

文章编号: 1001-3806(2024)06-0771-06

## 基于保偏布喇格光栅的窄线宽半导体激光器

陈加齐<sup>1,2</sup>, 陈超<sup>1\*</sup>, 孙晶晶<sup>1,2</sup>, 张建伟<sup>1</sup>, 刘朝晖<sup>1,2</sup>, 赵佳欣<sup>3</sup>, 杜明远<sup>3</sup>,  
李向尚<sup>4</sup>, 秦莉<sup>1</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033, 中国; 2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049, 中国; 3. 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012, 中国; 4. 长春理工大学 物理学院, 长春 130013, 中国)

**摘要:** 为了研制面向量子精密测量应用的近红外波段光纤光栅外腔半导体激光器, 采用独立设计的高偏振依赖增益芯片和双折射光纤布喇格光栅, 通过法布里-珀罗等效谐振腔模型, 系统分析了光栅反射率、外腔和芯片长度对激光线宽的影响。结果表明, 所研制激光器实现了 54.46 mW 的输出功率、58.88 dB 的边模抑制比和 24.46 dB 的偏振消光比, 利用延迟自外差拍频方法测得的洛伦兹线宽低至 2.69 kHz。此研究为独立设计制备分立器件的单频窄线宽外腔半导体激光器提供参考, 有望应用于雷达成像、陀螺仪、磁力仪和原子钟等量子精密测量领域。

**关键词:** 激光器; 窄线宽; 延迟自外差拍频; 量子精密测量

中图分类号: TN248.4; TN256 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.001

## Narrow linewidth semiconductor laser based on polarization maintaining Bragg grating

CHEN Jiaqi<sup>1,2</sup>, CHEN Chao<sup>1\*</sup>, SUN Jingjing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianwei<sup>1</sup>, LIU Zhaohui<sup>1,2</sup>, ZHAO Jiaxin<sup>3</sup>,  
DU Mingyuan<sup>3</sup>, LI Xiangshang<sup>4</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, NING Yongqiang<sup>1</sup>, WANG Lijun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China; 4. College of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China)

**Abstract:** In order to develop a near-infrared band fiber grating external cavity semiconductor laser for quantum precision measurement applications, a high polarization dependent gain chip and a birefringent fiber Bragg grating were designed independently, the effects of grating reflectivity, external cavity, and chip length on laser linewidth were systematically analyzed based on the Fabry-Pérot equivalent resonant cavity model. The results show that the developed laser achieves an output power of 54.46 mW, a side mode suppression ratio of 58.88 dB, and a polarization extinction ratio of 24.46 dB. The Lorentz linewidth measured is 2.69 kHz by delayed self-heterodyne beat frequency method. This study provides a reference for the single frequency narrow linewidth external cavity semiconductor lasers with independent design and preparation of discrete devices, and is expected to be used in quantum precision measurement fields such as radar imaging, gyroscopes, magnetometers, and atomic clocks.

**Key words:** lasers; narrow linewidth; self-heterodyne beat frequency; quantum precision measurement

## 0 引言

量子精密测量在国防军事、空间探测、生物医疗和基础科学等领域有着至关重要的意义<sup>[1]</sup>, 将成为雷达成像、精确制导、核磁共振成像和冷原子物质波干涉实

验等领域的关键技术。其中, 原子钟、原子陀螺仪、原子磁强计和原子重力仪等典型量子测量系统是基于单频激光对碱金属原子的抽运和量子态操纵<sup>[2]</sup>, 表征时间基准<sup>[3]</sup>、磁场<sup>[4]</sup>、重力<sup>[5]</sup>等物理量。这些应用所需激光集中在近红外波段, 如对应 Rb D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 线的 795 nm 和 780 nm 以及对应 Cs D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 线的 894 nm 和 852 nm。上述原子的精细能级跃迁与探测对激光线宽有着苛刻的性能要求<sup>[6]</sup>, 兼具窄线宽、结构紧凑优势的窄线宽半导体激光器成为量子精密测量光源的首选<sup>[7]</sup>。

目前, 光纤<sup>[8]</sup>和固体<sup>[9]</sup>激光器容易实现千赫兹量

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62374164; 62090060); 吉林省科技发展基金资助项目(20220201063GX); 长春市科技发展计划资助项目(22SH01)

\* 通信作者: chenc@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-03-19

级的线宽输出,但难以直接实现原子跃迁和探测所需激光波长,需采用倍频或和频方法。GaAs 基半导体激光器则可以直接实现近红外波段的激光输出,其中,单片集成<sup>[10]</sup>激光器因谐振腔长度较短影响其光子寿命,而涉及百纳米精度光刻和2次外延技术的复杂光栅制备限制其大规模生产和应用。基于 littrow 和 littman 结构的外腔半导体激光器<sup>[11-12]</sup> (external cavity semiconductor laser, ECSL) 具有波长控制灵活和窄线宽的优势,但调节复杂度和有限的机械稳定性,容易因为振动导致波长失谐。基于布喇格光栅的波导滤波器 ECSL,因其简单、稳定的谐振腔结构易于实现窄线宽、低噪声等特性,其中光纤布喇格光栅<sup>[13-14]</sup> (fiber Bragg grating, FBG) 是理想的 ECSL 选频滤波器件,其与半导体增益芯片构建的 FBG-ECSL 具有优异的性能。分立器件的独立设计易于波长的灵活选择和激光器的批量制备。随着飞秒激光刻写技术的不断发展,近红外波段 FBG 的制备工艺得到显著提升。

现有 FBG-ECSL 主要集中在 1550 nm 和 1310 nm 等通信波段<sup>[15-16]</sup>,目前报道的 1550 nm 激光器已经实现千赫兹量级的线宽<sup>[15]</sup>,这充分证明了 FBG 结构的潜力。但在面向量子精密测量应用的近红外波段激光器鲜有报道,这种激光器线宽的本质与腔内载流子涨落引起的光场幅值与频率波动有关<sup>[17]</sup>,而这种波动来源于自发辐射光子与腔内模式竞争所导致的,包括横电 (transverse-electric, TE) 模与横磁 (transverse-magnetic, TM) 模、谐振腔模式与芯片内腔模式之间的竞争。

本文作者研制了一种基于保偏 FBG 和压应变量子阱增益芯片的近红外波段单频窄线宽 ECSL。与传统体全息布喇格光栅、闪耀光栅和滤波器结构的 ECSL 相比,本文中的激光器更加紧凑、集成度更高。基于法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 等效谐振腔模型开展分立器件的设计优化,激光器实现了窄线宽、线偏振的激光输出。本文中作者证明了一种结构紧凑、工艺灵活、可批量制备的单频窄线宽半导体激光器的研制方法,为其在雷达成像、陀螺仪、磁力仪和原子钟等高精度测量领域的大规模应用铺平道路。

## 1 激光器结构

### 1.1 选频工作原理

本文中演示的 ECSL 工作原理如图 1a 所示。包括脊波导增益芯片和保偏布喇格光栅,二者被固定在热电制冷器上进行热管理。激光器被封装成标准 14-PIN 蝶形封装激光器。谐振腔形成在增益芯片高反射率端面和布喇格光栅的等效中心之间。增益芯片采用

压应变量子阱,基于晶格失配引入应变以提高 TE 模式与 TM 模式的模式增益差。线偏振输出是来自双折射 FBG 的正交偏振本征模式选择和外腔注入光反馈<sup>[18]</sup>,如图 1b 所示,为增益芯片的放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 谱和光栅反射谱。图中, $R_0$  和  $R_1$  是增益芯片增透 (anti-reflection, AR) 和高反涂层端面的反射率; $R_B$  和  $L_B$  是布喇格光栅的反射率和长度; $C_0$  是增益芯片与布喇格光栅之间的耦合效率; $L_{GC}$  和  $L_{ext}$  是增益 (gain chip, GC) 芯片和外腔的腔长; $L_d$  是等效谐振腔的长度; $R_{eff}$  是等效反射率。

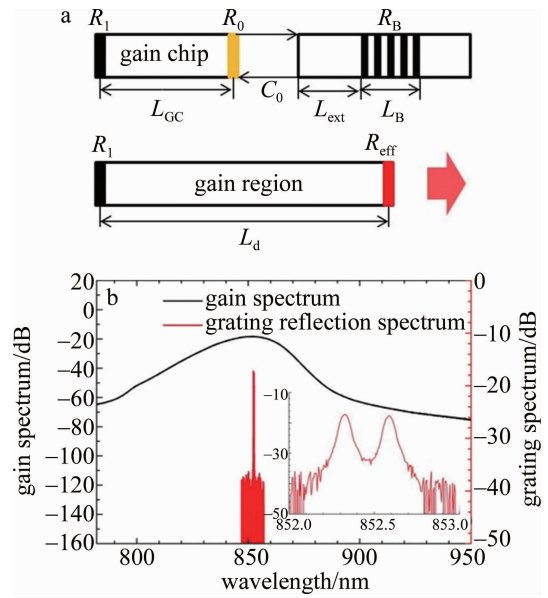


图 1 a—激光器工作原理示意图 b—增益芯片 ASE 谱和光栅反射谱  
Fig. 1 a—schematic of the working principle for the laser b—ASE spectrum of the gain chip and grating reflection spectrum, the inset is the reflection spectrum peak

### 1.2 等效谐振腔模型

本文中提出的激光器结构可等效为一个有源区和一个无源外腔的组合<sup>[14]</sup>,线宽与光子寿命  $\tau_p$  成反比,而  $\tau_p$  则与等效谐振腔的长度  $L_d$  和等效反射率  $R_{eff}$  有关, $R_{eff}$  体现了增益芯片 AR 端面与外腔的共同作用<sup>[19]</sup>:

$$R_{eff} = \frac{R_0^2 + C_0^2 R_B^2 + 2C_0 R_B R_0 \cos(\omega\tau_e - \theta_{ref})}{1 + C_0^2 R_B^2 R_0^2 + 2C_0 R_B R_0 \cos(\omega\tau_e \theta_{ref})} \quad (1)$$

式中: $\omega$  为角速度; $\tau_e$  是渡越时间; $\theta_{ref}$  是反射光的相位系数。 $R_{eff}$  主要取决于布喇格光栅反射率,而激光线宽涉及到光子寿命、反馈延时等因素,因此将谐振腔看作模式间隔固定的孤立激光器<sup>[20]</sup>,模式间隔为:

$$\Delta\nu = \frac{R_s(1 + \alpha^2)}{P} \left( \frac{n_{GC} L_{GC}}{n_{GC} L_{GC} + n_{ext} L_{ext}} \right) \quad (2)$$

式中: $n_{GC}$  和  $n_{ext}$  是增益芯片和外腔的有效折射率; $R_s$  是自发发射速率; $\alpha$  是线宽增强因子。输出功率  $P$  和

注入电流  $I$  之间的关系可以表示为<sup>[19]</sup>：

$$P = (I - I_{th}) / [q\Gamma\varepsilon\nu_g(N - N_0)] \quad (3)$$

式中： $q$  是电荷量； $\Gamma$  是约束因子； $\varepsilon$  是差分增益； $\nu_g$  是群速度； $I_{th}$  是阈值电流； $N$  是载流子密度； $N_0$  是阈值载流子密度。

图 2 显示了光栅反射率  $R_B$ 、外腔长度  $L_{ext}$  和增益芯片长度  $L_{GC}$  对线宽特性的影响。在其它参数恒定时，激光线宽随注入电流的增加而减小，这是因为激光器激励后的自发发射状态将逐渐趋于稳定。高反射率布喇格光栅将减小谐振腔内的光场波动<sup>[17]</sup>，外腔长度与光子寿命直接相关，而增益芯片的长度决定了有源区的体积并制约阈值电流和本征吸收损耗，延长外腔与缩短芯片是压窄线宽的直接手段。上述分析过程可以指导分立器件的参数设计，但在激光器整体的实际设计制备过程中要综合考虑激光输出功率、器件耦合封装以及芯片光刻工艺等因素。

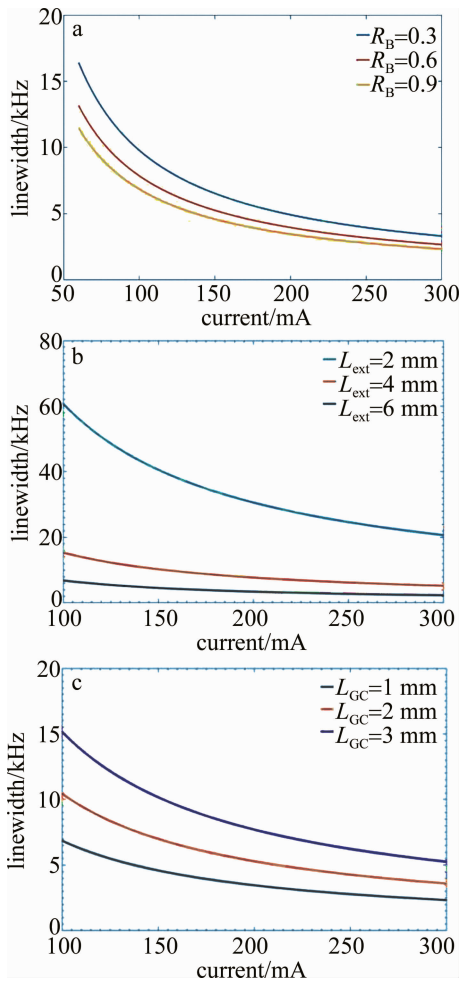


图 2 光栅反射率、外腔长度和增益芯片长度与激光线宽的数值关系  
Fig. 2 Numerical relationship between grating reflectivity, external cavity length, gain chip length and the laser linewidth

### 1.3 器件设计制备

双折射布喇格光栅是采用飞秒激光逐点刻写技术

在保偏光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) (Corning, PM780) 中制备的<sup>[21]</sup>，所研制的 3 阶保偏光栅长度  $L_B = 6.00$  mm。图 1b 中黑色曲线是增益芯片的 ASE 谱，红色曲线为布喇格光栅反射谱，TE 和 TM 模式峰值波长分别为 852.330 nm 和 852.585 nm，对应双折射值  $\Delta n = 1.448 \times 10^{-4}$  ( $\Delta n = \Delta\lambda_{eff, TM-TE} / 2\Lambda$ )，其中， $\Delta\lambda_{eff, TM-TE}$  表示两个模式的波长差， $\Lambda$  表示光栅周期。较大的波长差有利于增强偏振模式的增益差，并实现高偏振消光比 (polarization extinction ratio, PER) 激光器。光栅的边模抑制比 (side-mode suppression ratio, SMSR) 分别为 20.633 dB 和 20.250 dB，如图 1b 中的插图所示。布喇格光栅的高 SMSR 有助于提升 ECSL 的单模特性。

增益介质采用自研的 1.50 mm 腔长 ( $L_{GC}$ ) GaAs 量子阱增益芯片<sup>[22]</sup>，通过脊型弯曲波导结构<sup>[23]</sup> 满足单模截止条件，并确保单横模输出。双沟槽能够减小驱动电流横向扩散，降低阈值。输出端面附近波导具有 7° 倾角，并在增益芯片的两侧输出端面分别镀有高反/增透涂层，以降低增益芯片内腔模式对等效谐振腔选频的影响。

通过线性偏振控制器和可调光纤到光纤耦合器表征增益芯片的偏振特性<sup>[24]</sup>，如图 3a 所示。图中， $L_1$  和

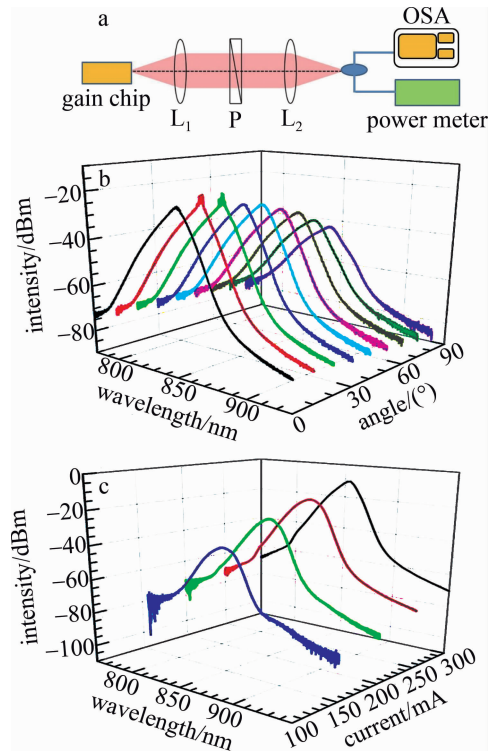


图 3 a—增益芯片的偏振特性测量系统 b,c—不同偏振角、不同注入电流下的 ASE 谱  
Fig. 3 a—measurement system of the polarization characteristic for the gain chip b,c—ASE spectra at different polarization angles and different injection currents

$L_2$  是透镜,  $P$  是线性偏振器。图 3b 和图 3c 显示了增益芯片在不同偏振角和注入电流下的 ASE 谱。这些结果表明量子阱增益芯片自身也具有一定的偏振特性, 从 TM 模式到 TE 模式的极化变化而引起的 ASE 峰的运动, 是由于有源区量子阱的压应变效应<sup>[25]</sup>。基于半导体材料的晶格失配和应变之间的关系, 压应变使价带中的重空穴带高于轻空穴带。第一导带和第一重空穴带之间的载流子复合占主导地位, 增益芯片的 TE 偏振模式占优。这更有利于光栅对 TE 模式的选择, 实现更大的模式增益差, 提高整个激光器的 PER。

## 2 激光器性能表征

### 2.1 光电特性

图 4 和图 5 所示的激光光谱和功率-电流-电压 ( $P-I-V$ ) 特性表明了所研制的蝶形封装激光器的典型光电特性。注入电流和温度分别由超低噪声电流源和热电温度控制器控制, 并采用高分辨率光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA) 和功率计测量激光光谱和输出功率, 波长分辨率设定为 20 pm。

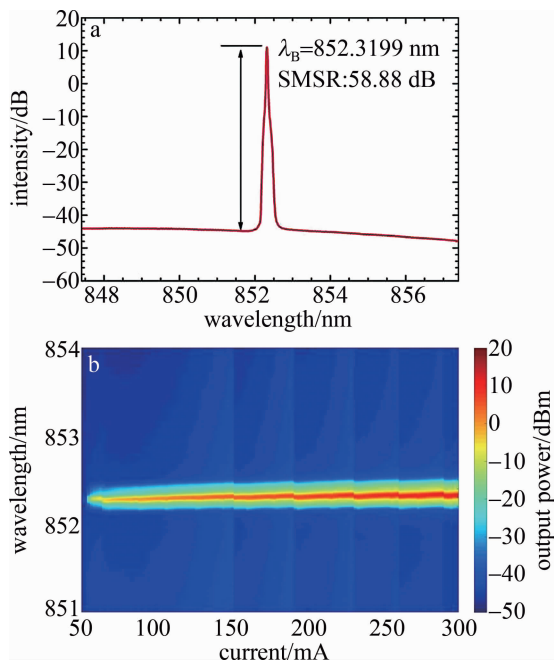


图 4 a—注入电流为 300 mA 时的激光光谱 b—激光光谱作为注入电流函数的彩色喷射图

Fig. 4 a—laser spectrum at the injection current of 300 mA b—color jet plot of the laser spectra as a function of the injection currents

图 4a 显示了 300 mA 的激光光谱, 激光器在布喇格波长  $\lambda_B = 852.3199$  nm 时实现了 58.88 dB 的 SMSR。激光器要实现高 SMSR, 除了与布喇格光栅的高 SMSR 相关, 还与前述增益芯片 AR 涂层对其内腔模式的有效抑制有关。图 4b 显示了在 50 mA ~ 300 mA 的恒定室温 (25°C) 下激光光谱作为注入电流

函数的彩色喷射图, 可以清晰地观察到激光器始终保持单纵模和单横模激光输出, 在下文基于延迟自外差拍频的线宽表征中, 拍频功率谱也仅显示单频的频率成分。

图 5 呈现了与图 4 相对应的 SMSR 和激光波长随注入电流增加的变化情况以及激光器的  $P-I-V$  特性。阈值电流在 54 mA 附近, 最大输出功率 54.46 mW, 对应的斜率效率 0.22 W/A。激光波长蓝移与功率降低的扭结对应模式跳变, 这是由于注入电流增加导致增益芯片温度升高, 过程中伴随着有源区折射率的变化, 改变了谐振腔内的相位。其根本原因是等效腔模式与布喇格谐振模式失谐以及芯片内腔模式与 FBG 外腔模式之间相互竞争所产生的非线性作用。

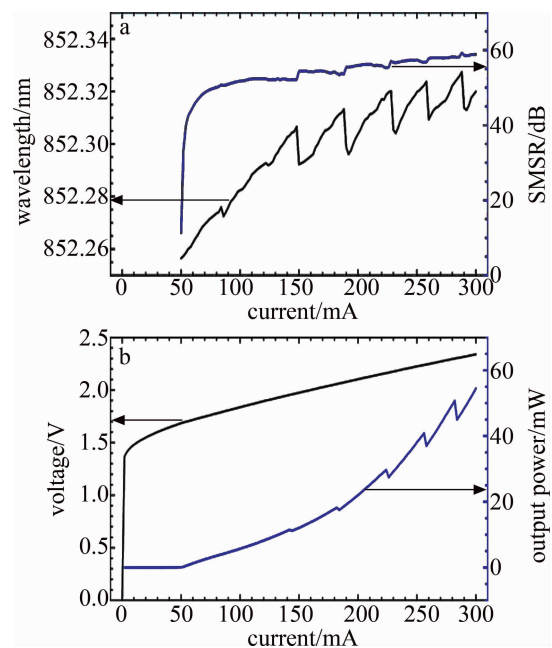


图 5 a—激光波长、SMSR 作为注入电流函数的情况 b—激光器的  $P-I-V$  特性

Fig. 5 a—variation of the laser wavelength and the SMSR with the injection current b— $P-I-V$  characteristics of the laser

### 2.2 偏振特性

激光器的偏振特性表征采用与增益芯片相同的方法, 如图 3a 所示。图 6a 是 300 mA 下输出功率和偏振角度的极坐标图。0°和 90°分别为 TE 模式和 TM 模式输出, 对应的输出功率为 40.71 mW 和 0.1457 mW, PER 值  $r_{PER} = 24.46$  dB ( $r_{PER} = 10 \lg(P_{TE}/P_{TM})$ ,  $T_{TE}$  和  $T_{TM}$  是 TE 和 TM 模式的输出功率)。图 6b 和图 6c 分别是 TE 和 TM 模式的激光光谱。曲线的起伏可能来源于光经过偏振控制器时的干涉效应,  $\lambda_{TE}$  和  $\lambda_{TM}$  是指 TE 和 TM 模式的激光波长。注入电流的增加导致增益芯片具有更大的增益, 产生更高的模式增益差, TE 模式的功率转换效率高于 TM 模式, 对应的 PER 也将

随注入电流增加而增加。高 PER 除了与双折射布喇格光栅的偏振依赖特性相关外,还与光栅对增益芯片的主偏振模式选择有关。

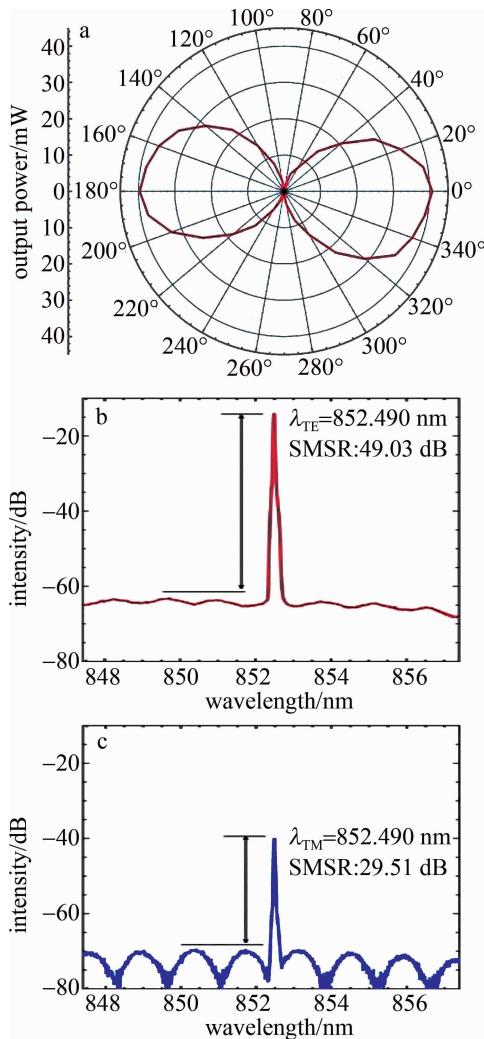


图 6 a—输出功率与偏振角关系 b,c—TE 模式和 TM 模式的激光光谱

Fig. 6 a—relationship between output power and polarization angle b,c—laser spectra of TE mode and TM mode

### 2.3 线宽特性

激光器的线宽特性表征采用延时自外差法<sup>[26]</sup>,测量装置如图 7a 所示。被测激光经光隔离器(isolator, ISO)后被 90/10 耦合器  $C_1$  分束,10% 的光经声光调制器(acoustic optical modulator, AOM),产生 80 MHz 的频移。90% 的光由 20 km 光纤和法拉第旋转镜(Faraday rotating mirror, FRM)进行 0.20 ms 的时延,再通过环形器(circulator, CIR)注入合束器  $C_2$ 。移频降低了零频附近电子、振动和其它环境因素所引起的技术噪声对拍频的影响。FRM 与 CIR 的组合可以实现 2 倍于光纤长度的延时,并减小光纤中的热扰动和机械扰动对激光偏振态的影响<sup>[27]</sup>。合束后由光电探测器

(photodetector, PD)进行光电转换,再通过电频谱分析仪(electrical spectrum analyzer, ESA)获得拍频功率谱。

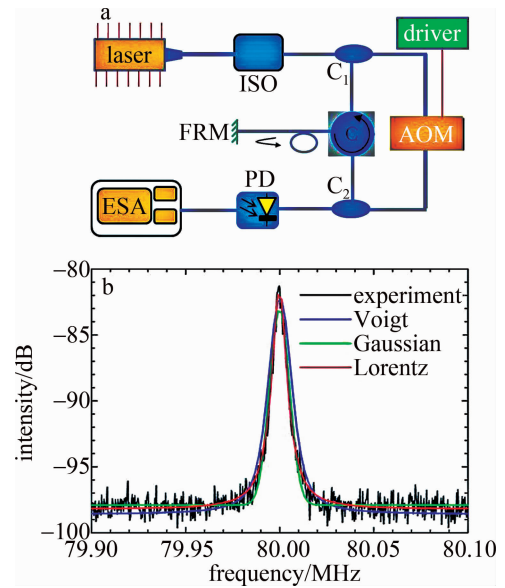


图 7 a—延时自外差线宽测量系统 b—拍频功率谱及拟合曲线  
Fig. 7 a—linewidth measurement system of the delay self-heterodyne b—beat frequency power spectrum and fitting curves

注入电流为 300 mA 时的拍频功率谱曲线及其拟合曲线如图 7b 所示。图中的红色、绿色和蓝色细线分别对应 Lorentz、Gaussian 和 Voigt 拟合曲线。Voigt 拟合是白噪声相关的 Lorentz 谱和  $1/f$  噪声相关的 Gaussian 谱的卷积<sup>[28]</sup>,是在延迟光纤过长情况下减小  $1/f$  噪声对线宽测量影响的常用拟合曲线。本文中采用 FRM 与 CIR 的组合减小了相同光程所需一半长度的延迟光纤,减小了  $1/f$  噪声带来的频谱展宽,测量的拍频功率谱与 Lorentz 拟合曲线更为契合,是典型的 Lorentz 线型。通过读取 Lorentz 拟合曲线的 3 dB 带宽作为拍频测量结果,线宽最小值为 2.69 kHz。拍频功率谱显示的单频频率成分,印证了前述激光光谱的单频输出状态。在后续工作中,作者将开展对单频激光频率稳定性、相位噪声与相对强度噪声的研究,以实现更为充分的线宽压窄和噪声抑制。

### 3 结论

本文中报道了一种基于保偏光纤布喇格光栅的近红外波段窄线宽 ECSL。基于 F-P 等效谐振腔模型开展高偏振依赖增益芯片和双折射布喇格光栅的设计优化,实现了一种结构紧凑、工艺灵活、可批量制备的单频窄线宽半导体激光器的研制方法。利用延迟自外差拍频方法测得的洛伦兹线宽低至 2.69 kHz。此外 ECSL 实现了 54.46 mW 的最大输出功率、58.88 dB 的

SMSR 和 24.46 dB 的 PER。该激光器研制方法能够扩展到其它碱金属原子抽运所需的近红外波段,拓展其在量子精密测量领域的应用范围。

### 参 考 文 献

- [1] XU Q, SHEN S, XIE X M, *et al.* Quantum optical techniques for laser detection and ranging[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(1): 44-47 (in Chinese).  
徐强, 沈思, 谢修敏, 等. 可用于激光雷达的量子光学技术[J]. *激光技术*, 2021, 45(1): 44-47.
- [2] 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): 1561006.
- [3] CHOU C W, HUME D B, ROSENBERG T, *et al.* Optical clocks and relativity[J]. *Science*, 2010, 329(5999): 1630-1633.
- [4] LUVSANDAMIN E, SPIEBERGER S, SCHIEMANGK M, *et al.* Development of narrow linewidth, micro-integrated extended cavity diode lasers for quantum optics experiments in space[J]. *Applied Physics*, 2013, B111(2): 255-260.
- [5] LUDLOW A D, ZCLCVINSKY T, CAMPBELL G K, *et al.* Sr lattice clock at  $1 \times 10^{-16}$  fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805-1808.
- [6] HUMMON M T, KANG S, BOPP D G, *et al.* Photonic chip for laser stabilization to an atomic vapor with  $10^{-11}$  instability[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 443-449.
- [7] ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.* Development and future of vertical cavity surface emitting lasers operated at high temperatures (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251201 (in Chinese).  
张建伟, 宁永强, 张星, 等. 高温工作垂直腔面发射半导体激光器现状与未来(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251201.
- [8] HE X K, HOU H, FENG L T, *et al.* Experimental study of 1550 nm single frequency pulsed fiber laser amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 145-148 (in Chinese).  
何幸锴, 侯辉, 冯力天, 等. 1550 nm 单频脉冲光纤激光放大器实验研究[J]. *激光技术*, 2011, 35(2): 145-148.
- [9] FABIAN M, NICOLE K, BENNO W. Stabilized laser system at 1550 nm wavelength for future gravitational-wave detectors [J]. *Physical Review*, 2022, D105(12): 122004.
- [10] KRAKOWSKIA M, MEGHNAGIA M, AFUSO-ROXOA P, *et al.* Modulated DFB-ridge laser diodes at 894 nm for compact Cesium CPT atomic clocks[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2023, 12440: 1244004.
- [11] JIMENEZ A, MILDE T, STAACKE N, *et al.* Narrow-line external cavity diode laser micro-packaging in the NIR and MIR spectral range[J]. *Applied Physics*, 2017, B123(7): 1-14.
- [12] YIM S, KIM T, CHOI J. A simple extended-cavity diode laser using a precision mirror mount [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(4): 046102.
- [13] GUO T H, WANG Y F, YU G L. Selection and analysis of theoretical model of fiber Bragg grating external cavity laser diode[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 225-230 (in Chinese).  
郭天华, 汪岳峰, 于广礼. 光纤光栅外腔半导体激光器理论模型分析与选取[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 225-230.
- [14] WANG Zh Y, CHEN Ch, SHAN X N, *et al.* Simulation of noise characteristics of fiber grating external cavity lasers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011401 (in Chinese).  
王直圆, 陈超, 单肖楠, 等. 光纤光栅外腔半导体激光器噪声特性仿真[J]. *激光与光电子进展*, 2017, 54(1): 011401.
- [15] ZHANG L, WEI F, SUN G W, *et al.* Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 385-388.
- [16] PAUL A. MORTON, MICHAEL J M. High-power, ultra-low noise hybrid lasers for microwave photonics and optical sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(21): 5048-5057.
- [17] HISHAM H K, ABAS A F, MAHDIRAJI G A, *et al.* Improving the characteristics of the modulation response for fiber Bragg grating Fabry-Perot lasers by optimizing model parameters[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(6): 1698-1705.
- [18] HAO L, WANG X, JIA K, *et al.* Narrow-linewidth single-polarization fiber laser using non-polarization optics [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3769-3772.
- [19] LUO X C, CHEN C, NING Y Q, *et al.* Single polarization, narrow linewidth hybrid laser based on selective polarization mode feedback [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 154: 108340.
- [20] HENRY C H. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(2): 259-264.
- [21] MALINAUSKAS M, ŽUKAUSKAS A, HADEGAWA S, *et al.* Ultrafast laser processing of materials: from science to industry [J]. *Light: Sciences and Applications*, 2016, 5(8): e16133.
- [22] XU H W, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* Temperature stability of InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs and GaAs quantum-wells for 852 nm laser diode[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(6): 640-646 (in Chinese).  
徐华伟, 宁永强, 曾玉刚, 等. 852 nm 半导体激光器 InGaAlAs, InGaAsP, InGaAs 和 GaAs 量子阱的温度稳定性[J]. *发光学报*, 2012, 33(6): 640-646.
- [23] VERMERSCH F J, LIGERET V, BANSROPUN S, *et al.* High-power narrow linewidth distributed feedback lasers with an Aluminum-free active region emitting at 852 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(13): 1145-1147.
- [24] LUO X C, CHEN C, NING Y Q, *et al.* High linear polarization, narrow linewidth hybrid semiconductor laser with an external birefringence waveguide Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33109-33120.
- [25] WANG Y, TAI H, DUAN R, *et al.* Super-gain nanostructure with self-assembled well-wire complex energy-band engineering for high performance of tunable laser diodes [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(9): 1763-1776.
- [26] WANG Z, KE C, ZHONG Y, *et al.* Ultra-narrow-linewidth measurement utilizing dual parameter acquisition through a partially coherent light interference [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8484-8493.
- [27] CANAGASABEY A, MICHIE A, CANNING J, *et al.* A comparison of Michelson and Mach-Zehnder interferometers for laser linewidth measurements [C] // 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim. New York, USA: IEEE Press, 2011: 1392-1394.
- [28] CHEN M, MENG Z, WANG J F, *et al.* Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6803-6808.