

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-10

基于自对准高阶表面光栅的复耦合分布反馈半导体激光器

杨 硕^{1,2}, 胡 淼^{1,2}, 梁 磊^{1,2*}, 张天宇^{1,2}, 宋 悦^{1,2}, 陈泳屹^{2,3},
王玉冰^{1,2}, 雷宇鑫^{1,2}, 邱 橙^{1,2}, 贾 鹏^{1,2}, 秦 莉^{1,2}, 唐 欣^{1,2},
宋俊峰⁴, 王立军^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 光电学院, 北京 100049;

3. 吉林半导体科技有限公司, 长春 130022;

4. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

摘要: 本文提出并实验验证了一种基于自对准高阶表面光栅的 1550 nm 复耦合分布反馈(DFB)半导体激光器。器件采用 InP 基量子阱外延结构, 通过一次刻蚀同时形成脊波导与高阶表面光栅, 实现自对准的有效折射率周期调制, 降低套刻误差, 保证空间一致性, 并利用脊顶的周期性电极窗口实现空间选择性电流注入, 从而在同一谐振腔内同时引入折射率耦合与增益耦合。实验结果表明, 器件的实际脊宽、光栅周期和刻蚀深度分别约为 7.2 μm 、8.1 μm 和 1.52 μm , 实现折射率与增益复耦合, 室温下当注入电流为 720 mA 时, 最大输出功率 62.7 mW, 器件边模抑制比最大可达 42.67 dB。激光波长随电流和温度呈连续红移, 对应的电流调谐系数和温度调谐系数分别约为 9.51 pm/mA 和 0.13 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。上述结果证实, 脊上高阶表面光栅提供的折射率耦合与周期性电极窗口引入的增益耦合在同一谐振腔内协同作用, 显著增强了器件的单纵模稳定性, 避免了二次外延、多次套刻和纳米级光栅加工工艺, 为新型 DFB 激光器研制提供了一种工艺简单、成本低廉的技术路径。

关键词: 自对准; 高阶表面光栅; 复耦合; DFB 激光器; 1550 nm

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260165

CSTR: 32170.14.CJL.20260165

A Complex-Coupled Distributed Feedback Semiconductor Laser Based on Self-Aligned High-Order Surface Gratings

YANG Shuo^{1,2}, HU Miao^{1,2}, LIANG lei^{1,2*}, ZHANG Tianyu^{1,2}, SONG Yue^{1,2}, CHEN Yongyi^{1,2,3},
WANG Yubing^{1,2}, LEI Yuxin^{1,2}, QIU Cheng^{1,2}, JIA Peng^{1,2}, QIN Li^{1,2}, TANG Xin^{1,2},
SONG Junfeng⁴, WANG Lijun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Special Luminescence Science and Technology, 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. Jiguang Semiconductor Technology Co., Ltd., Changchun 130022, China;

4. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Division, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 吉林省科技发展规划(20250601088RC)、国家自然科学基金(62227819, 62535009, 62574201, 62574202)、工信部 2023 年温室气体检测仪表项目(ZTZB-23-990-003)中国工程院战略研究与咨询项目(JL2024-02)以及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所“旭光”和“曙光”人才培养计划

Supported by Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20250601088RC), National Natural Science Foundation of China (62227819, 62535009, 62574201, 62574202), Greenhouse Gas Detection Instrument Project of the Ministry of Industry and Information Technology in 2023 (ZTZB-23-990-003), Strategic Research and Consulting Project of the Chinese Academy of Engineering (JL2024-02), and "Sunlight" and "Dawn" talent training plan of Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences.

Abstract: A 1550 nm complex-coupled distributed feedback (DFB) semiconductor laser based on a self-aligned high-order surface grating is proposed and experimentally demonstrated. The device is based on an InP multiple-quantum-well epitaxial structure, where the ridge waveguide and high-order surface grating are defined simultaneously in a single etching step, enabling self-aligned periodic effective-index modulation with reduced overlay error and improved spatial registration. By introducing periodic electrode windows on the ridge top for spatially selective current injection, index coupling and gain coupling are simultaneously established within the same resonant cavity. The fabricated device exhibits an actual ridge width of approximately 7.2 μm , a grating period of approximately 8.1 μm , and an etch depth of approximately 1.52 μm . Under room-temperature operation, a maximum output power of 62.7 mW is obtained at an injection current of 720 mA, and the maximum side-mode suppression ratio reaches 42.67 dB. The lasing wavelength shows continuous redshifts with increasing injection current and temperature, with tuning coefficients of approximately 9.51 pm/mA and 0.13 nm/ $^{\circ}\text{C}$, respectively. These results verify the synergistic effect of index coupling from the ridge-top high-order surface grating and gain coupling from the periodic electrode windows, which enhances the single-longitudinal-mode stability of the device. The proposed design avoids regrowth, multiple lithographic alignment steps, and nanoscale grating fabrication, offering a simple and low-cost approach for realizing complex-coupled DFB semiconductor lasers.

Keywords: self-aligned; high-order surface grating; complex coupling; distributed feedback laser; 1550 nm

1 引 言

1550 nm 波段处于石英光纤低损耗窗口并具有较高的人眼安全阈值,而在光纤通信^[1]、相干探测^[25]、激光雷达^[2]、集成光子学^[3]及气体检测^[4-6,26]等领域应用广泛。随着上述应用系统向集成化、芯片化和低成本方向发展,1550 nm 单频光源不仅需要满足输出功率和目标波长要求,还需要在稳定单纵模输出、高边模抑制比、波长稳定性和器件一致性等方面具备更高性能。分布反馈(DFB)半导体激光器^[20-21]能够在芯片内部同时实现反馈与选模,因此是 1550 nm 波段单频光源的主流实现方案^[7]。

在 1550 nm 波段,传统 DFB 激光器借助相移光栅、采样布拉格光栅或侧向光栅等来定义波长和选择纵模^[8-9],并已在多波长阵列和光互连光源中展示出良好的波长控制能力^[10-11];高阶表面光栅也被用于简化 O 波段阵列器件的制备^[12]。但从工艺角度看,传统掩埋式布拉格光栅或再生长型 DFB 激光器虽然具有明确的反馈机制和良好的模式稳定性,却严重依赖高精度光栅制备和二次外延工艺,制程复杂、成品率低、成本较高,且对外延与刻蚀均匀性要求极为苛刻。当器件进一步走向低成本制造和多通道集成时,这一路线的局限性会更加突出。并且折射率耦合 DFB 虽然设计成熟,但在自然解理端面条件下仍存在模式简并和端面相位敏感性问题^[14]。纯增益耦合^[18]DFB 通过

沿腔长方向建立周期性增益或损耗调制来扩大主模与边模之间的增益差,从机理上可实现单纵模激射^[15-17],但其结构实现困难,边模抑制比较低,且易实现多纵模激射,对工艺控制要求很高。

为此,本文提出一种基于自对准高阶表面光栅的 1550 nm 复耦合 DFB 半导体激光器,当腔内折射率调制与增益调制同时存在时,器件耦合系数可表示为复数形式,器件进入复耦合工作状态^[13]。该结构的工艺优势主要体现在:脊波导与高阶表面光栅由同一次图形转移和刻蚀过程形成,可降低套刻误差,并保证光栅调制区与波导传输区的空间一致性;高阶表面光栅采用微米量级周期,可避免纳米级一阶布拉格光栅加工和二次外延工艺,有利于降低制备难度和工艺成本。在此基础上,周期性电极窗口实现空间选择性载流子注入,使器件在同一谐振腔内协同建立折射率与增益复耦合。相较于单一耦合机制,复耦合既保留了布拉格反馈能力,又增强了纵模选择能力,从而为以简化工艺实现稳定单纵模输出提供了新的设计方案。

2 原 理

本文研制的 1550 nm 波段 InP 基复合耦合 DFB 半导体激光器结构示意图如图 1 所示,采用边发射脊波导结构,腔长为 1 mm,芯片宽度为 0.5 mm,脊宽设计为 7 μm ,脊波导两侧设置深刻蚀隔离沟槽,总宽度为 100 μm 。高阶表面光栅直接位

于脊型波导上,沿整个腔长方向连续分布,光栅周期为 $8\ \mu\text{m}$,占空比为 50%。同时,在每个光栅周期中心设置一个 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的周期性电极窗口,窗口外区域由 SiO_2 绝缘层隔离。其中器件参数的选取:光栅周期由高阶布拉格条件、 $1550\ \text{nm}$ 工作波长以及波导有效折射率共同确定; $7\ \mu\text{m}$ 脊宽主要用于兼顾横向模式约束、欧姆接触面积和输出功率; $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 周期性电极窗口设置在每个光栅周期中心,用于在不破坏整体脊波导导光结构的前提下建立沿腔长方向的周期性载流子注入。

本文所采用的外延片为 InP 基多量子阱结构,其结构组成如表 1 所示。外延结构自下而上包括衬底层、n 型缓冲层、n 型波导层、多量子阱有源区、p 型波导层、p 型限制层、和电极接触层。该外延设计兼顾了 $1550\ \text{nm}$ 波段增益实现、纵向光场限制以及后续脊波导与表面光栅加工需求,为复合耦合 DFB 激光器的实现提供了材料基础。

表 1 外延片结构参数

Tab. 1 The structural parameters of epitaxial wafer

Material	Thickness (μm)	Dopant	Doping concentration (cm^{-3})
InGaAs	0.18	Zn	2×10^{19}
InGaAsP	0.09	Zn	$8 \times 10^{17} \sim 3 \times 10^{18}$
InP	3.10	Zn	$3 \times 10^{17} \sim 1.5 \times 10^{18}$
InAlAs	0.05	/	/
MQW	0.074	/	/
InAlAs	0.05	Si	2×10^{17}
InP	1.30	Si	1×10^{18}
InGaAsP	0.37	Si	8×10^{17}
InP	0.50	Si	1×10^{18}
InP Sub	350	Si	1×10^{18}

从工作机理上看,DFB 激光器通过沿腔长方向引入周期性扰动,使得光的前向传播与后向传播满足布拉格耦合条件并形成分布反馈。对于本文结构,脊上高阶表面光栅改变了波导上边界的几何轮廓,使导模有效折射率沿腔长方向周期性变化,从而形成折射率耦合;周期性电极窗口则通过空间电流选择性注入,使量子阱有源区中的载流子浓度和材料增益在窗口区与绝缘区之间呈现周期性起伏,从而形成增益耦合。由此,器件中的反馈不再是单一折射率光栅反馈作用,而是由折射率调制和增益调制共同作用下的复耦合反馈机制。对应的布拉格条件可写为

$$m\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, λ_B 为布拉格波长, n_{eff} 为模式有效折射率, Λ 为光栅周期, m 为光栅阶次。由于本文采用高阶

表面光栅结构,因此反馈波长由模式有效折射率与微米量级光栅周期共同决定,这也是该器件能够避免纳米级一阶光栅^[12]加工的重要结构特点,极大降低了器件的工艺加工难度。

当折射率调制与增益调制同时存在时,器件耦合系数应写成复数形式^[13]

$$\kappa = \kappa_r + i\kappa_i \quad (2)$$

其中, κ_r 对应折射率耦合分量, κ_i 对应增益耦合分量。结合本文器件结构,复合耦合系数可进一步表示为^[19]

$$\kappa = k_0 \Gamma \Delta n \frac{\sin(l\pi L_g / \Lambda)}{l\pi} + i \frac{\Gamma' \Delta g}{4} \quad (3)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空波数, Γ 为光栅调制区域的光学限制因子, Δn 为脊顶表面光栅引起的有效折射率调制幅度, L_g 为光栅刻蚀深度, l 为光栅阶次, Γ' 为有源区光学限制因子, Δg 为周期性增益调制幅度。由式(3)可见, κ_r 主要决定器件的布拉格反馈强度, κ_i 主要决定主模与边模之间的增益差;前者对应结构中的高阶表面光栅,后者对应周期性窗口注入所建立的增益起伏。

器件表面光栅周期与电流注入周期均为 $8\ \mu\text{m}$,且注入窗口位于每个周期的中心位置,如图 1 所示,因此折射率耦合与增益耦合作用于同一空间频率。这样,主模在满足布拉格反馈条件的同时,还可获得相对于边模更大的净增益差,从而提高纵模选择能力和单纵模输出的稳定性。需要指出的是,复耦合并不是简单追求 κ_r 和 κ_i 越大越好。若 κ_r 过大,可能引入更强的表面散射和附加损耗;若 κ_i 过强,则可能导致模式不稳定或高电流注入下多纵模激射。因此,设计中需要使两类耦合在空间周期和作用强度上保持合理匹配,从而在自然

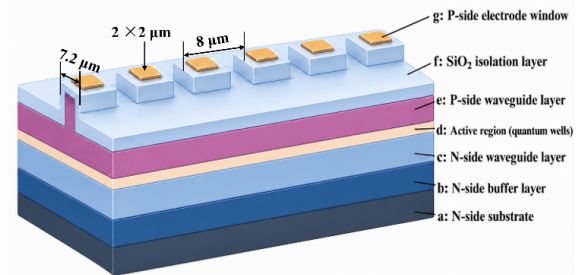


图 1 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure

解理面条件下仍获得较好的单峰输出特性。

为进一步说明脊宽参数的设计依据,本文在无光栅扰动条件下对固定脊高为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时的脊波导横向单模截止条件进行了仿真计算,如图2所示。随着脊宽增大,波导归一化参数 V 逐渐升高。当 V 超过单模截止值 3.14 后,波导可能支持高阶横向模式。仿真结果表明,固定脊高为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时,对应的单模截止脊宽约为 $7.50\ \mu\text{m}$ 。该结果为本文脊波导尺寸选取提供了横向模式设计依据。事实上,单模截止条件决定脊宽上限,而输出功率、电流扩展、侧壁损耗、光栅有效作用面积和工艺容差决定脊宽不能过低。因此综合考虑后设计脊宽为 $7\ \mu\text{m}$ 。

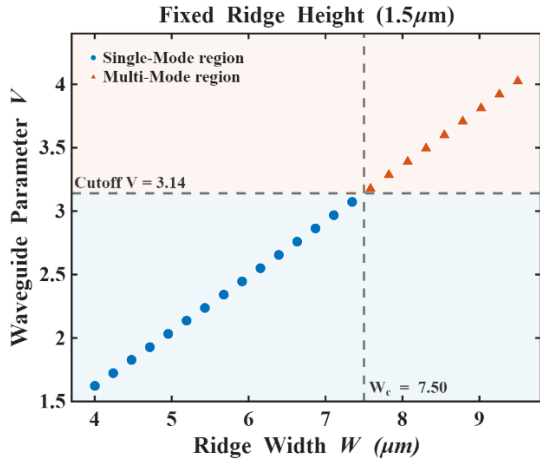


图2 固定脊高为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时脊宽对波导归一化参数 V 的影响及横向单模截止条件

Fig. 2 Dependence of the waveguide parameter V on ridge width at a fixed ridge height of $1.5\ \mu\text{m}$ and the corresponding lateral single-mode cutoff condition.

为了进一步阐明电注入下的空间载流子分布,使用光电协同仿真平台 SimuPics 3D 进行了系统的数值分析。图3是在两个光栅周期 ($\Lambda=8\ \mu\text{m}$) 上,当蚀刻深度 L_g 从 $1200\ \text{nm}$ 变化到 $1500\ \text{nm}$ 时,有源区中的模拟空穴浓度分布。

仿真结果表明,周期性 p 型电极下方的空穴浓度显著高于非注入区域,并沿谐振腔方向形成了稳定的周期性调制。在连续两个周期范围内,空穴浓度分布可以较好地用正弦函数进行拟合,说明周期性电流注入能够建立稳定的空间载流子调制。随着 L_g 的增大,绝缘沟槽对载流子横向和纵向扩散的限制作用进一步增强,从而促进载流子在注入区域内积累。如图3(b)所示,当沟槽刻蚀深度达到 1500nm 时, p 侧电流扩展受到更加明显的抑制,使

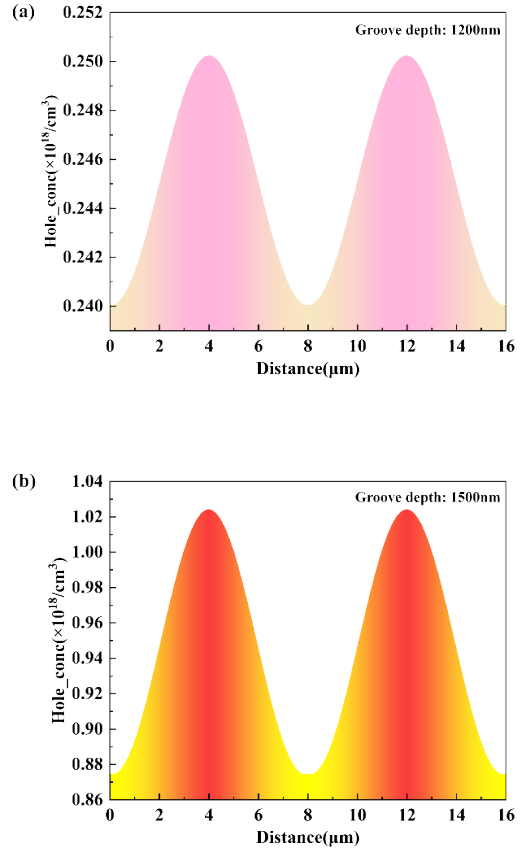


图3 不同光栅刻蚀深度下空穴浓度的变化曲线及其对应的拟合函数:(a) 1200nm , (b) 1500nm

Fig. 3 Hole-concentration profiles and the corresponding fitting functions at different grating etch depths: (a) 1200 nm and (b) 1500 nm .

注入电流更有效地集中在电极窗口下方。因此,有源区内的峰值空穴浓度和调制深度均显著提高,其中峰值空穴浓度达到 $1.025 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 。

随着 L_g 从 $800\ \text{nm}$ 增加到 $1800\ \text{nm}$,有源区内归一化光场强度沿谐振腔方向的变化如图4所示。由于载流子分布受到周期性调制,光场强度呈现出与注入图形相同空间周期的周期性振荡,并且强度峰值与注入窗口区域具有良好对应关系。当刻蚀深度达到 $1500\ \text{nm}$ 时,光场调制深度明显增大。该现象与图3中观察到的载流子调制幅度增强相一致,表明周期性电流注入、载流子调制以及光场重新分布之间存在明确的耦合响应关系。

为进一步确认周期性注入对有源区增益的调制作用,仿真 $1500\ \text{nm}$ 刻蚀深度下多量子阱区域的增益分布如图5所示。在量子阱位置均出现与注入周期一致的增益高值区,增益峰值集中在窗

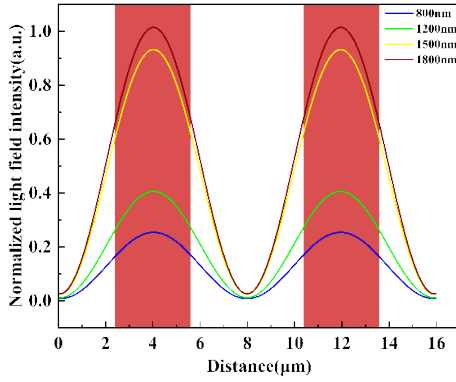


图4 不同光栅刻蚀深度下有源区内归一化光场强度变化。
Fig. 4 Normalized optical-field intensity in the active region as a function of grating etch depth.

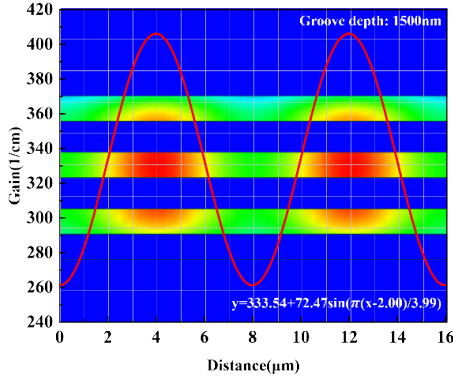


图5 周期性电流注入条件下 MQW 有源区内的仿真增益分布及增益调制拟合曲线
Fig. 5 Simulated gain distribution and fitted gain-modulation curve in the MQW active region under periodic current injection.

口中心附近,表明载流子主要在周期性电极窗口下方积累。对增益调制轮廓做正弦函数拟合得到 $y=333.54+72.47\sin(\pi(x-2.00)/3.99)$, 拟合曲线与仿真分布吻合良好,进一步证明周期性电流注入能够在有源区内建立稳定的增益调制。

综合考虑光场限制、载流子调制深度以及整体耦合强度之间的权衡,本文选取 $L_g = 1500 \text{ nm}$ 作为后续器件制备与实验测试的主要工艺参数。

3 实验

3.1 器件制备工艺

根据上文提出的器件结构,采用两次光刻即可完成器件制备。首先在外延片表面采用 PECVD 沉积 400 nm 厚 SiO_2 作为硬掩膜层,经第一次光刻同时定义脊波导和脊上高阶表面光栅图形;显影后先刻蚀 SiO_2 ,再利用 ICP 对 InP 层进行 1500 nm 深刻蚀,从而同时完成脊波导与表面光栅的刻蚀。随后去除残余 SiO_2 ,并再次沉积 300 nm 厚 SiO_2 绝缘层。经第二次光刻后,在每个 $8 \mu\text{m}$ 周期中心定义出 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的电极窗口,以构建沿腔长方向的周期性注入结构。之后采用磁控溅射沉积 p 侧 Ti/Pt/Au 金属电极;将样品减薄至 $130 \sim 150 \mu\text{m}$ 后,在背面沉积 Au/Ge/Ni/Au 形成 n 侧电极,并通过快速热退火改善欧姆接触。最后完成解理、镀膜、贴热沉和金丝键合。该工艺流程避免了二次外延和纳米级光栅加工,使脊波导、表面光栅与周期性注入窗口能够在两次光刻定义中完成,从而实现复耦合结构的制备。器件制备的工艺流程如图 6 所示。

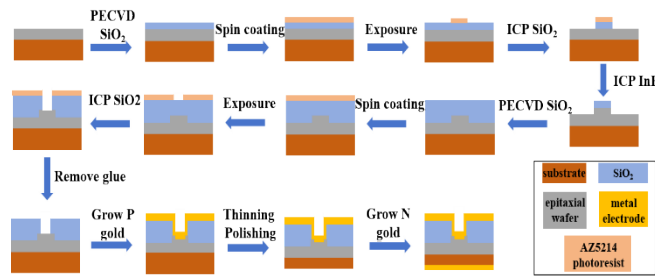


图6 器件制备工艺流程图

Fig. 6 Fabrication flow of the proposed device

器件制备完成后,首先通过扫描电子显微镜 (SEM) 进行结构表征,图 7-8 分别为腔面和沿脊波导方向的截面 SEM 照片。结果表明,脊上周期结构沿腔长方向分布均匀,脊波导轮廓清晰,两侧槽区边界明确,未见明显塌陷或断裂。由 SEM 测

得,器件实际脊宽约为 $7.2 \mu\text{m}$,光栅周期约为 $8.1 \mu\text{m}$,刻蚀深度约为 $1.52 \mu\text{m}$,均与设计值基本一致。这说明本文提出的一步形成脊与高阶表面光栅、二次定义周期性注入窗口的工艺路线能够稳定实现。

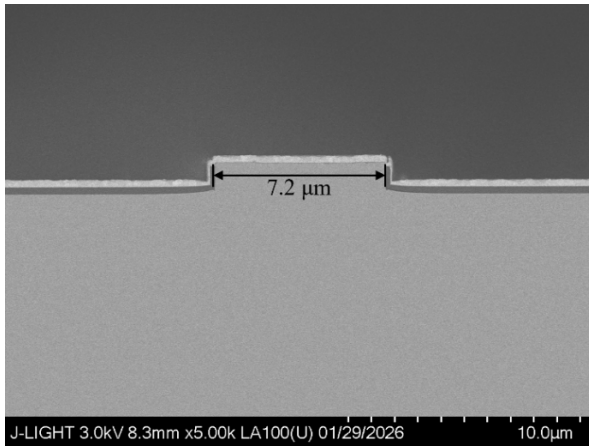


图7 激光器腔面SEM照片

Fig. 7 SEM image of the laser facet

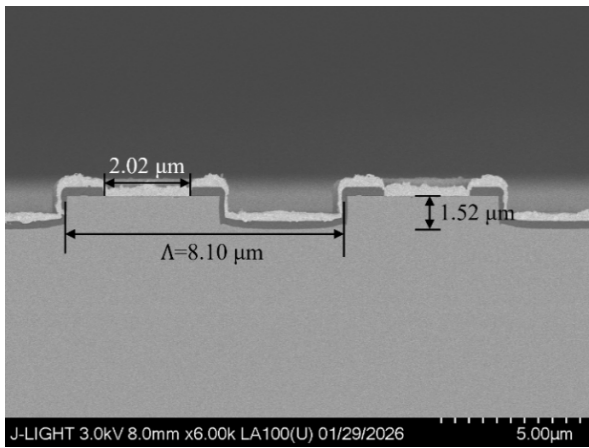


图8 激光器沿脊波导方向的截面SEM照片

Fig. 8 Cross-sectional SEM image of the laser along the ridge-waveguide

3.2 器件P-I-V测试

在20℃条件下,测试该器件在连续工作条件下的PIV特性如图9所示。随着注入电流的增加,输出功率在达到阈值电流120 mA后持续增

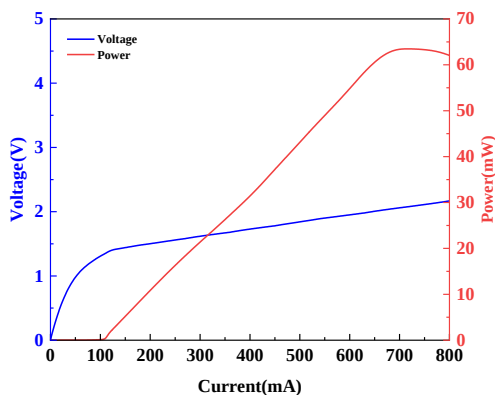


图9 器件的PIV特性曲线

Fig. 9 PIV characteristic curve of the device

加,当输入电流为0.72 A时,最高输出功率为62.7 mW,进一步增大电流,输出功率出现饱和,说明高注入条件下器件内部热积累、载流子泄漏以及非辐射复合效应开始增强。整体曲线较平滑且无明显拐折,表明器件电注入路径和欧姆接触较为稳定,也说明周期性窗口注入并未破坏基本电流传输特性。

3.3 器件光谱测试

在相同条件下,测试器件在不同注入电流下的输出光谱。如图10所示,随着电流增加,器件始终保持单峰输出,未出现明显的多峰竞争和剧烈跳模。继续增加电流,激光波长持续向长波方向漂移,器件表现出稳定的电流调谐特性。这种红移主要来源于电流注入增强所引起的结温升高、材料增益谱漂移以及有效折射率变化。

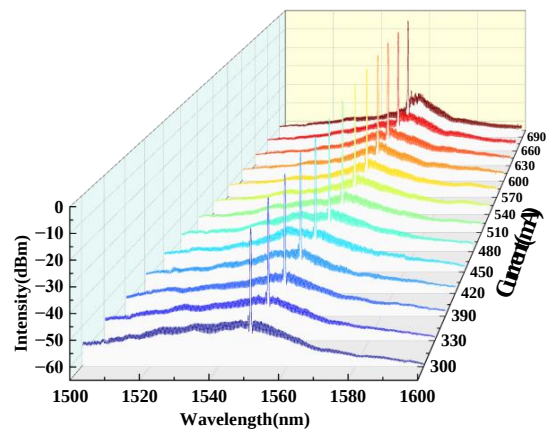


图10 不同注入电流下的输出光谱

Fig. 10 Emission spectra under different injection currents

在注入电流为550 mA时,激光器在不同温度下的输出光谱如图11所示。随着温度由16℃升高至36℃,器件激光波长由1548.91 nm连续漂移至1551.50 nm,且未出现明显的跳模现象。这说明本文设计的复合耦合结构不仅能够保证单纵模输出,而且在一定温度扰动下仍具有较好的模式稳定性。温度升高所导致的光谱红移主要与材料带隙收缩和模式有效折射率变化有关,而器件在整个温区内未出现明显失稳,表明复合耦合反馈作用能够在一定程度上抑制温度扰动所带来的模式竞争。

图12和图13分别展示了输出波长随电流和温度的变化关系。从图12可以看出,输出波长随注入电流连续红移,在测试区间内由1549.7 nm漂移至1552.8 nm;对图12中的波长-电流数据进

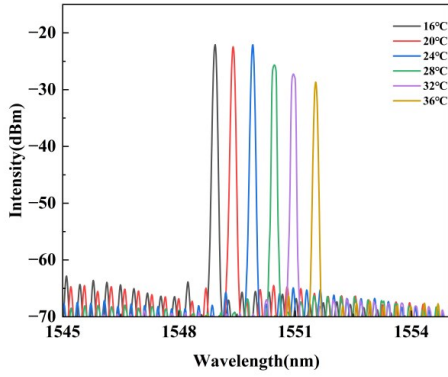


图 11 不同温度下的输出光谱

Fig. 11 Emission spectra under different temperatures

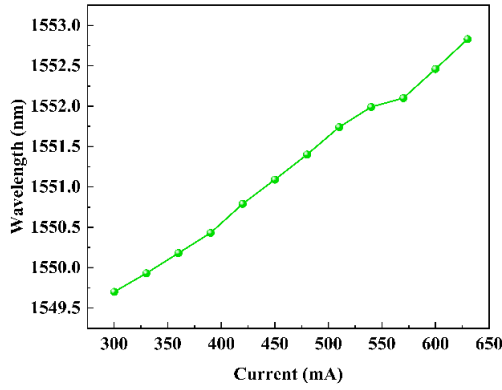


图 12 输出波长随电流的变化关系

Fig. 12 The relationship between output wavelength and current variation

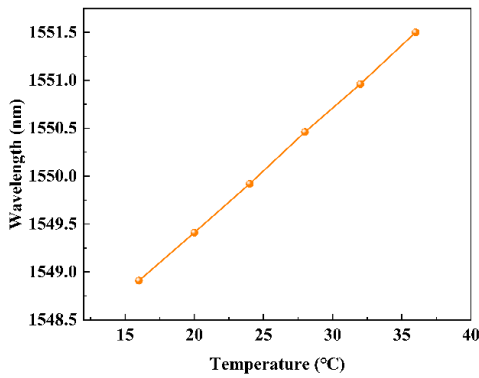


图 13 输出波长随温度的变化关系

Fig. 13 The relationship between output wavelength and temperature variation

行线性拟合,得到电流调谐系数为 9.51 pm/mA , 拟合优度 $R^2=0.9965$,说明器件输出波长与注入电流之间具有良好的线性响应关系。温度调谐如

图 13 所示,波长-温度关系近似线性,温度调谐系数为 $0.13 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

为了更直观地比较器件在电流和温度调谐条件下的单模稳定性,图 14 展示了 SMSR 随电流和温度的变化关系。在电流扫描范围内,器件的 SMSR 保持在 $38\sim 43 \text{ dB}$ 之间,并在 570 mA 时,边模抑制比最大达到 42.67 dB ,说明该工作区间内折射率耦合与增益耦合之间具有良好的匹配关系。随着注入电流继续增大, SMSR 略有下降,表明高电流注入条件下热效应增强和增益饱和开始削弱主模相对于边模的增益差优势。相比之下,温度调谐条件下的 SMSR 维持在 $33\sim 42 \text{ dB}$ 之间,在接近室温附近 SMSR 最高,温度继续升高 SMSR 逐渐下降。这说明器件在室温附近具有良好的模式稳定性,而在高温条件下有源区增益分布、有效折射率和自然解理端面反馈之间的平衡关系受到扰动,减小了主模与边模之间的阈值差。

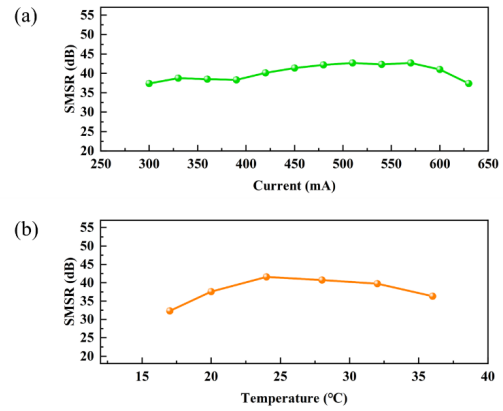


图 14 SMSR 随电流(a)和温度(b)变化关系

Fig. 14 SMSR as a function of current and temperature

3.4 器件光斑测试

为表征器件光束质量,测试了器件的近场光斑,如图 15 所示。可以看出,该器件呈现出规则的单峰椭圆近场分布,中心能量高度集中,未观察到明显的模式分裂,表明腔内模式受到了良好限制。由中心线剖面提取的 X 和 Y 方向半高全宽分别为 $7.71 \mu\text{m}$ 和 $4.34 \mu\text{m}$,其中, X 方向对应慢轴方向; Y 方向对应快轴方向。远场测试得到器件慢轴和快轴发散角分别为 9.46° 和 21.27° ,与近场光斑的椭圆分布特征一致上述结果表明,该器件在实现稳定单纵模输出的同时,具有较好的模式约束和空间输出质量。

从测试结果可以看出,器件实现了较好的单纵模输出,在电流调谐和温度调谐过程中未出现

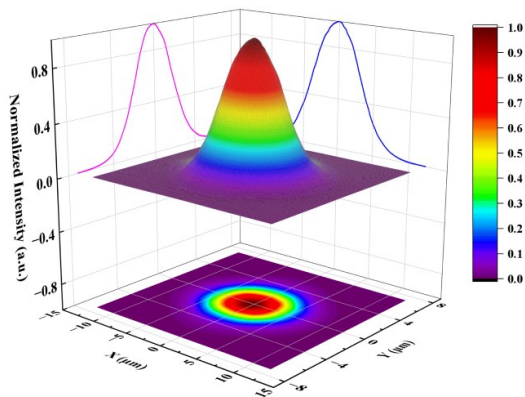


图15 器件近场光斑分布

Fig. 15 Near-field intensity distribution of the device

明显跳模, SMSR在工作区间保持较高水平, 器件同时具备较好的横向模式约束和空间输出质量。

为进一步比较本文器件的综合性能, 表2对比了近年来1550 nm波段DFB激光器的典型结果。

表2 1550 nm 附近 DFB 激光器性能对比

Tab. 2 Performance comparison of DFB lasers around 1550 nm

年份	中心波长(nm)	器件类型	功率(mW)	SMSR(dB)	工艺特点
2022 ^[22]	1560	啁啾光栅	>4	>42	百纳米级
		折射率耦合			≥5次光刻
2023 ^[23]	1550	取样光栅	>14	>50	百纳米级
		折射率耦合			≥5次光刻
2024 ^[28]	1563	高阶狭槽光栅	10.2	39.3	微米级
		增益耦合			≥3次光刻
2019 ^[24]	1550	高阶表面光栅	4.2	48	百纳米级
		折射率耦合			≥4次光刻
本文	1550	高阶表面光栅 复耦合	62.7	42.67	微米级 2次光刻

4 结 论

本文展示了一种基于自对准高阶表面光栅的1550 nm复耦合DFB半导体激光器。该器件通过脊上高阶表面光栅引入有效折射率周期调制,并借助周期性电极窗口建立增益周期调制,从而在谐振腔内形成复耦合反馈作用。实验结果表明,器件在电流和温度调谐条件下均保持稳定的单纵模输出,在20℃、工作电流720 mA时,最大输出功率为62.7 mW;在570 mA时,边模抑制比最大达到42.67 dB。输出波长随电流和温度连续红

移,对应调谐系数分别约为 9.51×10^{-3} nm/mA和 0.13 nm/℃。实验结果表明,折射率调制与增益调制的协同作用能够在简化工艺条件下有效增强纵模选择能力并提高单模输出稳定性。本文验证了自对准高阶表面光栅复耦合技术在1550 nm波段的可实现性,为无需二次外延的单纵模DFB激光器研制提供了一种低成本高可靠技术方案。后续将通过外延结构优化、腔长和端面反射条件优化等进一步提升激光器的性能。未来,该结构可进一步结合微转印技术与硅基光子平台实现异质集成^[27],为片上集成单频光源提供新的实现路径。

从工艺实现角度看,本文研制的器件仅通过两次光刻即可完成脊波导、高阶表面光栅和周期性电极窗口的定义,避免了二次外延和纳米级一阶光栅制备。相比于其他几种基于折射率耦合^[22-24]的DFB工艺,本文提出的自对准高阶表面光栅复耦合DFB半导体激光器不依赖于百纳米级光栅工艺,而是利用8 μm高阶表面光栅与同周期电极窗口分别建立折射率调制和增益调制,从而在简化的工艺条件下获得高功率单纵模激射。这表明本文提出的复合耦合方案在性能和工艺可实现性之间具有较好的平衡。

移,对应调谐系数分别约为 9.51×10^{-3} nm/mA和 0.13 nm/℃。实验结果表明,折射率调制与增益调制的协同作用能够在简化工艺条件下有效增强纵模选择能力并提高单模输出稳定性。本文验证了自对准高阶表面光栅复耦合技术在1550 nm波段的可实现性,为无需二次外延的单纵模DFB激光器研制提供了一种低成本高可靠技术方案。后续将通过外延结构优化、腔长和端面反射条件优化等进一步提升激光器的性能。未来,该结构可进一步结合微转印技术与硅基光子平台实现异质集成^[27],为片上集成单频光源提供新的实现路径。

参 考 文 献:

- [1] RIZZELLI MARTELLA G, NESPOLA A, STRAULLU S, *et al.* Phase noise impact and scalability of self-homodyne

- short-reach coherent transmission using DFB lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2022, 40(1):37-44.
- [2] POULTON C V, YAACOBI A, COLE D B, *et al.* Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(20):4091-4094.
- [3] JIANG M H, XUE W, HE Q, *et al.* Quantum storage of entangled photons at telecom wavelengths in a crystal [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1):6995.
- [4] HU M, ZHANG T, LI Y, *et al.* Advances in material, structural, and integration strategies for DFB lasers in photonic sensing platforms [J]. *Sci. China Inf. Sci.*, 2026, 69(3):131401.
- [5] QIAO S, HE Y, SUN H, *et al.* Ultra-highly sensitive dual gases detection based on photoacoustic spectroscopy by exploiting a long-wave, high-power, wide-tunable, single-longitudinal-mode solid-state laser [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1):100.
- [6] GAO Q, WANG X, HUANG K, *et al.* Four-channel silicon nitride wavelength beam combiners for multi-gas absorption spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(7):2469-2472.
- [7] KOGELNIK H, SHANK C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, 43(5):2327-2335.
- [8] SUN Y, YUAN B, SUN X, *et al.* DFB laser array based on four phase-shifted sampled Bragg gratings with precise wavelength control [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(23):6237-6240.
- [9] SUN X, LI Z, FAN Y, *et al.* Multi-wavelength DFB laser based on a sidewall third-order four phase-shifted sampled Bragg grating with uniform wavelength spacing [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(3):714-717.
- [10] ZHAO J, SUN Z, ZHANG Y, *et al.* Multi-wavelength DFB laser with high mode stability and uniform spacing for optical I/O technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2024, 42(14):4874-4881.
- [11] FAN Y, SUN Z, ZHANG Y, *et al.* Ultra-wideband matrix DFB laser array based on enhanced self-heating effect [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(3):6304-6318.
- [12] CHEN N, WANG H, CAO P, *et al.* Monolithically integrated four-channel laser array based on high-order surface gratings for O-band CWDM systems [J]. *Appl. Opt.*, 2024, 63(17):4736-4744.
- [13] KAPON E, HARDY A, KATZIR A. The effect of complex coupling coefficients on distributed feedback lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, 18(1):66-71.
- [14] SUSA N. Fluctuations of the laser characteristics and the effect of the index-coupling component in the gain-coupled DFB laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, 33(12):2255-2265.
- [15] GAO F, QIN L, CHEN Y, *et al.* Study of gain-coupled distributed feedback laser based on high order surface gain-coupled gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2018, 410:936-940.
- [16] RUAN C, CHEN Y, GAO F, *et al.* Gain-coupled 770 nm DFB semiconductor laser based on surface grating [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 479:126377.
- [17] LI X, LIANG L, QIN L, *et al.* Development of a high-power surface grating tunable distributed-feedback Bragg semiconductor laser based on gain-coupling effect [J]. *Appl. Sci.*, 2022, 12(9):4498.
- [18] HE M, GAN L, LI H, *et al.* Gain-coupled high-power low-RIN 1.55 μm single-mode DFB lasers with wide ridge waveguide [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2024, 36(10):653-656.
- [19] HU M, LIANG L, MA N, *et al.* A multi-wavelength complex-coupled DFB laser array based on high-order surface gratings for gas sensing applications [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2026, 201:115221.
- [20] ZHANG Y, YANG F, LIU G, *et al.* Experimental demonstration of an easy-to-fabricate 1.3- μm directly modulated DFB laser with improved beam profile [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(10):3094-3101.
- [21] ZHANG N, QIU B, ZOU Y, *et al.* Design and fabrication of 1064-nm high power laterally-coupled DFB semiconductor lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2024, 36(20):1217-1220.
- [22] YANG Z J, SUN Z X, XIAO R L, *et al.* Tunable in-series laser array with duplex distributed feedback sections [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2022, 40(12):3882-3890.
- [23] SUN Z X, WANG Y G, XIAO R L, *et al.* Directly modulated 25 Gbaud/s tunable in-series DFB laser array for WDM systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2023, 21(1):011403.
- [24] AO Y Q, WANG J H, LIU D M, *et al.* Surface-emitting distributed feedback laser based on high-order gratings [J]. *Appl. Opt.*, 2019, 58(20):5443-5449.

- [25] LUKASHCHUK A, YILDIRIM H K, BANCORA A, *et al.* Photonic-electronic integrated circuit-based coherent LiDAR engine [J]. *Nat. Commun.*, 2024,15:3134.
- [26] YANG C, LI Y, CUI Q, *et al.* Narrow-linewidth, high-power, widely-tunable III-V/Si₃N₄ hybrid integrated external cavity laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2025,186:112627.
- [27] YU C, ZHANG M, LIANG L, *et al.* Advancements in transfer printing techniques and their applications in photonic integrated circuits [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025,14:396.
- [28] Guo J, Li H, Xiong X, *et al.* Single-mode InGaAsP/InP BH lasers based on high-order slotted surface gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(2): 286 – 289.



杨硕(2002-),男,黑龙江绥化人,硕士研究生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读,主要从事半导体激光器的研究。

E-mail: yangshuo241@mails.ucas.ac.cn



梁磊(1985-),男,山东日照人,博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,2014年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体光放大器及硅基集成激光器的研究。

E-mail: liangl@ciomp.ac.cn