

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.05

法拉第滤光器在法拉第激光器领域研究进展

王志洋¹, 史田田^{1*}, 刘子捷¹, 史航博¹, 秦晓敏¹, 关笑蕾¹, 卢子奇¹, 陈景标^{1,2}

(1.北京大学 电子学院 量子电子学研究所 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

2.合肥国家实验室, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 法拉第激光器是一种利用法拉第反常色散原子滤光器作为选频元件的新型外腔半导体激光器, 原理上法拉第激光的输出波长随着激光二极管驱动电流及工作温度的变化, 始终与原子跃迁谱线相对应, 可以将激光频率有效地锁定至原子跃迁谱线, 实现窄线宽的激光输出信号, 并且短期与长期频率稳定性均较好。本文详细介绍了自 1845 年法拉第旋光效应提出以来, 法拉第反常色散原子滤光器的发展历程, 法拉第激光器的工作机理、发展历程以及性能优越性, 并结合国内外的研究进展, 介绍了法拉第激光发展各个阶段的技术瓶颈及相应的解决办法, 同时展望了法拉第激光器未来在量子领域特别是量子精密测量领域的重要价值。

关键词: 法拉第反常色散原子滤光器; 法拉第激光; 外腔半导体激光器; 频率稳定性

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)04-0061-22

Research progress of Faraday optical filters in the field of Faraday lasers

WANG Zhiyang¹, SHI Tiantian^{1*}, LIU Zijie¹, SHI Hangbo¹, QIN Xiaomin¹,GUAN Xiaolei¹, LU Ziqi¹, CHEN Jingbiao^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Institute of Quantum Electronics,

School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 2.Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

Abstract: Faraday laser is a novel external cavity diode laser (ECDL) that uses the Faraday anomalous dispersion optical filter as the frequency-selective element. In principle, the changes of Faraday laser output wavelength with the laser diodes' temperature and current always corresponds to the atomic transition lines. The laser frequency can be effectively locked to the atomic transition spectral line, achieving a narrow linewidth laser output signal. Both short-term and long-term frequency stability are good enough for some applications. The development process of Faraday anomalous dispersion optical filters, and the mechanism, development process and advantages of Faraday lasers are summarized in this paper since the Faraday effect was reported in 1845. Combined with the research results at home and abroad, the technical bottlenecks and corresponding solutions belonging to different stages of Faraday laser development are introduced. The important value of Faraday laser in the quantum field, especially in the field of quantum precision measurement, in the future is also anticipated.

Key words: Faraday anomalous dispersion optical filter; Faraday laser; external cavity diode laser; frequency stability

收稿日期: 2023-03-25; **修回日期:** 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91436210); 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); 温州重大科技创新项目(ZG2020046)

引用格式: 王志洋, 史田田, 刘子捷, 等. 法拉第滤光器在法拉第激光器领域研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43 (4): 61-82.

Citation: WANG Z Y, SHI T T, LIU Z J, et al. Research progress of Faraday optical filters in the field of Faraday lasers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 61-82.



0 引言

法拉第旋光效应是人类科学研究过程中极其重要的发现,由英国著名物理学家和化学家法拉第(Michael Faraday, 1791–1867年)于1845年观察到^[1-5],当一束偏振光通过磁场作用的玻璃时,若光的传播方向与磁场方向相同,该束光的偏振方向会发生旋转。正如法拉第自己所写的那样"magnetic force and light are proved to have a relation to each other"^[6],这几乎是最早表明:光与介质,在方向与光传播方向相同的磁场作用下发生偏振方向旋转的研究结果。自法拉第旋光效应发现以来,一直受到众多科学家的青睐,著名物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831–1879年)便是在法拉第旋光效应的启发下,大胆地猜想磁场具有旋转特性,这对于他1861年发表巨作《On Physical Lines of Force》^[7]以及随后进一步建立电磁辐射基础理论都有重要的作用。但法拉第旋光效应提出后的很长时间内,并未与实际的应用相联系,一直到20世纪50–60年代,随着激光和光电子技术的兴起,人们才利用法拉第旋光效应制作了很多如磁光调制器、磁光开关、磁光隔离器等重要器件,这些基于法拉第旋光效应的器件极大地促进了激光、光电子和与之相关领域科学技术的发展,上述领域的发展进一步促进了法拉第旋光效应在量子精密测量与量子信息感知领域中更广泛的应用。

法拉第反常色散原子滤光器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, FADOF)便是基于法拉第旋光效应原理实现的原子滤光器。原子滤光器是一类利用原子共振跃迁的光谱学特征来实现滤光功能的器件的统称。实现原子滤光主要有两大类方法:一类是基于上述法拉第旋光效应的较为常用的FADOF^[8],具有高背景噪声抑制比^[9]、窄带宽^[10]、高透过率^[11]、高响应速率^[12]等特点;另一类是“吸收–再发射型”,即利用原子对信号光的吸收–再发射过程完成信号滤波,一般称为原子共振滤光器,具有窄线宽、大视场角、高背景噪声抑制等特点。

本文简要回顾了FADOF发展历程及其用作外腔选频器件形成法拉第激光器的发展历程,用作

选频器件过程分为起源阶段、发展阶段及飞速发展阶段,总结了各个阶段技术发展过程中遇到的瓶颈,以及解决问题的方法等。

1 FADOF发展回顾

FADOF是基于原子气室内光和原子相互作用时会产生共振法拉第旋光效应实现的,由于轴向磁场的存在,当传播方向与磁场方向相同的光通过原子气室时,光与原子的共振法拉第相互作用便会改变出射光的偏振态,使其与入射光偏振方向不同,配合入射前的偏振态选择及出射前的偏振态选择,选出出射与入射方向偏差为 90° 或 90° 奇数倍的信号,实现滤波,其组成结构及工作示意图如图1所示。

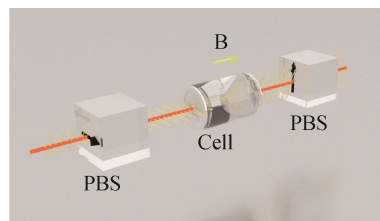


图1 FADOF组成结构及工作示意图

Fig.1 Composition structure and working diagram of FADOF

光和原子在工作磁场下相互作用产生共振法拉第旋光效应,该现象最早由意大利物理学家Righi于1898年左右首次提出^[13]:进入介质的线偏振光可以看做是由左旋和右旋圆偏振光的叠加,在外加磁场作用下,原子的磁子能级会发生Zeeman分裂,使得左旋和右旋分量的跃迁频率存在差异,导致左右两个圆偏振光的色散曲线发生分裂。色散强度与入射光的折射率直接相关,因此,在入射光的同一频率处,左右旋分量具有不同的折射率,当入射光传播相同的光程后,左右旋分量具有不同的相位变化,入射光偏振方向发生旋转。

FADOF原理于1956年由Öhman^[14]提出,在太阳光谱观测的研究中杂散光滤除非常重要,他注意到基于法拉第旋光效应,通过在受轴向磁场作用的光学介质前后放置偏振方向相互垂直的偏振器,可以实现滤除背景杂散光的功能。原子共振滤光器原理于1959年由哈佛大学Bloembergen在固态红外量子计数器的工作中提出^[15],他基于Weber于1957年提出的可以建立无自发辐射噪声

放大器的可能^[16],提出如果采用一束红外光入射至含有离子的晶体中,通过晶体内的参量过程便可产生其他波段的光,而其他背景杂散光无法产生其他波段的光,便实现滤光效果。但此后的十几年时间内,上述两种滤光技术并未得到充分的关注。直到20世纪70年代后期,原子共振滤光器首先得到发展,以1959年Bloembergen固态红外量子计数器为基础,由美国Aerospace公司Ivan A. Getting实验室的Gelbwachs、Klein、Wessel三位工程师于1978年提出的^[17]用于红外检测的原子蒸气量子计数器演化而来^[18],他们将红外信号光入射至Na原子气室中,使得红外信号光被吸收后再自发辐射出易于探测的可见光。与1959年采用晶体相比,采用原子蒸气作为转换介质具有对背景不过度响应、提高红外光子到可见光光子转换效率、无需高泵浦强度以及可快速响应等优点。

三位工程师的工作引起了科学家们的兴趣,1979年,加州大学劳伦斯利弗莫尔实验室的Marling、Nilsen、West和Wood四位科学家便明确地提出利用原子共振迁移可以实现光学滤波^[19]。他们在文章中详细给出了Cs、Rb等原子共振跃迁的结果。这进一步引发了行业内专家学者的研究兴趣,经过持续研究,成果很快便覆盖可见光到近红外的波长范围。在研究过程中,各个研究群体对具体应用场景各有侧重,如早期主要针对光通信中杂散光滤除,近期主要针对光学气象雷达的干扰滤除。

原子共振滤光器的发明,极大地促进了相关行业的进步,但随着深入地研究和应用,其缺点也逐渐被发现,因为共振型的原子滤光器首先需要吸收入射的信号光子,再通过自发辐射产生新波段的光子,不可避免地存在吸收-再发射过程,导致响应较慢;共振型原子滤光器在发射过程产生的光子,很难保持与原入射信号光方向相同,导致不能用于成像,同时共振型的原子滤光器透过率也较低,这些特点都使得其可应用范围受到了一定程度的限制^[18]。基于法拉第旋光效应的FADOF除了具有共振型原子滤光器优势外,还具有响应快、可成像、透过率高等特点,重新引起大家的研究兴趣。

自1956年首次报道FADOF原理后,一直到

1970年,美国萨克拉门托峰天文台学者Beckers针对基于线吸收系数的塞曼分裂和基于塞曼多重态中异常色散曲线分裂两种窄线宽滤光器透过率进行了相应理论分析^[13],基于塞曼多重态中异常色散曲线分裂的窄线宽滤光器与Öhman于1956提出的想法非常类似。同时期,该技术还被应用于染料激光器的频率稳定^[20-22]以及太阳光谱观测更加深入的研究当中^[23-24]。1982年,美国罗克韦尔国际科学中心的学者Yeh建立了较为完整的法拉第反常色散原子滤光器理论模型^[25],分析得出基于此原理的滤光器具有大视场、窄带宽优势($\sim 0.01\text{ Å}$)。经过近40年的发展,相关技术得到飞速发展。1991年,美国新墨西哥州立大学的学者Dick和Shay通过实验首次得到FADOF透射谱线,他们利用 ^{85}Rb 原子 $5s^2S_{1/2}-5p^2P_{3/2}$ 的780 nm跃迁实现了透射带宽达1 GHz,透过率达63%的FADOF^[9],其带外抑制比达 10^5 。

在FADOF发展过程中众多学者针对不同的应用场景和波长都进行了非常深入地研究,促使FADOF迅速发展,在自由空间光通信^[26-27]、激光雷达遥感成像^[28-30]等领域发挥重要作用,此外,在量子精密测量与量子信息感知领域,如法拉第激光^[31-34]、法拉第主动光频标^[35]、冷原子^[36-37]、量子网络^[38]、量子密钥分发^[39]、鬼成像^[40]、单光子光源^[41]、精密光谱学^[42-43]等研究中,同样发挥着不可替代的重要作用。

1.1 国外FADOF研究发展历程及现状

1991年,美国新墨西哥州立大学学者Yin和Shay建立了Cs原子D2线的FADOF理论模型,预估在跃迁中心波长852 nm处具有0.98的透过率和0.6 GHz的带宽。该模型考虑了超精细结构的影响,并对任意磁场强度均适用^[44]。

1992年,Yin和Shay又计算了FADOF在Cs原子455 nm跃迁线的性能,结果显示455 nm跃迁线的FADOF透过率高达0.96,同时透射带宽仅为0.9 GHz^[45]。1992年,美国热电子技术公司的J. Menders等人在455 nm处测量了不同场方向的铯磁光线滤波器光谱,当他们优化线宽最窄且透过率最高时,法拉第滤光器大约为0.7 GHz的带宽^[46]。

1993年,美国Aerospace公司电子技术中心的Chan和Gelbwachs利用Ca原子 $4p^1P_1 \rightarrow 4s^1S_0$ 跃迁实

现了423 nm波段的FADOF,在弱磁场下观察到的最大透过率约为0.55,透过的双峰光谱具有1.5 GHz的带宽^[47]。

1993年,科罗拉多州立大学的H. Chen和C. She等学者对Na原子中心波长为589 nm的FADOF进行了理论和实验研究,在轴向磁场为1 750 Gs(175 mT),气室长度为0.76 cm条件下对FADOF的线心操作特性进行了研究,得到了FADOF的峰值透过率为0.85,半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)为0.002 nm(1.9 GHz),反向透过率为 2×10^{-5} ^[48]。

1996年,美国海军空战中心的Dressler等人对K原子包含超精细能级效应 $4S_{1/2} \rightarrow 4P_{1/2}$ 跃迁的反常法拉第效应进行了研究,将理论与实验结果进行对比,修正了前人的相关研究结果^[49]。

2006年,德国达姆施塔特工业大学应用物理研究所的Popescu、Walldorf等学者测量了不同的磁场强度和气室温度组合条件下的透射光谱,当固定磁场强度为195 Gs(19.5 mT)时,发现FADOF的透过率与温度呈函数关系。还验证了激发态下的FADOF工作在Rb原子 $5P_{3/2} \rightarrow 8D_{5/2}$ 可行,且泵浦光在几百毫瓦的功率下也具有透射光谱^[50]。

2012年,西班牙光子科学研究所的Zielińska等人对Rb原子D1线795 nm的FADOF进行了理论和实验研究,得到透过率为0.71,对应445 MHz的峰值带宽,1.2 GHz的等效噪声带宽^[51]。2014年,Zielińska等人利用Rb原子D1线,实现了峰值透过率为0.7,带外抑制达57 dB,传输带宽为445 MHz的FADOF^[52]。

2015年,英国杜伦大学的Zentile等人利用Cs原子D1线在磁场为45.3 Gs(4.53 mT),温度为68 °C时,实现峰值处透过率为0.77、310 MHz通带和0.96 GHz等效噪声带宽的FADOF^[53]。同年,Zentile等人对存在均匀谱线加宽的FADOF进行了相关优化,他们发现气室长度对线心型滤光器和线翼型滤光器影响完全不同,自增宽效应存在重要影响^[54]。

2018年,英国杜伦大学的Keaveney等人通过无约束几何的磁光旋转优化基于Rb原子D2线的FADOF,建立了相应理论模型来预测原子蒸气中光学滤波器的最佳性能,同时几位学者经研究发

现,通过放宽磁场角度相对于光轴的约束,品质因数(Figure of merit, FOM)性能可以大大提升^[55]。

1.2 国内FADOF研究发展历程及现状

1993年,中国科学院武汉物理与数学研究所(现武汉精测院)的Y. Peng等人利用Rb原子780 nm跃迁波长在强磁场条件下进行了FADOF实验,峰值透过率为0.3^[56]。2012年,北京大学的X. B. Xue等人利用Rb原子 $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$ 跃迁,原子气室充缓冲气体实现了单透射峰,室温下透过率为0.002,对应峰值透射带宽为0.65 GHz,49 °C时对应峰值透过率为0.121,63 °C情况下,透过率增长至0.306,对应带宽为1.41 GHz^[57]。

1996年,北京大学的M. H. Duan等人基于 $5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 跃迁对Rb原子激发态下的法拉第反常色散光谱进行了研究,单峰透过率在跃迁中心频率时最高,对应FWHM为800 MHz,透过率随激光功率的增高而增高^[58]。2011年,北京大学的Q. Q. Sun等人利用无电极放电蒸汽灯取代激光,利用Rb原子 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ 跃迁(真空中为775.9 nm)实现了激发态的FADOF,峰值透过率为0.019,对应带宽为650 MHz^[59]。

2000年,哈尔滨工业大学的X. L. Jia等人从理论和实验层面对K原子FADOF进行了研究,在气室长度为1 cm,磁场强度为815 Gs时,实现了线心模式的FADOF,理论分析中峰值透过率为0.83,FWHM为1.5 GHz,经实验验证峰值透过率为0.71,FWHM为1.6 GHz,理论计算与实验验证较为吻合^[60]。2001年哈尔滨工业大学的Y. D. Zhang等人从理论和实验层面对K原子D2线的FADOF进行了充分研究,实现了峰值透过率为0.9时带宽为1.5 GHz的FADOF,同时给出了温度对于FADOF透过率的影响^[61]。

2009年,河南师范大学的Y. Peng等人首次在中间场情况下,基于原子系统的超精细能级结构建立了法拉第原子滤光器激发态的理论模型,基于模型得出滤光器工作在Rb原子 $5P_{1/2} \rightarrow 10S_{1/2}$ 跃迁时,在等效带宽小于3 GHz情况下峰值透过率约为0.5。他们也讨论了温度、磁场强度、泵浦光强、原子气室长度等对FADOF整体性能的影响,对该波段的实验验证具有重要意义^[62]。

2012年,北京大学的Y. Wang等人利用Cs原

子 $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 7P_{3/2} F'=3, 4, 5$ 跃迁, 实现了 455 nm 单峰透射的 FADOF, 峰值透过率为 0.86, 透射带宽为 1.5 GHz^[63]。

2012 年, 北京大学的 Q. Q. Sun 等人使用无电极放电铷蒸气灯 Rb 原子 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ 跃迁实现了激发态的双透射峰 FADOF, 在温度为 220 °C、射频功率为 3.5 W 的驱动下, 峰值透过率为 0.219, 每个峰的透射带宽约为 300 MHz^[64]。2016 年, 北京大学的 J. Y. Xiong 等人运用密度矩阵法, 对工作在 1 529 nm 波段激发态 FADOF 相应的泵浦过程进行了详细的理论分析, 分析过程中塞曼频移、多普勒展宽以及弛豫过程等均在影响因素内, 理论模型对所有种类的 FADOF 相关计算均适用。分析结果表明, 最优泵浦频率受磁场强度的影响, 同时获得了在最优泵浦频率下所有超精细塞曼子能级的布居数分布, 从而说明 ^{85}Rb 原子是布居数的主要贡献。除此以外, 在实验中还得到了峰值透过率约为 0.9, 通过分析得到所观察的光谱不对称是塞曼子能级中布居数分布不平衡造成的^[65]。

2014 年, 武汉物理与数学研究所(现武汉精测院)的 X. C. Zhao 等人在 Rb 原子 D1 线基于受激拉曼迁移实现了原子滤光器。采用的方法是将传统 FADOF 与受激拉曼增益放大器相结合从而实现 795 nm 波段的原子滤光器, 该滤光器具有单透射峰, 同时基于原子相干, 探测光功率 26 μW 情况下, 滤光器最小透射带宽约为 22 MHz。与普通的 FADOF 相比, 这种具有受激拉曼增益的滤波器在存在强光背景的情况下能更有效地提取微弱信号, 可应用在激光通信和激光雷达等领域中^[66]。

2015 年, 北京大学 X. B. Xue 等人实现工作在 Cs 原子 $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$ 跃迁波段为 459 nm 的线翼 FADOF。在 179 °C 和 323 Gs (32.3 mT) 条件下, 较高侧翼的峰值透过率达到 0.98, 首次实现了 P. Yel 在 1982 年理论模型的预测^[67]。

2019 年, Z. M. Tao 等人利用 ^{87}Rb 原子 $5S_{1/2} F=2 \rightarrow 5P_{3/2} F'=1, 2, 3$ 跃迁实现了 780 nm 单透射峰的 FADOF, 在温度为 75 °C 左右时, 峰值透过率为 0.748, 透射带宽为 0.96 GHz^[68]。

2021 年, 北京邮电大学的 B. Luo 等人研究了基于空心阴极灯的 FADOF 在低温下的热特性与时间特性, 以及该 FADOF 的启动特性, 非常适用需

要即时响应进行滤光的场景。通过研究表明: 该 FADOF 的性能不受环境温度影响, 无论是在冰点以下还是在温度变化较大的情况下, 均能表现出优异的稳定性^[69]。

2021 年, 中国计量科学研究所的 W. Zhuang 等人基于冷原子 ^{87}Rb 原子 $5^2S_{1/2} F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2} F'=3$ 跃迁, 实现了峰值透过率为 0.026, 透射带宽为 7.18 MHz 的 780 nm 波段的 FADOF^[36]。

2022 年, 北京邮电大学的 X. L. Guan 等人利用激光冷却, 基于 ^{87}Rb 原子 $5^2S_{1/2} F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2} F'=3$ 跃迁, 实现了单峰透射带宽为 2.7 MHz, 峰值透过率为 3.2% 的 420 nm 波段的 FADOF^[70], 描述其综合性能的 FOM 达 11.85 GHz⁻¹。

目前, 基于冷原子的 FADOF 因其更窄的透射带宽及更大的 FOM 受到国内科学家的广泛关注, 随着透过率等性能的提高, 冷原子 FADOF 势必将在法拉第激光器中发挥巨大的作用。

2 法拉第激光器原理介绍及其发展回顾

法拉第激光器是利用 FADOF 作为外腔选模元件的一种外腔半导体激光器, 其原理结构如图 2 所示, 主要包含作为激光增益介质的镀增透膜的宽谱半导体激光二极管 (Anti-Reflection Coated Laser Diode, ARLD)、提供选频功能的 FADOF、能够提供反馈形成激光并调谐腔长的外部光学元件。镀增透膜的激光二极管发出的宽带荧光通过第一格兰泰勒棱镜 (GT-1), 由于磁光效应, 通过原子气室时, 由于在光传播方向存在磁场, 故荧光会发生法拉第旋光从而使得偏振方向发生一定的偏转。将 FADOF 设定特定的气室温度、磁场强度, 使得宽带荧光中仅有与原子跃迁频率对应的光可以在通过原子气室后偏振方向旋转 90°, 则此部分光会最大限度的通过第二格兰泰勒棱镜 (GT-2)。通过

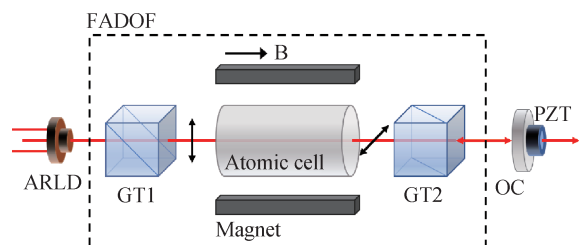


图2 法拉第激光原理图

Fig.2 Schematic diagram of Faraday laser

GT-2后,垂直入射至光学耦合输出镜(Output Coupler, OC),而后又会有一定比例的光通过光学耦合输出镜反射,从而与入射光平行反向的返回至镀增透膜的激光二极管,形成光学谐振腔,实现激光输出,即为法拉第激光。

半导体激光器自1962年问世以来^[71-73],因其具有高效率、小尺寸、低成本及可调谐性等特点,在诸如激光冷却^[74]、原子钟^[75-77]、量子光学^[78]、光学传感^[79]、激光通信^[80-81]等领域都有着非常重要的应用,是目前应用最广泛的激光器之一。在一些特殊的应用场景,需要线宽较窄、可调谐范围较大的半导体激光器,传统的基于内腔反馈的半导体激光器,例如分布式布拉格反射激光器(Distributed Bragg Reflector Laser, DBR)、分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)等,受大光腔损耗以及增益介质自发辐射等的影响,线宽难以进一步减小,且采用基于载流子色散效应的电调谐或采用基于热光效应的热调谐两种调谐方式仅有几nm的调谐范围^[82],无法满足所有应用场景。因此,迫切需要窄线宽、高稳定度、调谐范围大的半导体激光。Velichanskii、Fleming和Mooradian等人^[83-84]发现通过采用外部反射镜实现反馈即构建外部谐振腔,可以有效压窄半导体激光器的线宽^[85],提出了外腔半导体激光器(external cavity diode laser)。近年来,外腔半导体激光器因其优越的性能广泛应用于冷原子物理、量子光学、原子钟技术、激光测距、激光制导、激光通信、光学相干断层扫描等领域。

传统外腔半导体激光器选模主要包含三种方法:第一种是光栅外腔半导体激光器,即引入光

栅作为半导体激光器的光反馈与选模元件,增大谐振腔品质因数(Q 值),同时将激光器线宽压窄。光栅选模外腔半导体激光器根据光栅种类不同,可分为衍射光栅外腔半导体激光器、光纤光栅外腔半导体激光器、体全息光栅外腔半导体激光器、体布拉格光栅外腔半导体激光器等^[86]。第二种是滤光器型外腔半导体激光器^[82],即利用具有光学滤波功能的器件作为外腔半导体激光器选模元件,包含Fabry-Pérot标准具^[87]、干涉滤光片^[88-89]、声光及电光可调谐滤波器^[90-92]、双折射滤光片^[93-94]等。第三种是波导型外腔半导体激光器^[82],一般由放大器和光波导耦合组成,光波导作为外腔可实现选模。光波导一般设计为半径略有差别的两个微环结构,双微环结构由于半径不同因此自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)存在差别,输出光谱会出现相互叠加的情况,而后通过模式竞争后只存活并输出一个激光模式。

FADOF的特性是仅与原子跃迁谱线对应的波长才能够通过滤光器,与传统外腔半导体激光相比,法拉第激光输出波长始终能够限制在原子跃迁谱线的多普勒展宽范围内,具有对二极管驱动电流和工作温度波动免疫的潜质。其发展历程可大致分为起源、发展及飞速发展三个阶段,各阶段主要工作见表1。

2.1 起源阶段

法拉第激光器的起源阶段为20世纪70年代至80年代末。对于将法拉第反常色散原子滤光器与激光器相结合的研究,早在20世纪70年代便已开展^[20-22]。FADOF在当时一般称其为法拉第滤光器(Faraday filter)。

表1 法拉第激光器发展阶段
Tab.1 Development stages of Faraday laser

阶段	时间	发展内容	里程碑工作
起源阶段	1970s-1980s	将FADOF与激光器相结合这一思想的形成与尝试	FADOF用于染料激光器的频率稳定 ^[20-22]
发展阶段	1990s-2000s	FADOF与半导体激光器相结合的研究逐渐形成,光学环路锁定技术快速发展	FADOF与半导体激光器相结合 ^[95-96]
飞速发展阶段	2000s至今	以镀增透膜半导体激光二极管作为增益,将法拉第激光与精密光谱学相结合,同时致力于双频法拉第激光与大功率法拉第激光的实现,拓展其实际应用	采用镀增透膜半导体激光二极管作为增益介质,极大限度降低内腔模的影响,形成对二极管驱动电流和温度波动免疫的法拉第激光 ^[114]

1969年9月,美国IBM研究中心的Sorokin等人^[20]将法拉第滤光器放置于染料激光器的谐振腔中,将Na原子气室的加热温度控制在170~220℃,原子密度处于 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^3 \sim 3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 之间,通过施加磁场,使光偏振方向在25 cm长的气室中的旋转角度可以达90°的整数倍,成功将染料激光器的频率稳定在Na原子共振吸收线上。该项工作为染料激光器锁定至其他原子的共振跃迁线提供了可能。

1977年10月,日本京都大学的Endo等人将法拉第滤光器放置于氩激光泵浦的染料激光器的谐振腔中,从而将单频连续染料激光器的频率锁定在了钠原子的共振吸收线上,通过改变Na原子气室的温度和磁场强度可以选择稳定至 D_1 线或者 D_2 线^[21];他们的工作还首次实现了将连续光染料激光器稳定至共振跃迁线 D_1 线与 D_2 线的中心。1978年,该团队以上述工作为基础,将法拉第滤光器放置于氩激光泵浦的染料激光腔中,在无任何波长选择元件的情况下,获得了氩原子吸收线从1s态到2p态的单纵模连续振荡^[22],即可以通过法拉第滤光器将染料激光器的频率锁定至氩原子吸收线,实现单纵模输出;对于亚稳态和准亚稳态的原子吸收线,都能完成锁频。他们还发现,由于同位素效应,随着应用于法拉第滤光器磁场强度的增加,当振荡频率在吸收线的中心区域时会向高频移动,当振荡频率在吸收线的边翼区域时会向低频移动。研究中,当使用 ^{20}Ne 时,振荡恰好发生在 ^{20}Ne 吸收线的中心,当磁场增加时,振荡分裂成以吸收线为中心的两个对称分布的模式,与理论预测相符。根据实验结果与理论计算,发展了一种利用同位素效应在吸收线附近微调连续染料激光器的技术。上述将法拉第滤光器应用于染料激光器锁频的几项工作,拓展了法拉第滤光器在激光器领域的可应用场景,大大增加了其应用范围;将法拉第滤光器置于光学谐振腔的实验方案,为法拉第激光器这一外腔半导体激光器的出现奠定了重要的思想基础。

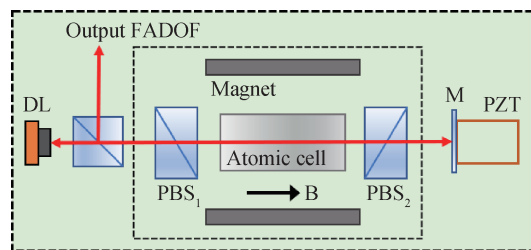
通过分析得出,此阶段主要形成了将法拉第滤光器与激光器相结合的思想并进行尝试。这一思想的形成主要是由于法拉第滤光器的特殊性质。虽然法拉第滤光器最开始出现是用于太阳光谱观测中背景光滤除,但仅与原子跃迁谱线对应的激

光才能够通过法拉第滤光器,在需求的牵引下便很自然的将其应用于激光器稳频,这对于其与半导体激光器相结合的应用具有极其重要的意义。

2.2 发展阶段

法拉第激光器发展阶段为20世纪90年代初至21世纪初。

法拉第滤光器与半导体激光相结合的研究始于利用光学环路锁定半导体激光器的输出频率至原子跃迁谱线^[95-96]。从1962年半导体激光器出现至20世纪80年代末90年代初,随着半导体激光器在遥感、通信等领域的广泛应用,对半导体激光器的性能(如输出模式、激光线宽、频率稳定度等)的要求也越来越高,在这样的需求背景下,利用光栅、F-P腔等构建外腔压窄激光线宽、利用饱和吸收谱以原子跃迁线作为频率参考构建电学反馈锁定环路等技术发展迅速^[97-98],从而可进一步提高外腔半导体激光器的频率稳定度等性能。法拉第滤光器背景噪声滤除效果较好,在通信接收等应用中扮演着越来越重要的角色,其通常仅有GHz量级的通带,对于发射激光线宽也有较高的要求,因此电学反馈锁定环路技术不可或缺。电学反馈环路虽然能够提升外腔半导体激光器的性能,但系统较为复杂,成本较高,其应用场景受限。在这样的大背景下,得益于法拉第原子滤光器出色的性能以及其在通信中重要的角色,以法拉第滤光器为重要元件构建半导体激光器光学环路锁定的技术应运而生。其原理图如图3所示,通过反射率极低的反射镜,对半导体激光器发出的且通过FADOF的光进行反射,形成光学环路,实现锁定。



注: DL—diode laser; PBS—polarizing beamsplitter.

图3 FADOF构建光学环路锁定原理图

Fig.3 Schematic diagram of optical feedback locking based on FADOF

1990年12月,美国德克萨斯大学奥斯汀分校的Lee与Campbell两位科学家利用Rb法拉第原子

滤光器,通过构建窄带光学反馈环路,实现了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 材料780 nm半导体激光器的频率锁定^[95]。他们利用FADOF与低反射率($\sim 10^{-5}$)的反射镜构建反馈环路,使输出光只有接近原子共振频率时才能返回至激光器。通过构建光学环路,不仅压窄了激光线宽,将激光频率锁定至铷原子光谱的亚多普勒特征,同时采用光学外差检测方法评估激光线宽,得到通过光学环路反馈的构建,激光线宽由30 MHz下降至35 kHz。该项工作中,用于构建反馈回路的光强(PBS_1 透射)为50 mW/ cm^2 ,占Diode Laser输出光的90%左右,虽然能量损耗较大,但依据光学环路反馈实现了半导体激光频率的锁定。随后,他们以上述技术为基础,在实验中通过外差干涉技术,即利用两套系统进行拍频,完成了采用该方法的激光输出频率稳定度(Allan方差)的测量,平均时间为200 s时,可获得Allan方差为 4.9×10^{-12} ^[99]。

1991年9月,加拿大拉瓦尔大学的Cry等科学家利用法拉第滤光器(Rb原子气室被磁屏蔽保护),通过共振相位共轭反射构建光学反馈实现了未镀膜的 AlGaAs 材料780 nm半导体激光器(Hitachi HL7802)的频率锁定,锁定带宽约为400 MHz^[96]。共振相位共轭反射是通过简并四波混频获得的,原子滤光器中的原子蒸气恰好可以充当非线性介质^[100]。实验中原子气室温度控制在40 °C,以保证原子密度在 $4.2 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。文中特别提到,考虑到激光功率在原子气室和光电探测器之间的损失,峰值反射率在 2×10^{-4} ,恰好借鉴在高 Q 值的腔中较弱的光学反馈可以有效的压窄线宽^[101-102],这也为半导体激光线宽的进一步优化提供了支撑。

1992年初,美国新墨西哥州立大学的Wanninger、Valdez以及Shay三位科学家利用透射带宽为1 GHz的Rb原子FADOF作为外腔频率选择元件,将其放置于外腔耦合输出镜与二极管激光器组成的外谐振腔中,实现了780 nm半导体激光器的频率稳定,将激光线宽由自由运转时的16 MHz压窄到6 MHz^[103]。实现激光频率锁定的系统与图3相似,由激光二极管、准直透镜、Rb原子气室、消光比达 1×10^{-4} 的偏振分光棱镜以及反射率为 $57\% \pm 1\%$ (780 ~ 800 nm)的耦合输出镜组成。其中原子气室由轴向大小为47 Gs、轴向变化小于1%的磁

场包围且可加热。当将法拉第原子滤光器放置于外谐振腔中时,只有与原子跃迁线对应即在窄带透射带宽内,偏振方向旋转为90°的光才能以较低的损耗通过原子滤光器,该部分光入射至耦合输出镜后又返回至激光二极管,形成激光振荡。法拉第滤光器可以确保只有在透射带宽内的光才可起振,完成了选频功能,实现了输出频率的锁定。当时称之为法拉第反常色散光学发射器(Faraday anomalous dispersion optical transmitter)锁定技术。

1992年5月,美国加州理工学院的Shevy、Iannelli、Kitching以及Yariv四位科学家利用Cs原子法拉第原子滤光器形成的光反馈将852 nm半导体激光器的线宽压窄至比Schawlow-Townes极限仍小数个量级^[104]。他们在该项工作中建立了外部频率相关元件向半导体激光器提供弱光学反馈情况的理论模型,并进行实验验证。激光器采用Hitachi HLP 1400,在120 mA的驱动电流下单频输出12.5 mW的激光,光斑准直大小为0.25 cm^2 。将法拉第原子滤光器放置于激光器输出端面与反射镜构成的40.5 cm长的外腔中,原子滤光器中原子气室长度为5 cm,偏振分光棱镜消光比为 $1:10^4$,气室加热温度为 ~ 50 °C,轴向磁场强度为 ~ 1 Gs。通过上述控制法拉第原子滤光器的参数,在Cs原子 D_2 线(852 nm) $F = 4 \rightarrow 5$ 跃迁附件产生了FWHM为17 MHz的反射,即激光频率在跃迁线频率17 MHz范围内的光能够通过滤光器,从而实现光学反馈,光学反馈的振幅和相位分别通过反射腔镜前的中性密度滤光片与压电陶瓷(PZT)控制。通过构建依赖法拉第原子滤光器的光学反馈,即在铯蒸气中利用窄的无多普勒法拉第共振将激光线宽由20 MHz压窄至10 kHz,使线宽减小了 2×10^3 倍。经理论分析得出:通过依赖法拉第原子滤光器构建弱光学反馈,可以使激光线宽减小 10^6 倍,实际减小为 2×10^3 倍,将由延迟自外差获得的拍频信号进行洛伦兹拟合与洛伦兹3/2幂拟合,发现拍频信号与洛伦兹3/2幂拟合更加吻合,即 $1/f$ 噪声严重影响线宽压窄系数。经实验发现:在较窄的频率范围实现反馈的情况下,激光器趋向于在零频率牵引附近工作。通过在保持零频率牵引的同时,测量激光线宽与法拉第信号峰值失谐的函数关系,证明由Cs共振引起的频率相关色散是线宽减小系

数的主要贡献者。

1993年2月,美国Thermotrex公司的Choi等科学家利用1 GHz通带宽度的Cs原子法拉第滤光器,通过构建光学反馈环路实现了未镀膜的GaAlAs材料852 nm连续波半导体激光器(Spectra Diode Labs SDL-5400-G1)的频率锁定,激光线宽压窄至30 MHz以下^[105]。实验中,激光器出射的光经分光镜分为两部分,反射部分用于构建光学反馈环路,透射部分用于外差检测。根据法拉第原子滤光器的特点,通过控制气室长度、磁场强度与气室温度至较为适合的参数,便可使得仅与原子跃迁谱线对应且旋光角度为90°左右的光能通过法拉第滤光器并通过反射镜返至激光器,从而通过构成光学环路以锁定激光频率至原子跃迁谱线。透射部分用于构建外差检测系统,评估锁定效果及实际应用。与1991年Lee等人^[95]的工作不同,此项工作用于构建光学反馈环路的能量占总激光输出能量的15%,相比于未锁定前40 mW的输出功率,利用法拉第滤光器构建光学环路实现频率锁定后,输出为34 mW。

利用FSR为1 GHz的F-P干涉仪来测试激光输出频率对于激光器供电电流变化的敏感程度。锁定前,测得激光频率相对于电流变化的参数为1.1 GHz/mA;锁定后,电流变化1.2 mA时激光器锁定状态保持不变,即对应1.3 GHz的锁定频率范围,相较于文献^[95]中实现的300 MHz锁定带宽与文献^[96]中实现的400 MHz的锁定带宽均有一定程度的提高。需要注意的是,在本项工作中使用的激光器在室温条件下,71 mA驱动时输出波长为859 nm,功率为50 mW的激光。为了与Cs原子跃迁线852 nm相对应,实验中将激光器操作温度下降至-1.5 °C,在40 mA驱动电流下输出了波长为852 nm、功率为40 mW的激光。可以看出,无法拉第滤光器构建的锁定环路时,波长对电流和温度波动变化的影响较为敏感。通过利用法拉第滤光器构建光学环路稳定激光输出频率的方法,使输出激光对二极管电流和温度变化的鲁棒性提升。随着研究的深入,法拉第激光的优势逐渐展现在科学家的面前。

需要注意的是,科学家们在该项工作中明确提出,虽然法拉第激光器对二极管电流或温度的变化具有非常弱的敏感性,但由于反馈路径中的

不稳定性而不可避免的存在模式跳变,同时在改变电流的过程中,输出激光是锁定至法拉第滤光器的任一透射谱,不一定能够完全与原子跃迁谱线对应。该项工作指出了法拉第激光器的核心优势,同时发现了法拉第激光器的重要技术瓶颈,为具备更加卓越性能法拉第激光的出现奠定了重要的思想与技术基础。

1993年10月,美国加州理工学院的Kitching、Shevy、Iannelli以及Yariv四位科学家在1992年工作^[104]的基础上,利用Cs原子FADOF向半导体激光提供具有色散效应的弱光学反馈,大幅度降低了半导体激光器白噪声和1/f噪声水平,压窄了激光线宽^[106]。在该项工作中,首先回顾了利用光学反馈降低半导体激光器噪声的机理,说明了光学反馈影响频率噪声谱的原因;然后依据相关理论推导了包含白噪声和1/f噪声的半导体激光器的场谱线型,得出场谱线型对光反馈参数的依赖关系;最后通过测量单模半导体激光中频率噪声谱和线宽二者与光学反馈参数之间的关系与理论推导比对。外部谐振腔由半导体激光器发射面与固定在PZT上的反射腔镜组成,法拉第原子滤光器放置于腔内用于提供具有色散效应的光学反馈,同时在谐振腔中插入中性密度滤光片用于控制反馈强度。实验中,使用了两种不同的磁场参数,46 Gs和1 Gs。当使用46 Gs的磁场时,原子滤光器的透射谱为具有两个FWHM为400 MHz的透射峰,激光发射后能够返回至准直透镜的功率为 $2.2 \times 10^{-4} P_{\text{out}}$, P_{out} 为出射光功率;当使用1 Gs的磁场时,原子滤光器透射谱为FWHM为16 MHz的单透射峰,激光发射后能够返回至准直透镜的功率为 $6.85 \times 10^{-5} P_{\text{out}}$ 。与46 Gs磁场条件相比,1 Gs条件下,线宽衰减系数 N 更大。最后通过研究得出,依据法拉第原子滤光器的光学反馈具有以下规律:白噪声和1/f噪声均以 N^2 为系数减小;当白噪声为主要噪声时,线宽以 N^2 为系数减小,当1/f噪声为主要噪声时,线宽以 N 为系数减小,当既包含白噪声又包含1/f噪声时,线宽以 N^2 为系数减小。

同年,该团队还发表了两项重要工作^[107-108],将法拉第原子滤光器与半导体激光器更加紧密的结合。文献^[107]中利用Cs原子法拉第原子滤光器提供色散损耗,通过外腔反馈到激光二极管的内

部,从而实现激光线宽的压窄与激光频率的锁定。利用Cs原子法拉第原子滤光器建立光学反馈环路,与电学反馈环路相结合,将激光线宽由自由运转时的10 MHz压窄至1.4 kHz^[108],是当时的最佳结果。实验采用的激光器为STC Model LT50A-03U,具有50 mA的阈值电流。实验时驱动电流为120 mA,输出功率为85 mW,聚焦后光斑面积为0.5 cm²出射至外腔。与之前采用的Hitachi HLP 1400激光器相比,输出功率更大,导致与Cs原子共振时具有较大的功率展宽,使 N 值减小到100左右。法拉第原子滤光器放置在激光器输出面与反射镜构成的外腔中,用于组成光学反馈系统,将激光器频率与无多普勒法拉第共振峰对应,同时提供电学反馈需要的误差信号(该误差信号为输出激光功率与最高输出功率之间的差值),然后通过调节PZT,使激光输出功率对应的频率始终是透射率最高点对应的频率。上述工作为后续改善法拉第激光模式跳变这一技术瓶颈提供了重要的技术支撑。

1994年9月,美国加州理工学院的Kitching、Boyd、Yariv及美国迈阿密大学的Shevy,基于已有的工作基础,利用法拉第原子滤光器提供的弱光学反馈,对半导体激光器振幅噪声进行了详细研究^[109],对其理论模型进行详细分析,并与实验结果进行比对。因要研究的是半导体激光器阈值以上的振幅噪声,必须从量子力学速率方程的角度出发,以Langevin方程为基础,在场方程中增加了一个表示外腔反馈的项,同时允许该反馈项描述可能存在于腔中的色散元素,如原子蒸气等。实验采用的激光器为GaAs材料STC LT50A-03U 852 nm半导体激光器,阈值电流为51.4 mA,构建的外腔长度为75 cm。原子滤光器中的Cs原子气室被加热到90 °C,轴向磁场大小为150 Gs。激光输出光中,98%的功率通过60 dB的隔离器后由第一光电探测器探测振幅噪声,另一光电探测器用于检测光学环路反馈功率。法拉第原子滤光器用于构建弱光学反馈,在光学反馈环路功率与输出激光功率的比($P_{\text{fb}}/P_{\text{out}}$)约为 10^{-6} 条件下,低频幅度噪声可降低7 dB。

通过建立理论模型并进行详细分析,得出泵浦噪声和由于自发辐射到非激光模式中的噪声(在高泵浦速率下的主要噪声机制)不受光学反馈的影

响。他们基于此提出,若要获得或增强振幅压缩光,反馈必须与泵浦抑制结合使用,这一发现对于振幅压缩光的实现具有重要的贡献。

1995年4月,美国加州理工学院Kitching和Yariv两位科学家^[110]通过结合泵浦抑制与弱光学反馈实现了量子阱半导体激光器的振幅压缩态,其中依靠法拉第原子滤光器的弱反馈可以同时提供色散损耗,在该项工作中发挥了极其重要的作用。实验中量子阱激光器采用的GaAs材料852 nm Spectra Diode Labs SDL-5412,通过在泵浦电流源的输出级放置一个100 mH的电感实现高频下的泵浦抑制,同时允许直流电流不受阻碍的通过。激光器前表面采用小于5%的抗反射镀膜,后表面为98%的高反镀膜,阈值电流为17 mA。激光器发出的光通过透射与反射比为1:99的分光镜耦合进激光器前表面与反射镜形成的71 cm的外腔中,轴向磁场为150 Gs的法拉第原子滤光器便放置于该外腔内部,用于实现弱光学反馈并同时提供色散损耗,原子共振通过将频率相关的相移/吸收引入反馈光场,并在外腔中完成波长选择。中性密度滤光片与PZT分别用于控制反馈强度与反馈相位。通过上述实验装置,波长选择与具有色散损耗的弱光学反馈可以同时应用于该激光器中。通过实验设计,使得泵浦抑制与具有色散损耗的弱光学反馈相结合,实现了半导体激光器在室温自由运转情况下0.9 dB的压缩,相比之前最好的0.33 dB^[111],具有很大的提升。他们在该项工作中还提出,反馈并不是在任何情况下均可以降低量子噪声,在反馈相位的某些值处可以显著降低量子噪声,而在其他值处也会增强量子噪声。

需要指出的是,该系统中首次采用前表面镀抗反射膜的激光器与法拉第原子滤光器相结合,提高了反馈耦合效率,对于激光器内部噪声的进一步压窄具有较大贡献,为后续法拉第激光器性能的优化奠定了坚实基础。同时在该项工作中,两位科学家提出自由运转激光器的噪声对来自光学部件,特别是来自光学隔离器前面的伪光学反馈极其敏感。因此不仅要考虑减少其他部件反射光对光学反馈的影响,而且也要考虑隔离器表面的散射光的影响,因为 $10^{-8}P_{\text{out}}$ 量级的反馈功率对激光噪声水平具有显著的影响。

1997年2月,北京大学鲁学军等研究者对采用Rb原子法拉第原子滤光器的外腔半导体激光器进行了系统研究^[112],将激光频率稳定在Rb原子法拉第原子滤光器的四个透射峰上,实现了单模输出,输出激光的中心频率稳定度达 5×10^{-9} 。该实验中,激光器采用的是Sharp LTD021半导体激光器,当驱动电流为68.65 mA,在12.43 °C时,激光输出功率为10 mW。法拉第原子滤光器内的原子气室控温在130 °C,轴向磁场可调谐至数百高斯。在利用法拉第原子滤光器构建外腔反馈时,为了不影响激光输出功率,也避免因强反馈造成多模输出,经过研究使用于反馈的光功率占总输出功率比为0.3%,也避免了过弱的反馈影响激光器稳频及线宽压窄效果。通过上述弱反馈的构建,使激光线宽由30 MHz压窄至3 MHz,并观察到应用于法拉第原子滤光器的磁场从500 Gs变到400 Gs,实现了激光频率200 MHz范围的连续调谐。

2005年,中科院武汉物理与数学研究所(现中国科学院精密测量科学与技术创新研究院)李发泉等研究人员^[113],利用GaAlAs材料半导体激光器与Cs原子法拉第反常色散原子滤光器制成外腔反馈半导体激光器,在温度恒定的情况下,电流变化范围在3~4 mA时,激光输出波长不会改变,每2 h的稳频水平能达到75 MHz。

法拉第激光器在这一阶段得到长足的发展,以法拉第滤光器与染料激光器相结合为基础,对外腔半导体激光器性能要求的提高以及法拉第滤光器的独有特性,法拉第滤光器与半导体激光器进行了有效的结合,并取得了很好的效果与技术进步。此阶段的技术发展,已经能初步展现法拉第激光器对于激光驱动电流和工作温度变化的免疫特性。此阶段中,因采用的源头直接为半导体激光器,存在内腔模,由于模式竞争引入的模式跳变是此阶段发展的主要技术瓶颈,这一阶段为解决这一技术瓶颈的尝试也为下一阶段奠定了坚实的技术基础。

2.3 飞速发展阶段

法拉第激光器飞速发展阶段为21世纪初期至今。2011年8月,北京大学的Miao等人,将Rb原子FADOF作为外腔选模原件,并且分析前人的研究中存在的优势及不足,首次利用镀抗反射膜的

激光二极管搭建外腔,在6.4%反馈强度的情况下,实现了对二极管电流和温度波动免疫的半导体激光,激光线宽为69 kHz^[31]。实验装置如图4所示,为了消除二极管内腔模易引发跳模的缺点,在此项工作中创造性地使用镀抗反射膜的激光二极管作为源头,在无外腔时,该二极管的发光光谱为60 nm宽的荧光光谱,避免了需要加热或者冷却激光二极管以调谐其发射光谱特性的影响。

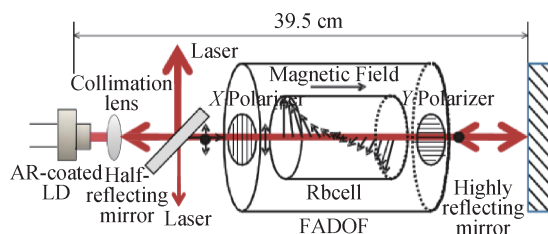
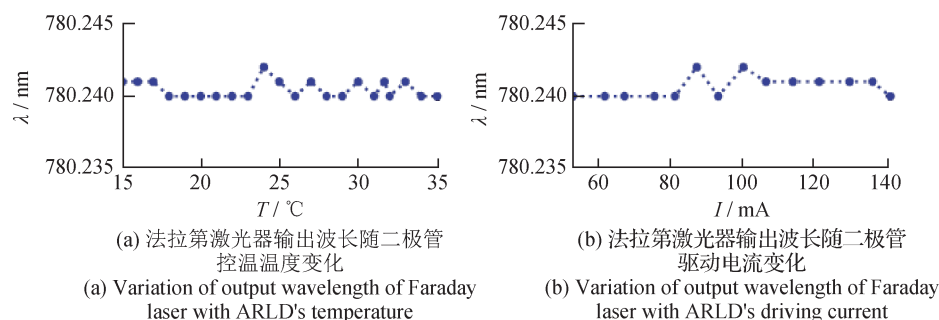


图4 镀抗反射膜激光二极管法拉第激光器原理图^[31]

Fig.4 Schematic diagram of ARLD external-cavity Faraday laser^[31]

镀抗反射膜的激光二极管发出的光经过透镜准直和分光棱镜后,然后通过Rb原子法拉第原子滤光器后,经由反射率高达98.3%的腔镜返回至发光二极管。法拉第原子滤光器中Rb原子气室的直径为20 mm,长为30 mm,原子气室内为自然丰度的Rb原子,⁸⁵Rb占比为72.2%,⁸⁷Rb占比为27.8%。通过控温精度为0.1 °C的电路将Rb原子气室温度控制至70 °C,同时施加大小为320 Gs的轴向磁场,使入射光的偏振方向发生旋转,仅满足偏振方向旋转为 $n\pi + \pi/2$ 的光才能在基本无吸收的情况下通过法拉第原子滤光器,实现选频。在上述条件下,法拉第原子滤光器的峰值透过率为51%。该项工作中还得到了温度及磁场对激光频率的影响系数,分别为50 MHz/°C和1 GHz/100 Gs。

通过将法拉第原子滤光器与镀抗反射膜的激光二极管相结合搭建外腔半导体激光器,获得了对二极管电流和温度波动免疫的新型外腔半导体激光器,即性能更加优越的法拉第激光器。当激光器二极管电流在55~142 mA、温度在15~35 °C范围内变化时,激光输出波长始终稳定在2 pm以内,实验结果如图5所示。该项工作中报道的性能完备的法拉第激光器在计量、遥感、空间光通信等众多领域都有重要的潜在应用价值。

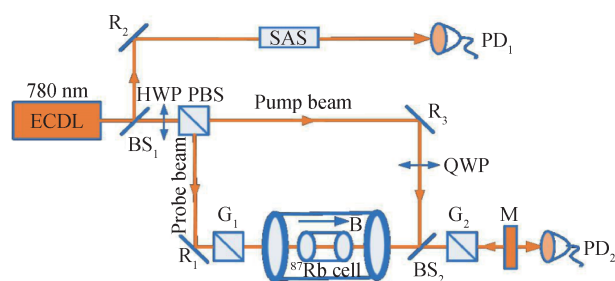
图5 法拉第激光器性能^[31]Fig.5 Performance of Faraday laser^[31]

2012年, 北京大学的X. G. Zhang等人利用Rb原子法拉第反常色散原子滤光器构建光学反馈系统(Optical feedback), 通过全光的方式成功将780 nm半导体激光器锁定至Rb原子共振跃迁线, 锁定后激光频率波动减小至1.7 MHz。经研究发现, 该项技术通过增加外腔长度, 可以大大的增加锁定后激光频率的稳定度^[114]。实验装置如图6所示, 法拉第反常色散原子滤光器中的Rb原子气室长度为5 cm, 原子气室内为96.5%的⁸⁷Rb原子, 并且安装磁屏蔽桶以减小地磁场的影响。通过控温精度为0.2 °C的电路将Rb原子气室温度控制在85 °C, 并施加11 Gs大小的轴向磁场。实验分别测量了激光器自由运转及探测光通过反射镜反射回激光器时, 饱和吸收谱及FADOF透射谱的情况, 得到FADOF透射谱在 $F = 2 \rightarrow F' = 2, 3$ 的交叉峰处以及在 $F = 2 \rightarrow F' = 1, 3$ 交叉峰处的带宽均小于50 MHz, 锁定后激光频率波动大幅度减小。经研究发现, FSR的大小与激光频率稳定度关系密切, 若

FSR大于FADOF透射谱在交叉峰处的带宽, 谐振腔的纵模与FADOF透射谱不一致, 会影响激光频率稳定性。该项工作采用了两种外腔的腔长, 当腔长为1.2 m时, 对应125 MHz的FSR, 大于44.4 MHz的透射谱带宽, 锁定后激光频率抖动的标准偏差为3.3 MHz; 而将外腔腔长延伸至6 m后, 较长的外腔保证了谐振腔内总有一个纵模与FADOF透射谱重合, 激光频率抖动的标准偏差减小至1.7 MHz。

该项工作中利用FADOF获得的外腔半导体激光, 由于其频率可以与原子跃迁频率精确对应, 可广泛应用于光和原子相互作用的实验中, 在量子光学这一领域中, 具有极其重要的潜在应用, 为后续技术的进步与发展奠定了坚实的基础。

2015年7月, 英国杜伦大学的Zentile博士在其名为《Applications of the Faraday effect in hot atomic vapours》的博士论文第八章中, 介绍了利用Rb原子法拉第反常色散原子滤光器实现选频从而形成外腔半导体激光器的研究^[115]。利用法拉第反常色散原子滤光器作为外腔选频元件, 由于透射谱的包络宽度一般大于FSR, 因此透射谱包络内含有多个腔模, 导致跳模的情况出现。此文分析了两种可改善此问题办法的优缺点。一种是采用较长的谐振腔改善此问题, 另外一种是采用较短的谐振腔, 使得透射谱轮廓内只存在一个腔模。采用较长的谐振腔可以减小自由光谱范围, 使得透射谱最高点附近始终存在一个腔模, 从而改善跳模的情况; 采用这种方式, 还具有不需要主动稳定谐振腔长度的优点, 缺点是无法消除模式跳变。使用较短的谐振腔, 通过增大FSR, 使其大于透射谱轮廓, 从而透射谱轮廓内仅存在一个腔模, 这样便可以消除模式跳变, 采用此种方法需要主动稳定谐振



注: ECDL-780 nm external cavity diode laser; BS-Beam splitter; G-Glan-Taylor prism; R-High reflection mirror for 780 nm; HWP-Half-wave plate; QWP-Quarter-wave plate; M-Mirror, the transmission is 20%; PD-Photodiode; SAS-Saturated absorption spectra.

图6 全光锁定实验装置图^[115]Fig.6 Diagram of all-optical locking experimental setup^[115]

腔腔长, 确保透射谱内存在腔模, 同时保证长期稳定度。Zentile 博士采用了第二种减小谐振腔的办法。

其实验装置图与图4相似, 同样采用镀抗反射膜的激光二极管作为增益, 与之前采用未镀膜二极管的研究相比, 采用镀抗反射膜的激光二极管可以最大限度消除内腔模的影响, 同时采用镀抗反射膜的二极管具有较宽的荧光光谱范围, 避免了需要加热或者冷却激光二极管以调谐其发射光谱特性的影响。激光二极管发光后, 由准直透镜准直, 而后通过透反比为8:2的分光镜, 反射光用于形成外腔反馈, 外腔长度约为6 cm。FADOF中气室长度为5 mm, 磁场强度大小为240 Gs不均匀性优于2%, 气室加热温度为93 °C。通过外差法, 测得了激光线宽优于0.85 MHz。

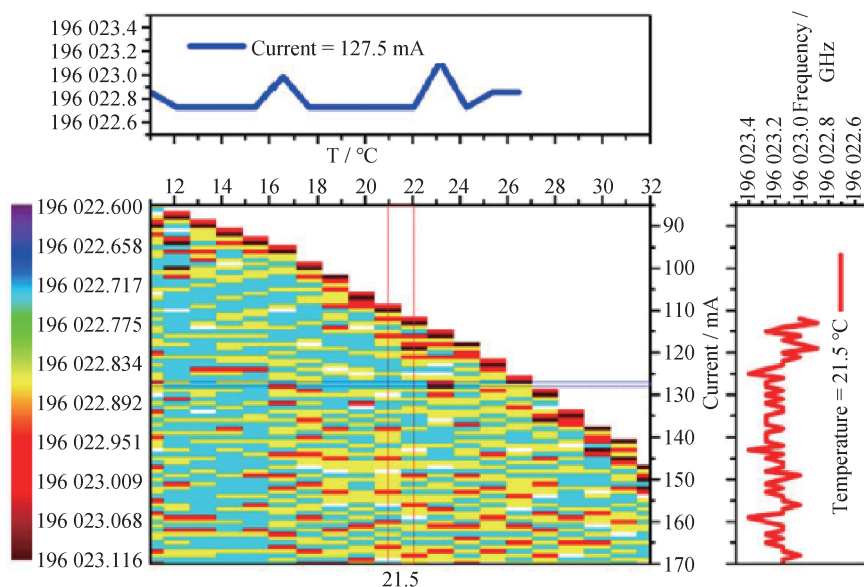
2015年9月, 北京大学的Z. M. Tao等人在国际上首次正式提出法拉第激光这一概念^[32]。他们利用Rb原子法拉第反常色散原子滤光器作为外腔选频器件, 采用镀抗反射膜激光二极管作为源头, 实现了对二极管温度和电流波动免疫的激光器。在该项工作中, 作者考虑到采用自然Rb会存在的问题, 即由于不同同位素的存在使得很难限制激光频率与一个特定的原子跃迁精确共振, 因此他们选用96.5%浓度的⁸⁷Rb原子, 气室的长度为5 cm, 两个格兰泰勒棱镜的偏振消光比为 1×10^{-5} 。温度使传输频谱的频率偏移48 MHz/°C, 电流使发射频谱的频率偏移13 MHz/mA。实验中, 通过测量法拉第反常色散原子滤光器在恒定温度下, 不同磁场下的透射谱, 同时测量了恒定磁场下不同温度下的透射谱, 同时分析了磁场和温度对于透射谱最高射率的影响, 从而确定FADOF的最佳工作参数, 以获得最佳的激光器性能。该法拉第激光器能够实现镀增透膜激光二极管驱动电流在55 mA到140 mA变化范围, 温度变化从15 °C到35 °C的范围内, 激光器输出波长始终与在780.245 6 nm附近, 波长标准差小于等于0.27 pm, 能够与原子跃迁线对应。

2016年5月, 北京大学的Z. M. Tao等人利用1.2 km光纤作为外腔半导体激光器的扩展腔, 利用Rb原子法拉第反常色散原子滤光器作为扩展腔选频元件, 将激光频率始终限制在 $5S_{1/2}F=2 \rightarrow$

$5P_{3/2}F'=1, 3$ 的交叉峰29.1 MHz的范围附近, 其实现了法拉第激光器^[33]。实验装置与图6相似。该工作中首先将激光器输出波长调谐至自然Rb原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ 跃迁线所对应的780 nm波长, 而后将激光器输出的5 mW光通过分光镜分为两部分, 一部分用于饱和吸收谱提供频率参考, 另一部分通过偏振分光棱镜分为两部分, 其中探测光用于形成扩展外腔, 并提供光学反馈, 泵浦光通过1/4波片后变为圆偏振, 而后在Rb原子气室中与探测光产生非线性相互作用后, 使探测光由于圆二向色性导致偏振态发生改变, 从而压窄FADOF透射谱至数十MHz。通过光纤将扩展外腔长度变为1.2 km, 使得法拉第激光的分数阶频率稳定度在0.06 ~ 1 s的采样时间内可达 10^{-10} , 在不对光纤长度进行控制时, 长期相对频率稳定度可达 10^{-11} 。

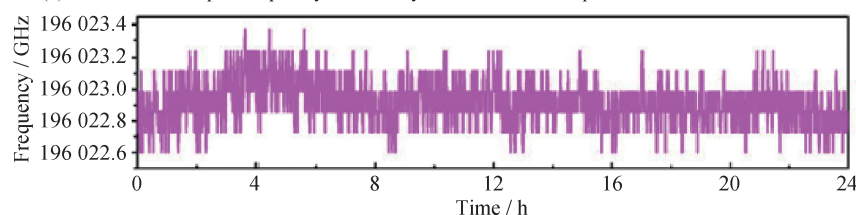
2016年9月, 英国杜伦大学Keaveney等人, 利用Rb原子法拉第反常色散原子滤光器作为外腔选频元件, 实现了长稳优于1 MHz、短期线宽优于400 kHz的法拉第激光器^[34]。他们采用镀抗反射膜的激光二极管, 外腔由激光二极管输出面与90%反射率的反射腔镜组成, 长度为~7 cm, 自由光谱范围为~2.1 GHz。法拉第反常色散原子滤光器中原子气室同样镀抗反射膜, 长度为5 mm, 磁场大小为250 Gs, 加热温度为90 °C。在形成法拉第激光后, 他们通过监测法拉第激光器的输出功率, 即激光腔模是否一直与透射谱最高点重合, 作为PID反馈的信号, 对法拉第激光进行电学反馈控制。在实验中, 他们还通过与锁定至 $5S_{1/2}F=3 \rightarrow 5P_{3/2}F'=4$ 跃迁线的商用外腔半导体激光器进行拍频, 测量法拉第激光的线宽。他们对从频谱仪获得的拍频信号进行了Gaussian拟合与Lorentzian拟合, 发现与Gaussian线型更为匹配, 与Lorentzian线型匹配度较差, 表明此时技术噪声如粉红色噪声与1/f噪声等为主要原因导致了激光线宽的展宽。

2017年8月, 北京大学的P. Y. Chang等人利用无电极放电灯首次实现了激发态的法拉第激光器, 即可直接输出Rb原子 $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ 跃迁对应的1 529 nm的法拉第激光^[116]。与传统激发态的法拉第反常色散原子滤光器需要额外频率锁定的激光将原子由5S态激发到5P态不同, 该项工作是基于无极放电灯的激发态法拉第反常色散原子滤光器实现外



(a) 法拉第激光器输出频率随二极管驱动电流及控温温度变化

(a) Variation of output frequency of Faraday laser with LD temperature and LD current



(b) 二极管驱动电流为141.5 mA、控温温度为21.5 °C, FADOF控温温度为135 °C时法拉第激光输出频率变化

(b) 24-hour frequency fluctuations of Faraday laser with LD current of 141.5 mA LD temperature of 21.5 °C, and FADOF temperature of 135 °C

图7 激发态法拉第激光器性能

Fig.7 Performance of excited-state Faraday laser

腔选频, 配合镀抗反射膜的激光二极管(ARLD), 使得二极管的驱动电流为 85 ~ 171 mA, 二极管温度为 11 ~ 32 °C, 该激光器均能稳定工作, 并且 24 h 的激光器的长期频率波动范围维持在 600 MHz 以内, 如图 7 所示。该项工作还测量了激光线宽与强度噪声(RIN)。该项工作中外腔由二极管发射面与 80% 反射率的腔镜组成, 长度约为 60 cm, 因此 FSR 约为 250 MHz。基于无极放电灯的激发态法拉第反常色散原子滤光器中 Rb 原子气室长度为 15 cm, 直径为 2 cm, 气室内充有自然 Rb 与缓冲气体, 缓冲气体为 2 torr Xe, 采用的磁场为 500 Gs, 当气室加热至 135 °C 时, 能够获得最大透射率达 46%, 因此可以使得外腔形成振荡, 输出激光。该法拉第激光器通过与标称线宽 1 kHz 的光纤布拉格光栅激光器进行拍频, 进而测量法拉第激光的线宽为 15.5 kHz, 他们测量的法拉第激光强度噪声

在 10 kHz 时优于 -110 dBc/Hz。该法拉第激光器的出现为一些处于激发态波长的法拉第激光实现提供了良好的解决办法, 可以使得系统更加紧凑、可靠, 能够提供与原子激发态跃迁谱线对应的激光, 有着巨大的应用潜力。

2018 年 4 月, 美国空军学院激光与光学研究中 Rotondaro 等人利用 Cs 原子 FADOF 的 $6^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 跃迁实现了基于 600 W 镀增透膜二极管激光的选频与输出, FADOF 作为外腔选频元件, 激光输出功率达 518 W, 将二极管激光 3 THz 的外腔反馈光谱可压窄至 10 GHz^[117]。实验中激光源头为二极管激光的组合形式, 形成输出功率为 600 W, 不含 FADOF 的外腔反馈光谱为 3 THz 的宽带激光。FADOF 放置于二极管激光组输出面与 20% 反射率耦合输出镜组成的外腔中, 他们将长为 6 英寸的 Cs 原子气室抽真空至 10^{-7} torr 并加热至 96 °C, 对应气

室内原子数密度为 $10^{13}/\text{cm}^3$ ，同时采用 700 Gs 的磁场使其具有最佳性能。当将 FADOF 放置于外腔中，光谱宽度由 3 THz 压窄至 10 GHz。由于在这项工作属于光强极强的情况，会存在基态原子的显著光泵浦，导致碱金属密度的减小，因此透射谱线与理论计算不太相符。FADOF 的透射谱线在上述条件下是双频，并且由于光泵浦导致的碱金属密度减小会使得双透射谱线向中心移动。这为极强光强下的法拉第反常色散原子率光器透射谱形状提供了参考。

2019 年，北京大学 P. Y. Chang 等人利用 Cs 原子 FADOF 作为外腔选频器件，首次实现了基于 Cs 原子 852 nm 的对二极管温度和电流波动免疫的法拉第激光器^[118]。40 cm 长的外腔由二极管出光面与高反射率的平面镜谐振腔镜组成，法拉第反常色散原子滤光器中原子气室为直径 15 mm，长为 30 mm 的圆柱形，通过测量不同温度与磁场下的与原子跃迁对应透射谱的透射率，确定温度为 41 °C，磁场为 330 Gs 时，为最佳工作条件，控温精度为 0.1 °C，磁场的不均匀度为 7% (可忽略)，最后得到带宽约 800 MHz 的透射谱。该项工作实现了固定二极管驱动电流，其工作温度变化在 14 ~ 35 °C 范围内，固定二极管工作温度，其驱动电流变化在 74 ~ 130 mA 范围内，激光输出波长始终保持在跃迁线附近。关于波长稳定性，在 48 h 内波长变化保持在 ± 2 pm 范围内。此研究工作还通过与另一个外腔半导体激光器进行拍频，测量了该法拉第激光器的线宽，经过拟合计算为 17 kHz。该项工作为一些需要激光波长与原子跃迁谱线对应且长期稳定性好的应用场景提供了切实的可能，具有重要的实际应用价值。

2020 年，北京大学 T. T. Shi 等人利用 Cs 原子法拉第反常色散原子滤光器作为选模元件，第一次实现了双频输出的自由运转法拉第激光，每个频率线宽均小于 33 kHz，同时双频的最可几拍频线宽为 902.95 Hz，双频激光在精密测量、双频干涉等领域均有着潜在的应用^[119]。69 cm 长的外腔由镀抗反射膜激光二极管输出面与反射腔镜组成，将 FADOF 放置于外腔之中，其透射谱轮廓由磁场大小、原子气室长度与原子气室加热温度共同决定，通过调整参数，使得其透射谱可以满足在 Cs

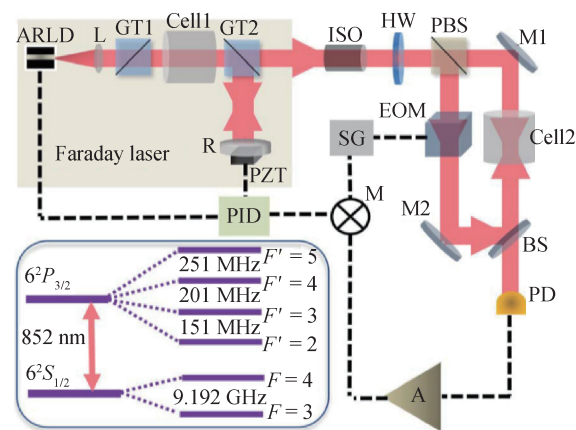
原子基态超精细能级 $F = 3$ 和 $F = 4$ 到第一激发态的跃迁同时具有较高透射率，从而能够在选频过程中形成双频激光输出。该项工作中，磁场大小为 330 Gs，原子气室长为 30 mm，内充有纯 Cs。原子气室温度在 36 ~ 55 °C 变化范围内，双频之间的频差在 8.8 ~ 7.43 GHz 范围内变化。研究者们通过精确分析测量结果，得到了原子气室温度对于双频激光频差的影响系数，其在 36 ~ 42 °C 的范围内为 -30.12 ± 5.91 MHz/°C，在 42 ~ 55 °C 的范围内为 -6.34 ± 0.58 MHz/°C。在该项工作中还测量了双频法拉第激光的强度噪声 (RIN) 噪声，在 10 kHz 为 -134 dBc/Hz。该双频法拉第激光器的实现展现了极佳的应用潜力，如通过精确设计谐振腔腔长，使得双频频率间隔恰好为 FSR 的整数倍，从而使其作为 CPT 原子钟的相干光源；双频法拉第激光也可与光学频率梳进行类比，连接光频与微波频率。双频法拉第激光的出现拓展了法拉第激光新的研究领域，具有重要价值。

2021 年，国防科技大学的 H. Tang 等人利用基于 ^{85}Rb 的法拉第反常色散原子滤光器作为外腔选模元件，以 9 个阶梯组合的输出功率为 22 W 的二极管激光模块作为光源，实现了 4.9 A 驱动电流下 18 W 输出的法拉第激光，同时将激光输出光谱由 4 nm 压窄至 0.002 nm (1.2 GHz)^[120]。为了避免自由运转情况下的模式竞争，二极管激光模块输出面镀抗反射膜，具有小于 0.5% 的剩余反射率。实验中外谐振腔由二极管激光模块发射面与全反腔镜组成，法拉第反常色散原子滤光器放置于其中。激光由光源输出后，首先通过一对焦距分别为 5 cm 和 15 cm 的透镜进行准直，而后通过 1/2 波片与偏振分光棱镜配合，从而控制用于形成反馈环路的光强 (透射) 与输出光强 (反射) 的比值，以寻找最佳工作条件。该项工作中，法拉第反常色散原子滤光器采用 124 Gs 的磁场，原子气室为长为 10 mm，直径为 25.4 mm 的圆柱形，内充有纯 ^{85}Rb ，为了提高透过率，两通光窗口外侧面镀增透膜。他们采用控温精度达 1 °C 的电阻丝对原子气室进行加热，通过试验不同温度下法拉第反常色散原子滤光器的透射谱，确定 139.8 °C 为最佳工作温度。在确定用于反馈的最佳功率时，因为此时属于强光条件，同样温度、磁场条件下法拉第反常色散

原子滤光器透射谱由于光泵浦的存在与弱光时有一定差别。他们在谐振腔内放置1/2波片,通过旋转1/2波片寻找激光输出功率与通过FADOF内形成的其他模式抑制效果的平衡来确定,最后得出FADOF内前置偏振分光棱镜的透射与反射能量比为1:4时为最佳工作条件,有效避免了热沉积效应。并且虽然是双频输出,但90%的能量都集中在其中一个模式,另一个模式仅有10%的能量。最后他们将输出的法拉第激光锁定至Rb原子 D_2 线,实现了在二极管激光模块温度在16~30℃变化范围内,驱动电流在1~5 A变换范围内,激光输出波长始终在780.244 nm附近。该大功率法拉第激光器在碱金属激光泵浦、亚稳态稀有气体激光泵浦、自旋交换光泵浦和量子光学中有重要应用价值。

2022年4月,北京大学的P. Chang等人首次将Cs原子852 nm法拉第激光的输出频率通过调制转移谱锁定至原子跃迁谱线,该项工作中的法拉第激光器可调整为单频或双频输出,单频工作时通过锁定自评估短稳达 $3 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$;双频工作时,通过锁定可将双频激光拍频线宽压窄至85 Hz^[42]。实验装置如图8所示,外腔由镀抗反射膜激光二极管的输出面与反射腔镜构成,将法拉第反常色散原子滤光器放置于外腔中实现选频。该项工作法拉第反常色散原子滤光器的磁场大小为330 Gs,不均匀度为7%;原子气室为长为30 mm,直径为15 mm的圆柱形,内充有纯Cs;气室加热至38℃,可在 $F=4$ 和 $F=3$ 处分别产生透过率约为50%和25%的透射谱轮廓,使得该激光可以产生双频输出。但通过精确的调节工作条件,如二极管驱动电流与法拉第反常色散原子滤光器的气室加热温度,同样可使其工作在单频状态。法拉第激光输出后,经过隔离器以避免外界对谐振腔的干扰。而后经偏振分光棱镜分为透射(探测光)与反射(泵浦光)两部分,功率分别为0.5 mW与1.5 mW,从而利用调制转移谱进行频率锁定。调制转移谱光路中用的原子气室为直径为2 cm,长为10 cm的圆柱形,其温度控制在室温25℃左右。在单频状态下,通过调制转移谱,将激光频率锁定至 $6^2S_{1/2}F=4 \rightarrow 6^2P_{3/2}F=5$ 的循环跃迁线,大幅度提高了法拉第激光的频率稳定度;在双频状态下,将其中一个激

光频率锁定至 $6^2S_{1/2}F=3 \rightarrow 6^2P_{3/2}F=2$ 的跃迁线,有效压窄了双频激光之间拍频信号的线宽,降低了微波信号的噪声,为光生微波开辟了新的途径,该项工作对于科学研究具有重要意义。



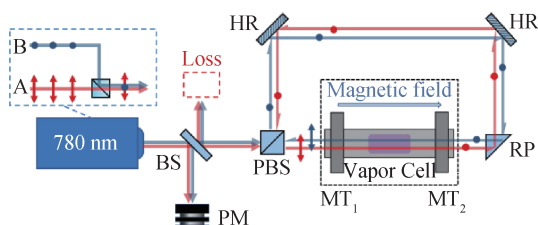
注:GT1 and GT2- Glan-Taylor prism; Cell1-Raraday cell; ISO-Isolator; Cell2-Cs vapor cell of the MTS device; EOM-Electro-optic modulator; A-Amplifier; SG-Signal generator; M-Frequency mixer; PID-Proportional integral derivative controller; The relevant Cs energy level diagram is reminded on the bottom left.

图8 实验装置图^[42]

Fig.8 Diagram of experimental setup^[42]

2022年8月,国防科技大学的H. Tang等人利用基于 ^{87}Rb 的法拉第反常色散原子滤光器作为外腔选模元件,以18个阶梯组合的输出功率为47 W(驱动电流为5 A)的二极管激光模块作为光源,实现了5 A驱动电流下38.3 W输出的法拉第激光,同时将激光输出光谱由4 nm压窄至0.005 nm(2.6 GHz)^[121]。为了避免自由运转情况下的模式竞争,二极管激光模块输出面镀抗反射膜,剩余反射率小于0.5%。实验装置如图9所示,为了改善法拉第反常色散原子滤光器偏振选频相关特性,导致其受限于使用在采用偏振组合来进一步增加亮度的激光二极管中,采用了如图9所示的环形谐振腔结构,从而尽可能的增加外腔效率,以保证高功率的输出。该项工作中的FADOF磁场为111 Gs,由内径为55 mm,外径为80 mm,长为10 mm的两块圆柱形磁铁提供;原子气室为长为20 mm,直径为25.4 mm的圆柱形,内充有纯 ^{87}Rb ,为了提高透过率,两通光窗口外侧面镀增透膜。采用控温精度达1℃的电阻丝对原子气室进行加热,通过获得

不同温度下 FADOF 的透射谱并进行比较, 确定 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最佳工作温度。在上述工作条件下, 实现了大功率法拉第激光的稳定输出, 二极管激光模块温度在 $28\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化范围内, 驱动电流在 $1.5\sim 5\text{ A}$ 变换范围内, 激光输出波长始终在 780.23 nm 附近。虽然在该最优条件下激光输出为多频, 但是由于输出光谱压窄后激光能量有较好的集中效果, 因此对于二极管泵浦碱金属激光器、量子光学等都有着较为重要的潜在应用价值。



注: BS-Non-polarization beam splitter; HR-High-reflective mirror; RP-Right-angle prism; PM-Power meter; MT₁ and MT₂-Permanent cylindrical neodymium magnet.

图9 实验装置图^[121]

Fig.9 Diagram of experimental setup^[121]

2022年11月, 北京大学的Shi等人实现了基于Cs原子法拉第反常色散原子滤光器的法拉第激光, 并利用调制转移谱对其输出频率进行了锁定, 获得输出激光频率的自评估短期稳定度为 $5.8 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$, 在50 s时为 2.0×10^{-15} [43]。实验装置图与图8相似, 155 mm长的谐振腔由镀增透膜激光二极管的输出面与反射腔镜组成, FADOF放置于谐振腔中。该项工作中, FADOF采用的磁场大小为900 Gs, 原子气室为直径为30 mm, 直径为15 mm的圆柱形, 内充有Cs原子及10 torr Ar作为缓冲气体, 气室加热至 $72\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以确保最佳性能。在调制转移谱部分, 参考原子气室为长为11 cm, 直径为2.6 cm的圆柱形, 内充有纯Cs, 并且采用双层结构, 两层玻璃之间为真空, 可以有效的避免参考原子气室内的低频温度波动, 从而降低对频率稳定性的影响。在利用调制转移谱锁定频率时, 通过固定探测功率, 测量不同泵浦功率对稳频效果的影响, 找寻最佳泵浦功率; 而后固定已经找寻到的最佳泵浦功率, 测量不同探测功率对稳频效果的影响, 从而确定泵浦功率与探测功率的最优值, 以获得最好的稳频效果。该项工作通过采用在法拉第反常色散原子滤光器的气室中充

入缓冲气体, 并且采用双层原子气室作为调制转移谱中的参考信号来源, 大大提升了法拉第激光输出频率的稳定效果, 在量子光学、量子精密测量等领域均有着广泛的应用。

这一阶段以采用镀抗反射膜的激光二极管改善模式跳变为创造性开端, 有效的解决了上一阶段中的技术瓶颈。同时以此为基础, 国内外对法拉第激光器的研究兴趣更加浓厚, 更多的专家学者投入到此领域的研究中来, 使得法拉第激光器技术飞速发展。大功率法拉第激光、冷原子、精密光谱学等领域均以法拉第激光为基础快速开展; 基于法拉第激光的应用产业, 如光频标等也在逐渐形成, 更多的潜在应用也在逐渐显现。

3 总结与展望

法拉第激光器作为一种新型的外腔半导体激光器, 其本质是利用FADOF作为外腔选频元件, 通过选频元件的特殊性质, 将输出激光波长限制在原子跃迁谱线的多普勒展宽范围之内。相比传统的外腔半导体激光, 法拉第激光对二极管驱动电流和工作温度波动鲁棒性较好, 输出波长始终限制在原子滤光器透射谱带宽内, 与原子跃迁谱线对应。法拉第激光器在光频标、激光冷却等方面具有广阔的应用前景。早在2014年, 北京大学的W. Zhuang等人 [35], 基于法拉第激光实现了主动光频标, 获得其拍频线宽为281 Hz。随着法拉第激光相关科学与技术的发展, 将会在更多重要领域发挥更重要的作用, 为理论创新、技术创新以及应用创新等提供重要支撑。

目前, 法拉第激光器因其优异的性能及巨大的应用潜力, 在飞速发展中取得了一系列重要的进步, 但仍存在一些研究难点, 例如: 精确获得FADOF在激光器内部形成谐振腔时的透射谱、避免FADOF内原子退极化对法拉第激光器性能的影响, 实现大功率、窄线宽、单纵模的法拉第激光等。随着研究的深入, 上述难点将会迎刃而解。法拉第激光器在未来的发展中, 交叉融合将扮演重要角色, 基于法拉第激光器的性能特点, 将其与精密光谱学、冷原子物理相结合的研究将成为未来法拉第激光的重要研究方向。

参考文献

- [1] FARADAY M. On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1846, 136: 1-20.
- [2] FARADAY M. Experimental researches in electricity. nineteenth series [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1846(136): 1-20.
- [3] TYNDALL J. Faraday as a discoverer [M]. D. Appleton, 1868.
- [4] 李国峰.《法拉第日记》中有关“磁致旋光”内容的研究[D]. 内蒙古: 内蒙古师范大学, 2006.
LI G F. The research on contents of magnetic-optic rotation in Faraday's Diary [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Normal University, 2006. (in Chinese)
- [5] SCHATZ P N, MCCAFFERY A J. The faraday effect [J]. Quarterly Reviews, Chemical Society, 1969, 23 (4): 552-584.
- [6] CROWTHER J A. The life and discoveries of Michael Faraday [M]. Society for promoting Christian knowledge, 1918.
- [7] MAXWELL J C. On physical lines of force [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1861, 21(141): 338-348.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] DICK D J, SHAY T M. Ultrahigh-noise rejection optical filter [J]. Optics letters, 1991, 16(11): 867-869.
- [10] MENDERS J, BENSON K, BLOOM S H, et al. Ultranarrow line filtering using a Cs Faraday filter at 852 nm [J]. Optics letters, 1991, 16(11): 846-848.
- [11] YIN B, SHAY T M. Faraday anomalous dispersion optical filter for the Cs 455 nm transition [J]. IEEE photonics technology letters, 1992, 4(5): 488-490.
- [12] 熊俊宇. 原子滤光器中的关键技术研究 [D]. 北京: 北京大学, 2018.
XIONG J Y. Research on the key technology of the atomic optical filter [D]. Beijing: Peking University, 2018. (in Chinese)
- [13] BECKERS J M. Narrow band filters based on magneto-optical effects [J]. Applied Optics, 1970, 9(3): 595-599.
- [14] OHAMN 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 Obs. Ann, 1956, 19(4): 9-11.
- [15] BLOEMBERGEN N. Solid state infrared quantum counters [J]. Physical Review Letters, 1959, 2(3): 84.
- [16] WEBER J. Maser noise considerations [J]. Physical Review, 1957, 108(3): 537.
- [17] GELBWACHS J, KLEIN C, WESSEL J. Infrared detection by an atomic vapor quantum counter [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1978, 14(2): 77-79.
- [18] 郭弘, 党安红, 韩耀强, 等. Faraday反常色散滤光器 [J]. 科学通报, 2010, 55 (7): 527-533.
GUO H, DANG A H, HAN Y Q, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. Chinese Science Bulletin, 55(7), 527-533. (in Chinese)
- [19] MARLING J B, NILSEN J, WEST L C, et al. An ultrahigh-Q isotropically sensitive optical filter employing atomic resonance transitions [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(2): 610-614.
- [20] 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.
- [21] ENDO T, YABUZAKI T, KITANO M, et al. Frequency-locking of a CW dye laser to the center of the sodium D lines by a Faraday filter [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1977, 13(10): 866-871.
- [22] ENDO T, YABUZAKI T, KITANO M, et al. Frequency-locking of a CW dye laser to absorption lines of neon by a Faraday filter [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1978, 14(12): 977-982.
- [23] AGNELLI G, CACCIANI A, FOFI M. The magneto-optical filter I: Preliminary observations in Na D lines [J]. Solar Physics, 1975, 44: 509-518.
- [24] CACCIANI A, FOFI M. The magneto-optical filter I: Velocity field measurements [J]. Solar Physics, 1978, 59: 179-189.
- [25] YE H P. Dispersive magneto-optic filters [J]. Applied Optics, 1982, 21(11): 2069-2075.
- [26] TANG J X, WANG Q J, DUAN M H, et al. Experimental study of a novel free-space optical communication system [J]. Optical Engineering, 1994, 33(11): 3758-3761.
- [27] TANG J X, WANG Q J, LI Y M, et al. Experimental study of a model digital space optical communication system with new quantum devices [J]. Applied Optics, 1995, 34(15): 2619-2622.
- [28] POPESCU A, WALTHER T. On an ESFADOF edge-filter for a range resolved Brillouin-lidar: the high vapor density and high pump intensity regime [J]. Applied Physics B, 2010, 98: 667-675.

- [29] HUANG W T, CHU X H, Williams B P, et al. Na double-edge magneto-optic filter for Na lidar profiling of wind and temperature in the lower atmosphere [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 199–201.
- [30] POPESCU A, WALLDORF D, SCHORSTEIN K, et al. On an excited state Faraday anomalous dispersion optical filter at moderate pump powers for a Brillouin-lidar receiver system [J]. *Optics Communications*, 2006, 264(2): 475–481.
- [31] MIAO X Y, YIN L F, 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): 86106.
- [32] TAO Z M, HONG Y L, 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.
- [33] TAO Z M, ZHANG X G, 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.
- [34] KEAVENEY J, HAMLYN W J, ADAMS C S, et al. A single-mode external cavity diode laser using an intra-cavity atomic Faraday filter with short-term linewidth <400 kHz and long-term stability of <1 MHz [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 95111.
- [35] ZHUANG W, CHEN J. Active Faraday optical frequency standard [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6339–6342.
- [36] ZHANG W, ZHAO Y, WANG S K, et al. Ultranarrow bandwidth Faraday atomic filter approaching natural linewidth based on cold atoms [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(3): 30201.
- [37] GUAN X L, ZHANG W, SHI T T, et al. Cold-atom optical filtering enhanced by optical pumping [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1297.
- [38] 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): 13632.
- [39] SHAN X, SUN X P, LUO J, et al. Free-space quantum key distribution with Rb vapor filters [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19): 191121.
- [40] LIU X F, CHEN X H, YAO X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314–2317.
- [41] SIYUSHEV P, STEIN G, WRACHTRUP J, et al. Molecular photons interfaced with alkali atoms [J]. *Nature*, 2014, 509(7498): 66–70.
- [42] CHANG P Y, SHI H B, MIAO J X, et al. Frequency-stabilized Faraday laser with 10^{-14} short-term instability for atomic clocks [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(14): 141102.
- [43] SHI H B, CHANG P Y, WANG Z Y, 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.
- [44] YIN B, SHAY T M. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(20): 1617–161.
- [45] YIN B, SHAY T M. Faraday anomalous dispersion optical filter for the Cs 455 nm transition [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(5): 488–490.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] CHEN H, SHE C Y, SEARCY P, et al. Sodium-vapor dispersive Faraday filter [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(12): 1019–1021.
- [49] 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*, 1996, 13(9): 1849–1858.
- [50] POPESCU A, WALLDORF D, SCHORSTEIN K, et al. On an excited state Faraday anomalous dispersion optical filter at moderate pump powers for a Brillouin-lidar receiver system [J]. *Optics Communications*, 2006, 264(2): 475–481.
- [51] 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.
- [52] ZIELIŃSKA J A, BEDUINI F A, LUCIVERO V G, et al. Atomic filtering for hybrid continuous-variable/discrete-variable quantum optics [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25307–25317.
- [53] ZENTILE M A, WHITING D J, KEAVENEY J, et al. Atomic Faraday filter with equivalent noise bandwidth less than 1 GHz [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2000–2003.
- [54] ZENTILE M A, KEAVENEY J, MATHEW R S, et al. Optimization of atomic Faraday filters in the presence of homogeneous line broadening [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2015, 48(18): 185001.
- [55] KEAVENEY J, WRATHMALL S A, ADAMS C S, et al. Optimized ultra-narrow atomic bandpass filters via magneto

- optic rotation in an unconstrained geometry [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4272–4275.
- [56] HU Z L, SUN X P, ZENG X Z, et al. Rb 780 nm Faraday anomalous dispersion optical filter in a strong magnetic field [J]. *Optics Communications*, 1993, 101(3–4): 175–178.
- [57] XUE X B, TAO Z M, SUN Q 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.
- [58] DUAN M H, LI Y M, TANG J X, et al. Excited state Faraday anomalous dispersion spectrum of rubidium [J]. *Optics Communications*, 1996, 127(4–6): 210–214.
- [59] SUN Q Q, ZHANG W, LIU Z W, et al. Electrodeless-discharge-vapor-lamp-based Faraday anomalous-dispersion optical filter [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4611–4613.
- [60] JIA X L, ZHANAG Y D, BI Y, et al. Potassium Faraday optical filter in line-center operation at 766 nm [C]// *Instruments for Optics and Optoelectronic Inspection and Control*. SPIE, 2000, 4223: 118–121.
- [61] ZHANG Y D, JIA X L, MA Z G, et al. Optical filtering characteristic of potassium Faraday optical filter [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 372–375.
- [62] PENG Y, ZHANG W, ZHANG L, et al. Analyses of transmission characteristics of Rb, ^{85}Rb and ^{87}Rb Faraday optical filters at 532 nm [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(2): 236–241.
- [63] WANG Y, ZHANG X, WANG D, et al. Cs Faraday optical filter with a single transmission peak resonant with the atomic transition at 455 nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25817–25825.
- [64] SUN Q Q, HONG Y L, 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.
- [65] XIONG J Y, YIN L F, LUO B, et al. Analysis of excited-state Faraday anomalous dispersion optical filter at 1529 nm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14925–14933.
- [66] ZHAO X C, SUN X P, ZHU M H, et al. Atomic filter based on stimulated Raman transition at the rubidium D1 line [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17988–17994.
- [67] XUE X B, PAN D, ZHANG X G, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter at 133 Cs weak 459 nm transition [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 275–278.
- [68] TAO Z M, CHEN M Z, ZHOU Z F, et al. Isotope ^{87}Rb Faraday filter with a single transmission peak resonant with atomic transition at 780 nm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13142–13149.
- [69] LUO B, MA R, JI Q Q, et al. Thermal and temporal characteristics of Faraday anomalous dispersion optical filters based on a hollow cathode lamp [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5372–5375.
- [70] GUAN X L, ZHUANG W, SHI T 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.
- [71] HOLONYAK JR N, BEVACQUA S F. Coherent (visible) light emission from Ga ($\text{As}_{1-x}\text{P}_x$) junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 1962, 1(4): 82–83.
- [72] HALL R N, FENNER G E, KINGSLEY J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions [J]. *Physical Review Letters*, 1962, 9(9): 366.
- [73] NATHAN M I, DUMKE W P, BURNS G, et al. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 1962, 1(3): 62–64.
- [74] SESKO D, FAN C G, WIEMAN C E. Production of a cold atomic vapor using diode-laser cooling [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(6): 1225–1227.
- [75] MCFERRAN J J, LUITEN A N. Fractional frequency instability in the 10^{-14} range with a thermal beam optical frequency reference [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(2): 277–285.
- [76] MAENO T, SAITO H, UMEZU J, et al. Characteristics of a laser diode system for an optically pumped cesium atomic clock [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 1991, 40: 146–148.
- [77] HUANG K K, ZHANG J W, YU D S, et al. Application of electron-shelving detection via 423 nm transition in calcium-beam optical frequency standard [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(12): 3198.
- [78] WIEMAN C E, HOLLBERG L. Using diode lasers for atomic physics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(1): 1–20.
- [79] OHTSU M, ARAKI S. Using a 1.5 μm DFB InGaAsP laser in a passive ring cavity-type fiber gyroscope [J]. *Applied Optics*, 1987, 26(3): 464–470.
- [80] IP E, LAU A, BARROS D, et al. Coherent detection in optical fiber systems [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 753–791.
- [81] PFAU T, HOFFMANN S, PEVELING R, et al. First real-time data recovery for synchronous QPSK transmission with standard DFB lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(18): 1907–1909.
- [82] 崔强, 雷宇鑫, 陈泳屹, 等. 宽调谐窄线宽外腔半导

- 体激光器研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52 (7): 1149–1168.
- CUI Q, LEI Y X, CHEN Y Y, et al. Advances in wide-tuning and narrow-linewidth external-cavity diode lasers[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2022, 52 (7): 1149–1168. (in Chinese)
- [83] VELICHANSKII V L, ZIBROV A S, KARGOPOL'TSEV V S, et al. Minimum line width of an injection laser[J]. Sov. tech. phys. lett, 1978, 4(9).
- [84] FLEMING M, MOORADIAN A. Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(1): 44–59.
- [85] RIEHLE F. Frequency standards: basics and applications [M]. John Wiley & Sons, 2006.
- [86] 花金平, 江毅. 可调谐外腔半导体激光器研究进展[J]. 半导体光电, 2021, 42 (1): 11–19.
- HUA J P, JIANG Y. Recent progress of tunable external cavity diode laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 11–19. (in Chinese)
- [87] ALLARD F, MAKSIMOVIC I, ABGRALL M, et al. Automatic system to control the operation of an extended cavity diode laser [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(1): 54–58.
- [88] BAILLARD X, GAUGUET A, BIZE S, et al. Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers [J]. Optics Communications, 2006, 266(2): 609–613.
- [89] GILOWSKI M, SCHUBERT C, ZAISER M, et al. Narrow bandwidth interference filter-stabilized diode laser systems for the manipulation of neutral atoms [J]. Optics Communications, 2007, 280(2): 443–447.
- [90] GAMBELL A, SIMAKOV N, GANIJA M, et al. Intra-cavity semiconductor laser tuning using a frequency compensating acousto-optic tunable filter pair [C]//AOS Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT) and Australian Conference on Optics, Lasers, and Spectroscopy (ACOLS) 2019. SPIE, 2019, 11200: 116–117.
- [91] MAGDICH L N, CHAMOROVSKIY A Y, SHIDLOVSKY V R, et al. Tunable semiconductor laser with two acousto-optic tunable filters in its external cavity [J]. Quantum Electronics, 2020, 50(2): 136.
- [92] MÉNAGER L, CABARET L, LORGERÉ I, et al. Diode laser extended cavity for broad-range fast ramping[J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1246–1248.
- [93] ALFIERI C G E, WALDBURGER D, NÜRNBERG J, et al. Mode-locking instabilities for high-gain semiconductor disk lasers based on active submonolayer quantum dots [J]. Physical Review Applied, 2018, 10(4): 044015.
- [94] BRODA A, JEŻEWSKI B, SANKOWSKA I, et al. SWIR MECSEL emitting above 1600 nm [C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) X. SPIE, 2020, 11263: 57–62.
- [95] LEE W D, CAMPBELL J C. Optically stabilized $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ laser using magnetically induced birefringence in Rb vapor[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(10): 995–997.
- [96] CYR N, BRETON M, TETU M, et al. Laser-diode frequency control by resonant phase-conjugate reflection from an atomic vapor[J]. Optics letters, 1991, 16(17): 1298–1300.
- [97] DE LABACHELERIE M, CEREZ P. Frequency locking of a 850 nm external-cavity semiconductor laser on a doppler-free Cs-D_2 line [C]//1986 European Conf on Optics, Optical Systems and Applications. SPIE, 1987, 701: 182–185.
- [98] LEE W D, CAMPBELL J C, BRECHA R J, et al. Frequency stabilization of an external-cavity diode laser[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(21): 2181–2183.
- [99] LEE W D, CAMPBELL J C. Narrow-linewidth frequency stabilized $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ laser[J]. Applied Physics Letters, 1992, 60(13): 1544–1546.
- [100] DUCLOY M, BLOCH D. Theory of degenerate four-wave mixing in resonant Doppler-broadened systems-I. Angular dependence of intensity and lineshape of phase-conjugate emission[J]. Journal De Physique, 1981, 42 (5): 711–721.
- [101] DAHMANI B, HOLLBERG L, DRULLINGER R. Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback [J]. Optics Letters, 1987, 12 (11): 876–878.
- [102] LI H, TELLE H R. Efficient frequency noise reduction of GaAlAs semiconductor lasers by optical feedback from an external high-finesse resonator [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(3): 257–264.
- [103] 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.
- [104] SHEVY Y, IANNELLI J, KITCHING J, et al. Self-quenching of the semiconductor laser linewidth below the Schawlow-Townes limit by using optical feedback [J]. Optics Letters, 1992, 17(9): 661–663.
- [105] 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.
- [106] KITCHING J, SHEVY Y, IANNELLI J, et al. Measurements of $1/f$ frequency noise reduction in semiconductor

- lasers using optical feedback with dispersive loss [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1526–1532.
- [107] IANNELLI J M, SHEVY Y, KITCHING J, et al. Linewidth reduction and frequency stabilization of semiconductor lasers using dispersive losses in an atomic vapor [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(5): 1253–1261.
- [108] SHEVY Y, KITCHING J, YARIV A. Linewidth reduction and frequency stabilization of a semiconductor laser with a combination of FM sideband locking and optical feedback[J]. Optics Letters, 1993, 18(13): 1071–1073.
- [109] KITCHING J, BOYD R, YARIV A, et al. Amplitude noise reduction in semiconductor lasers with weak, dispersive optical feedback [J]. Optics Letters, 1994, 19(17): 1331–1333.
- [110] KITCHING J, YARIV A, SHEVY Y. Room temperature generation of amplitude squeezed light from a semiconductor laser with weak optical feedback[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(17): 3372.
- [111] MACHIDA S, YAMAMOTO Y, ITAYA Y. Observation of amplitude squeezing in a constant-current-driven semiconductor laser[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(10): 1000.
- [112] 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 Electronica Sinica, 1997, 25(2): 79–82. (in Chinese)
- [113] 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): 15–18.
- 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): 15–18. (in Chinese)
- [114] ZHANG X G, TAO Z M, ZHU C W, et al. An all-optical locking of a semiconductor laser to the atomic resonance line with 1 MHz accuracy[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28010–28018.
- [115] ZENTILE M. Applications of the Faraday effect in hot atomic vapours[D]. Durham University, 2015.
- [116] CHANG P Y, PENG H F, ZHANG S N, et al. A Faraday laser lasing on Rb 1529 nm transition[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8995.
- [117] 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.
- [118] CHANG P Y, CHEN Y L, SHANG H S, et al. A Faraday laser operating on Cs 852 nm transition[J]. Applied Physics B, 2019, 125(12): 230.
- [119] SHI T T, GUAN X L, CHANG P Y, et al. A dual-frequency Faraday laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 1–11.
- [120] TANG H, ZHAO H Z, WANG R, et al. 18 W ultra-narrow diode laser absolutely locked to the Rb D2 line[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38728–38736.
- [121] TANG H, ZHAO H Z, 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.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 王志洋(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超高稳定度法拉第激光器。



通讯作者: 史田田(1993—), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为主动光钟、法拉第激光器、超稳激光源。