ZHAO H, ZHANG D, et al. Polarization insensitive efficient ultra-narrow diode laser strictly locked by a Faraday filter [J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29772-29780.
- [106] CHANG P, SHI H, MIAO J, et al. Frequency-stabilized Faraday laser with 10⁻¹⁴ short-term instability for atomic clocks [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(14): 141102.
- [107] SHI H, CHANG P, WANG Z, et al. Frequency Stabilization of a cesium Faraday laser with a double-layer vapor cell as frequency reference [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(6): 1-6.
- [108] CHEN J. Active optical clock [J]. *Chinese science bulletin*, 2009, 54(3): 348-352.
- [109] ZHANG J, GAO G, WANG B, et al. Background noise resistant underwater wireless optical communic-

ation using Faraday atomic line laser and filter [J]. *Journal of lightwave technology*, 2022, 40(1): 63-73.

作者简介



秦晓敏, 2022 年于山东大学获得学士学位, 现攻读北京大学电子学院博士学位, 主要研究方向为超高稳定度法拉第激光器。

E-mail: xiaominqin@stu.pku.edu.cn

Qin Xiaomin received her B.Sc. degree from Shandong University in 2022. She is currently pursuing her Ph.D. degree in the School of Electronics at Peking University. Her main research interests include Faraday laser with ultra-high stability.



史田田 (通信作者), 2016 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2021 年于北京大学获得博士学位, 现为北京大学集成电路学院助理研究员, 主要研究方向为主动光钟、法拉第激光器。

E-mail: tts@pku.edu.cn

Shi Tiantian (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Xidian University in 2016, and received her Ph.D. degree from Peking University in 2021. She is currently a research associate in the School of Integrated Circuits at Peking University. Her main research interests include active optical clock and Faraday laser.



陈景标, 1990 年于杭州大学获得学士学位, 1995 年于北京大学获得硕士学位, 1999 年于北京大学获得博士学位, 现为北京大学电子学院教授、北京大学博雅特聘教授、量子电子学研究所副所长, 合肥国家实验室双聘研究人员, 主要研究方向为主动光钟、小型光钟、法拉第激光器、原子滤光器与激光稳频技术。

E-mail: jbchen@pku.edu.cn

Chen Jingbiao received his B.Sc. degree from Hangzhou University in 1990, received his M.Sc. degree from Peking University in 1995, and received his Ph.D. degree from Peking University in 1999. He is currently a Bo-Ya professor at the School of Electronics, Peking University, also the deputy director of the Institute of Quantum Electronics, School of Electronics, Peking University. He is a double-hire researcher in Hefei National Laboratory. His main research interests include active optical clock, compact optical clock, Faraday laser, atomic filter, and laser frequency stabilization technology.