

文章编号: 1000-7032(2026)07-1259-10

基于硅基氮化硅三微环外腔反馈的 S 波段可调谐窄线宽激光器

李 尧^{1,2}, 梁 磊^{1,2*}, 宋 悦^{1,2}, 陈泳屹^{1,2,3}, 雷宇鑫^{1,2},
贾 鹏^{1,2}, 邱 橙^{1,2}, 王玉冰^{1,2}, 宋俊峰⁴, 胡小龙⁴,
秦 莉^{1,2}, 宁永强^{1,2}, 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, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049;

3. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130022;

4. 吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子全国重点实验室 吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

摘要: 面向调频连续波光学相控阵激光雷达对宽调谐、窄线宽光源的需求, 提出了一种覆盖 S 波段的氮化硅三微环外腔可调谐窄线宽激光器。该设计采用低损耗 Si₃N₄ 波导与 InP 基反射式半导体光放大器混合集成, 通过三微环游标滤波机制实现 88 nm (1 450~1 538 nm) 的宽调谐范围, 并利用长外腔结构与高 Q 值微环将线宽压缩至约 0.89 kHz, 同时结合可调 Sagnac 环形反射镜优化反馈稳定性。仿真结果表明, 该激光器在调谐范围、线宽及边模抑制比等方面均满足调频连续波光学相控阵激光雷达系统对 S 波段光源的要求, 而且其 S 波段输出不仅适配 Ge/Si 探测器的高响应特性, 还可作为现有 C+L 波段光源的频谱补充, 未来通过片上集成可实现 S+C+L 全波段覆盖, 为支持大角度扫描的全固态激光雷达提供高性能、可扩展的光源解决方案。

关 键 词: 集成外腔激光器; 可调谐激光器; 窄线宽; 微环

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260041

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260041

S-band Tunable Narrow-linewidth Laser Based on Silicon Nitride Three-microring External Cavity Feedback

LI Yao^{1,2}, LIANG Lei^{1,2*}, SONG Yue^{1,2}, CHEN Yongyi^{1,2,3}, LEI Yuxin^{1,2}, JIA Peng^{1,2},
QIU Cheng^{1,2}, WANG Yubing^{1,2}, SONG Junfeng⁴, HU Xiaolong⁴, QIN Li^{1,2},
NING Yongqiang^{1,2}, WANG Lijun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of 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 of Integrated Optoelectronics, JLU Region, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Author, E-mail: liangl@ciomp. ac. cn

Abstract: To address the demand for widely tunable, narrow-linewidth light sources in frequency-modulated

收稿日期: 2026-02-03; 修订日期: 2026-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2805100); 国家自然科学基金(62227819, 62535009, 62574201, 62574202); 吉林省科技
发展计划重点研发项目(SKL202302027); 中国工程院战略研究与咨询项目(JL2024-02); 中国科学院长春光学精密
机械与物理研究所“旭光”和“曙光”人才培养计划项目

Supported by National Key R & D Program of China(2023YFB2805100); National Natural Science Foundation of China
(62227819, 62574201, 62574202, 62535009); The Science and Technology Development Project of Jilin Province(SKL202302027);
Strategic Research and Consultation Project of the Chinese Academy of Engineering(JL2024-02); Dawn Talent Training Pro-
gram of CIOMP

continuous-wave (FMCW) optical phased array (OPA) LiDAR, this paper presents an S-band tunable narrow-line-width laser based on a silicon nitride triple-micro-ring external cavity. The design utilizes hybrid integration of low-loss Si_3N_4 waveguides and an InP-based reflective semiconductor optical amplifier. Through a triple-micro-ring vernier filtering mechanism, a broad tuning range of 88 nm (1 450–1 538 nm) is achieved, while a long external cavity structure combined with high- Q micro-rings narrows the linewidth to approximately 0.89 kHz. Feedback stability is further enhanced by incorporating a tunable Sagnac loop reflector. Simulation results confirm that the laser meets key requirements, including tuning range, linewidth, and side-mode suppression ratio, for S-band sources in FMCW OPA LiDAR systems. Moreover, the S-band output not only matches the high responsivity of Ge/Si photodetectors but also spectrally complements existing C- and L-band sources. Future on-chip integration could enable full S+C+L band coverage, offering a high-performance and scalable laser solution for solid-state LiDAR supporting wide-angle beam steering.

Keywords: integrated external cavity laser; tunable laser; narrow-linewidth; microring

1 引 言

全固态光学相控阵(OPA)激光雷达凭借无机机械扫描、高集成度及快速响应等突出优势,正成为自动驾驶、无人机避障、智能机器人等领域的关键传感技术,是目前激光雷达领域的研究热点^[1]。基于OPA的全固态激光雷达需要波长大范围可调谐的光源,激光雷达纵向扫描角度与光源的波长调谐范围密切相关^[2-3]。比如,要实现 15° 的扫描角需要100 nm的激光波长调谐范围,对于 20° 扫描角度,调谐范围需大于140 nm^[4]。同时,在调频连续波(FMCW)体制中,距离-速度解算精度依赖于激光线宽,窄线宽特性可有效抑制相干噪声,从而保障高精度的测距分辨率^[5]。

目前,C波段与L波段的硅基可调谐激光器已相对成熟^[6],但其调谐范围常受限于增益介质带宽,较难以满足OPA对大角度扫描的需求^[7-9]。而S波段同属人眼安全波段,且该波段在Ge/Si探测器响应曲线中具有高的响应度^[10],有利于提升探测灵敏度,结合C+L波段^[11-14]可以实现大范围扫描,因此近年来备受关注。然而,目前针对S波段的硅基可调谐激光器的研究鲜少报道,已报道的C+L波段可调谐激光器存在调谐范围无法完全覆盖S波段(1 460~1 530 nm)的问题,制约了其在OPA激光雷达中的应用。

为此,本文提出一种基于 Si_3N_4 波导与InP增益芯片混合集成的外腔激光器,工作波段覆盖1 450~1 538 nm(覆盖S波段)。设计中采用中心波长1.49 μm 的宽光谱增益芯片和三微环级联的游标滤波结构,结合外腔反馈机制,实现宽调谐、高边模抑制比与窄线宽输出。该方案不仅可单独

作为S波段高性能光源,未来亦可与C/L波段硅基外腔激光器集成,进一步扩展整体波长覆盖范围,通过微转印新型集成方式为全固态OPA-FMCW激光雷达系统提供大范围集成化的光源设计方案。

2 激光器结构设计

2.1 激光器总体设计

图1展示了本文所设计的覆盖S波段的外腔可调谐激光器整体结构示意图。该器件采用RSOA与氮化硅波导芯片混合集成,其中基于InP衬底的反射式半导体光放大器^[14](RSOA)长2.5 mm,输出端波导和端面夹角为 7° 以减小反射,同时镀有抗反射(AR)薄膜,其反射率低至0.01%,而另一端面为高反射(HR)端面(反射率>95%),可以作为激光器的反射腔面,3 dB增益带宽覆盖S波段;氮化硅波导芯片由模斑转换器、级联三微环滤波器、热调相移器和可调环形反射镜组成。

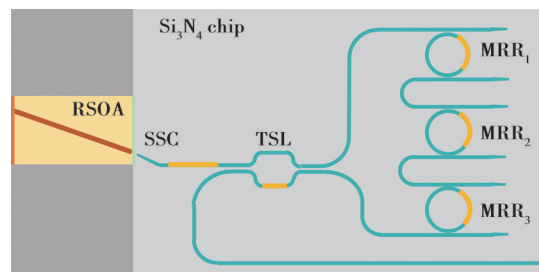


图1 激光器整体结构图

Fig.1 Schematic diagram of the overall laser structure

2.2 Si_3N_4 单模波导设计

外腔激光器的波导结构直接影响输出功率、本征线宽、调谐范围及边模抑制比等关键性能参数。为了在S波段实现低损耗、高模式纯度的光传输,本文选用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 波导体系,其中衬底为

硅(Si),包层为二氧化硅(SiO_2)。该结构融合 Si_3N_4 在中近红外波段的低传播损耗优势与 SiO_2 包层的良好光场限制能力。

基于模式耦合理论,利用Lumerical MODE求解器对波导截面尺寸进行仿真优化,重点分析波导宽度(W)和厚度(H)对有效折射率(n_{eff})及模式分布的影响。鉴于OPA-FMCW激光雷达系统通常以横电(TE)模作为信号传输的主要偏振态,仿真聚焦TE模式特性。当波导厚度固定为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 时,扫描宽度在 $0.5\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的模式变化特性显示,当宽度小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,光场约束能力变弱,导致辐射损耗增加;宽度超过 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 时,出现高阶 TM_1 模,破坏单模传输条件。经过优化,当波导尺寸为 $0.8\text{ }\mu\text{m}\times 0.4\text{ }\mu\text{m}$ 时,有效折射率 $n_{\text{eff}}=1.66$ ($1.45\text{ }\mu\text{m}$ 波段),满足 $1.45 < n_{\text{eff}} < 2.01$ 的单模传输判据,且光场能量集中于 Si_3N_4 芯层,其稳态光场分布如图2所示。

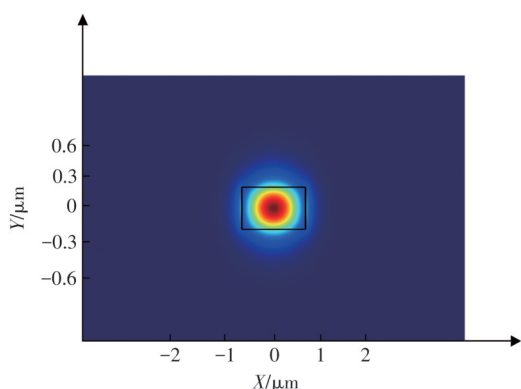


图2 1490 nm波长下的单模波导光场分布

Fig.2 Optical field distribution of the single-mode waveguide at 1490 nm wavelength

为确保光在 Si_3N_4 波导中以TE单模传输,对直波导不同波导宽度尺寸下损耗特性进行仿真研究,结果如图3所示。TE模式的传输损耗随波导宽度的增加而减小,通过优化波导宽度,在单模截止条件内增大波导宽度可实现波导内低损耗单模传输。

对波导色散特性进行分析,波导色散由材料色散、波导色散和模式间色散组成。本文仅考虑TE基模,忽略模式色散。对于 Si_3N_4 波导,材料色散可由Sellmeier方程计算得到^[15]。对于固定波长,材料折射率和材料色散是确定的,波导色散通过波导有效折射率随波长的变化计算得到:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2}, \quad (1)$$

其中, D 为波导色散, n_{eff} 为波导有效折射率, λ 为波长。

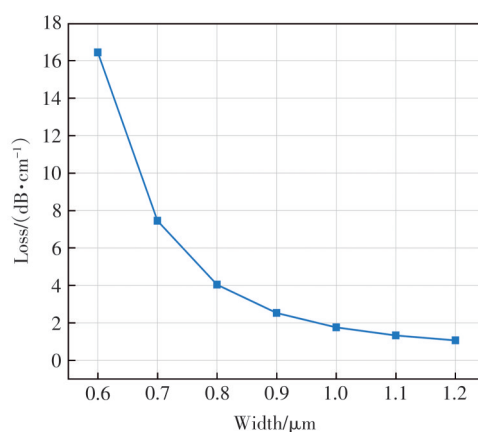


图3 波导TE模式传输损耗随宽度变化曲线

Fig.3 Transmission loss of the TE mode of the waveguide as a function of width

图4所示是波导有效折射率的色散曲线,可以看出,随着波长增加,有限折射率色散呈现线性减小趋势。

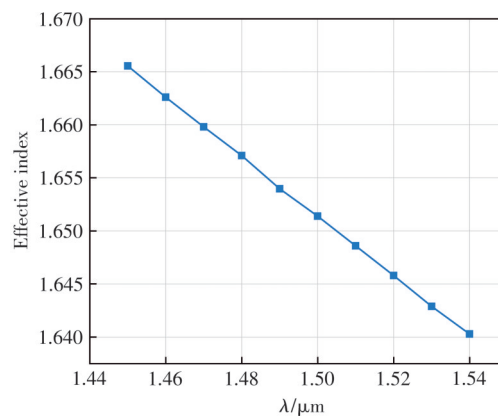


图4 波导有效折射率色散曲线

Fig.4 Dispersion curve of the effective refractive index of the waveguide

2.3 微环谐振器设计

本文采用上下话路型(Add-drop)微环谐振器作为激光器外腔的选频与滤波单元,其典型结构如图3所示,包含了输入(Input)、直通(Through)、下载(Drop)和上载(Add)4个端口。为评估和优化微环性能,需重点分析以下关键参数。

自由光谱范围(FSR):定义为传输谱中相邻谐振峰之间的波长间隔。对于半径为 R 的微环,其FSR可近似表示为^[16]:

$$R_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_{\text{res}}^2}{n_g L}, \quad (2)$$

其中, λ_{res} 为波长, n_g 为波导群折射率, L 为微环周长。FSR与微环周长及群折射率成反比,是决定调谐范围的重要参数。

半高全宽(FWHM)与品质因子(Q因子):

FWHM反映谐振峰的3 dB带宽,直接决定滤波器的频率选择性。对于临界耦合条件下的 Add-drop 微环,其FWHM可表示为^[17]:

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = \frac{(1 - r_1 r_2 \alpha) \lambda_{\text{res}}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 \alpha}}, \quad (3)$$

其中, r_1 、 r_2 为分别为输入波导与微环、输出波导与微环的耦合系数的反射系数, α 为微环的单程损耗系数。品质因子 Q 则表征谐振腔的能量存储与损耗之比,定义为^[17]:

$$Q_{\text{res}} = \frac{\lambda_{\text{res}}}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}, \quad (4)$$

品质因子的物理意义是:微环谐振后环内存储的能量与光绕微环一个周期后损失的能量的比值。根据这个方式,其可以表示为:

$$Q_{\text{res}} = \frac{2\pi f_{\text{res}}}{l R_{\text{FSR-f}}} = 2\pi f_{\text{res}} \frac{T_r}{l} = \omega_{\text{res}} \tau, \quad (5)$$

其中, f_{res} 为微环谐振频率; l 为光在微环内传播一圈损失的功率比值; $R_{\text{FSR-f}}$ 为自由光谱范围以频率为单位时的值; τ 是光子寿命,代表光功率减小到 $1/e$ 时所需要的时间; T_r 为光在微环内的往返时间。

当 l 越小时,微环谐振器的品质因子会越大,因此其光谱线宽会越小。而 l 和微环波导的弯曲损耗、材料吸收损耗、耦合损耗以及光在波导中的传输损耗等相关,因此降低损耗是实现高品质因子微环的关键。

在本设计中,双微环谐振器的半径确定以实现 85 nm 以上宽调谐范围为核心目标。首先,基于微环谐振方程与自由光谱范围(FSR)公式,对半径为 90 μm 的 MRR_1 进行计算,得到其FSR约为 2.023 nm; 随后结合调谐步长,以 0.2 nm 的精细调谐步长为约束,选定 MRR_2 半径为 91 μm , 该半径差(1 μm)既保证两环FSR的微小差值以产生稳定的游标效应,又远大于 100 nm 的工艺制备容差,有效规避制备误差导致FSR重叠风险; 同时,两环半径均大于氮化硅波导工艺制备的最小弯曲半径,可忽略弯曲损耗以维持高 Q 值传输。

微环功率耦合系数(PCC)对激光线宽及功率效率具有显著影响。理论分析表明,耦合系数设计在 0.1~0.2 内有助于压缩线宽^[17]。利用 Lumerical FDTD 对定向耦合器进行建模仿真,系统扫描耦合间距 gap 和耦合长度 L_c 对耦合系数的影响,如图 5(a)、(b)所示。仿真表明,耦合系数随着波导间距的增加而增加,考虑到目前的工艺能力,最终,选择 0.4 μm 以上的耦合间距。随后,研究了耦合系数与耦合长度的关系,根据图 5(b)的仿真曲线可以看出耦合系数随耦合长度的增加而增加。当微环直波导长度为 0 μm 时,耦合间隔从 0.1 μm 增至 0.8 μm , 耦合系数从 0.78 降至 0.04; 当耦合间隔固定为 0.55 μm 时,耦合长度从 5 μm 增至 30 μm , 耦合系数从 0.25 增至 0.89。综合考虑工艺可实现性与性能,最终选定耦合系数为 0.12, 微环直波导长度 0 μm , 耦合间隔 0.55 μm 。

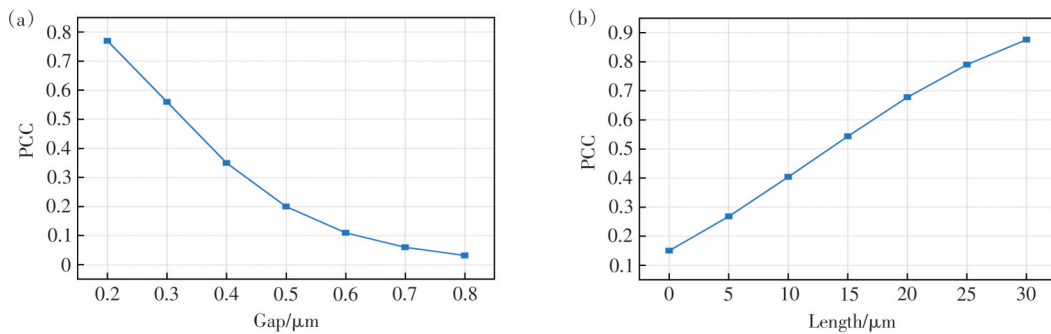


图5 耦合系数与耦合间距和长度的关系

Fig.5 Relationship between coupling coefficient and coupling distance and length

热调谐结构:为实现波长调谐,在微环波导表面制备镍铬(Ni-Cr)薄膜微加热器(宽 6 μm)。利用 Si_3N_4 波导的热光效应^[18]($\approx 2.45 \times 10^{-5}$),通过电流控制加热器温度,可有效调节波导有效折射率,进而实现谐振波长的调谐。加热器与波导对准布置,以保障热场分布均匀、调谐效率稳定。

2.4 可调环形反射镜设计

为构建紧凑且高效的外腔反馈结构,本设计采用 Sagnac 环形反射镜(CSL)作为激光谐振腔的一端反射镜,如图 6(a)所示。该结构基于定向耦合器与弯曲波导构成的环形回路,利用光在环路中沿相反方向传播后发生的干涉实现反射。其反

射率理论上由定向耦合器的耦合系数和环路中累积的相位差决定,当满足特定干涉条件时可实现接近100%的反射率。

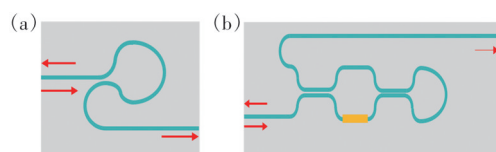


图6 片上环形反射镜结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the on-chip loop mirror

首先,对固定耦合系数的传统CSL进行参数优化。通过FDTD仿真建模,在环形半径固定为 $90\text{ }\mu\text{m}$ 时,系统扫描定向耦合器的耦合长度($0\sim 30\text{ }\mu\text{m}$)与耦合间隔($0.1\sim 0.8\text{ }\mu\text{m}$)对反射特性的影响。结果表明,当直波导部分耦合长度为 $0\text{ }\mu\text{m}$ 、耦合间隔为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 时,在 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 波段的耦合系数约为 0.12 ,反射率达 0.5 ,如图7所示。该设计可在提供足够的光反馈的同时,起到辅助选模、抑制边模的作用。然而,由于定向耦合器的耦合系数具有波长依赖性,在 88 nm ($1450\sim 1538\text{ nm}$)的调谐范围内,固定耦合结构会导致边缘波长处的反射率显著下降(仿真结果如图8所示),从而限制激光器的调谐范围与输出功率的均匀性。

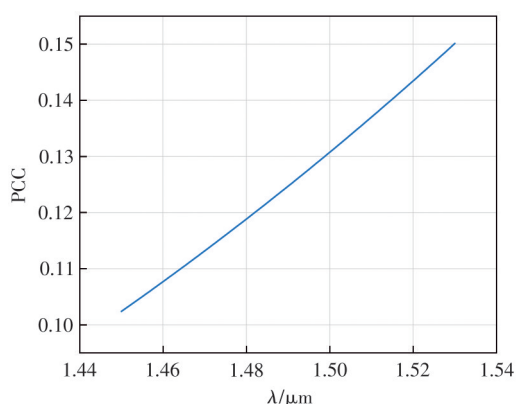


图7 耦合系数与波长的关系

Fig.7 Relationship between coupling coefficient and wavelength

为克服上述局限,本文进一步设计反射率可调的萨格纳克环结构,结构示意图如图6(b)所示。该结构在传统环形回路中嵌入一个四端口的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。MZI的两个输出端口通过波导连接形成环路,两个输入端口分别作为光的入射与输出端。在MZI的两干涉臂上集成微加热器,通过热光效应调节两臂之间的相位差,从而动态控制反射率。

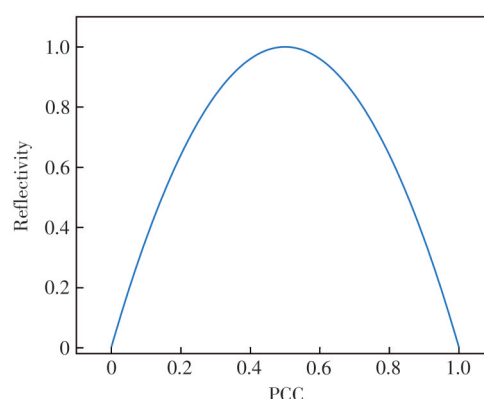


图8 环形镜反射率随耦合系数变化

Fig.8 Variation of loop mirror reflectivity with coupling coefficient

当光信号从输入端口进入MZI后,被分束器均分到两个干涉臂。通过在MZI臂施加热功率,控制光相位差。两束光在环形结构中分别沿顺时针和逆时针方向传播时,其相位差导致干涉条件改变。当 $\theta=\pi$ 时,形成相消干涉,此时输入光被完全反射回输入端口;当 $\theta=0$ 时,则呈现完全透射状态。如图9所示,通过调节加热器功率改变MZI相位差,即可实现反射率在 $0\sim 100\%$ 范围内的连续可调谐。

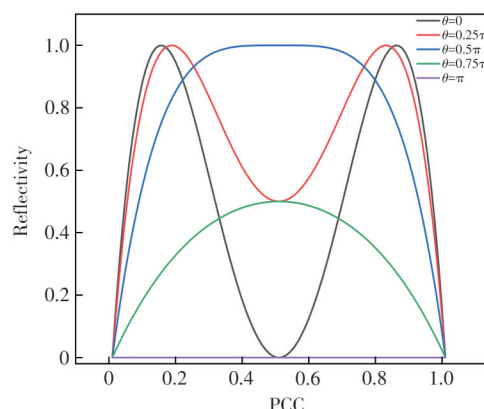


图9 可调环形镜反射率随耦合系数变化

Fig.9 Variation of tunable loop mirror reflectivity with coupling coefficient

可调谐萨格纳克环的反射率由下式表示^[12]:

$$R = \left| 2K_{\text{DC}}t_{\text{DC}} \left[t_{\text{DC}}(e^{j\theta} + e^{j2\theta}) - K_{\text{DC}}2(e^{j\theta} + 1) \right] \right|, \quad (6)$$

其中, t_{DC} 和 κ_{DC} 分别表示直流光场的传输系数和耦合系数($\kappa_{\text{DC}}^2 + t_{\text{DC}}^2 = 1$), θ 是MZI底臂的相位变化量。从公式分析可知,当耦合系数设计在 $0.146\sim 0.854$ 之间时,即可通过相位调控实现反射率在 $0\sim 100\%$ 之间的全覆盖。该可调反射镜设计有效解决了宽波段调谐过程中反馈强度不均匀的问题。

题,为激光器在大范围内保持稳定窄线宽输出提供了关键保障。

2.5 模斑转换器设计

由于增益芯片与 Si_3N_4 波导芯片模斑不匹配,为实现高耦合效率,增益芯片输出光需经模斑转换器高效注入 Si_3N_4 波导芯片,耦合效率的高低直接决定对激光器的线宽、波长调谐能力及工作稳定性产生关键影响。因此,设计具有高耦合效率的模斑转换器成为提升激光器整体性能的重要措施。

本研究中激光增益芯片中心波长为 1 490 nm,输出光斑呈椭圆高斯分布,其水平与垂直方向的模场直径分别为 4 μm 和 1 μm ;与之对应, Si_3N_4 波导芯片中的单模波导厚度与宽度分别为 0.4 μm 和 1.2 μm ,下包层 SiO_2 厚度为 4 μm 。二者模场失配显著,必须借助模斑转换器实现模式的高效匹配。

模斑转换器的耦合效率 η 由两芯片端面耦合效率 η_m 和模斑转换器传输效率 η_n 两部分决定^[19],其中 η_n 与光场传输过程中模式的演化有关。总

耦合效率 η 和模式重叠效率 η_i 计算为^[20]:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_n, \quad (7)$$

$$\eta_m \approx \eta_i = \frac{\left| \int E_{\text{source}} E_{\text{ec}} dA \right|^2}{\int |E_{\text{source}}|^2 dA \times \int |E_{\text{ec}}|^2 dA}, \quad (8)$$

其中 E_{source} 和 E_{ec} 分别为激光芯片光源模式和 Si_3N_4 波导芯片耦合端面模式的复电场振幅, A 为二维截面面积。

本文利用 FDTD 3D 仿真绝热倒锥形结构的模斑转换器(如图 10 所示),借助渐变的波导宽度,将输入端的大模斑光场平滑过渡至单模波导的匹配尺寸。锥形末端的宽度受限于工艺限制的最小波导宽度(200 nm)。当锥形末端宽度取 280 nm、厚度维持 0.4 μm 时,模斑转换器端面模场分布如图 10 所示,在 x, y 轴方向上的 $1/e$ 模场半宽分别约为 0.85 μm 和 0.75 μm 。耦合器锥形前段长度设为 60 μm ,经 FDE 计算,该结构下模场与增益芯片椭圆光斑的模式重叠效率可达 86%,通过 FDTD 仿真计算总耦合效率为 83%。

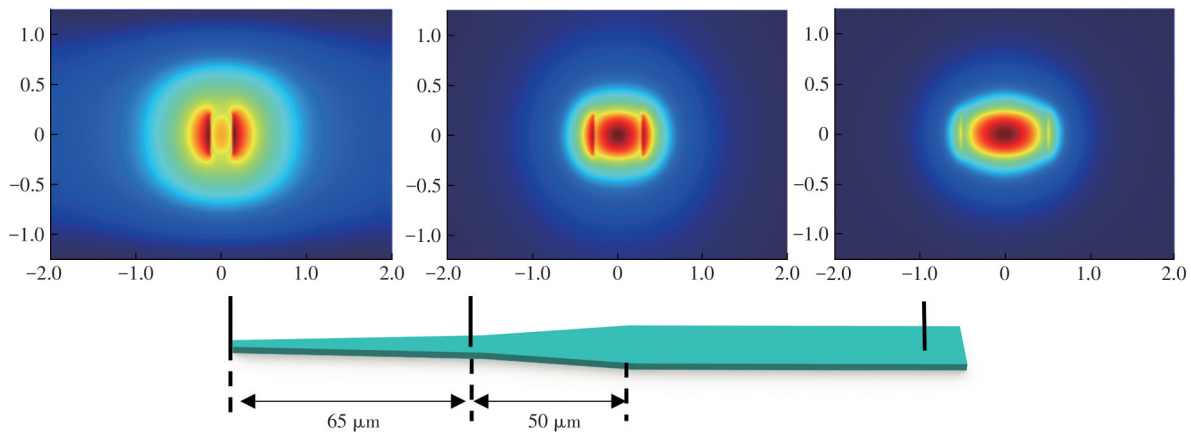


图 10 模斑转换器示意图

Fig.10 Schematic diagram of the mode converter

3 输出性能仿真

3.1 外腔可调谐性能仿真

基于游标效应的级联微环滤波器的自由光谱范围(FSR)直接决定了激光器波长调谐范围。本文采用三级联微环游标滤波结构,通过三个不同自由光谱范围(FSR)的微环谐振器(MRR_1 、 MRR_2 、 MRR_3)级联,利用游标效应拓宽有效调谐范围,同时保障窄带选模特性,满足激光雷达窄线宽需求。

根据游标效应原理,级联的双微环外腔谐振

器叠加得到的自由光谱范围主要由微环的自由光谱范围差决定,而自由光谱范围差主要由两个微环的周长差决定,若微环周长差越小,叠加得到的自由光谱范围越大,外腔的波长可调谐范围越大。通过级联微环能有效地增加外腔的调谐范围,但同时模式增益差很小,双微环游标要实现 85 nm 的调谐范围,模式增益差很小,仅为 0.8 dB,如图 11,导致激光器输出边模抑制比(SMSR)不足,难以保证稳定的单模激射。为此,本文在双微环基础上引入第三个微环,构成三微环级联滤波结构。第三环可对前两级联环形成的传输包络进行二次滤

波,在维持主谐振峰强度的同时有效抑制旁瓣,从而显著提高模式增益差;引入第三环可进一步延长有效腔长,增加光子寿命,有利于压窄激光线宽^[7, 21-22];若第三环的FSR小于前两环的包络FSR(通常通过增大其周长实现),可在不牺牲调谐范围的前提下增强选模能力^[23]。

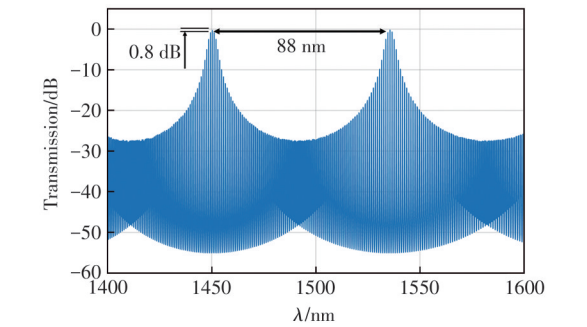


图 11 双微环游标图

Fig.11 Schematic diagram of the dual-microring vernier filter

图 12 所示的三环联合传输谱表明,在相同调谐范围内,三微环结构将模式增益差提高至 11 dB,旁

瓣得到明显抑制,从而满足外腔激光器的单模激励条件。

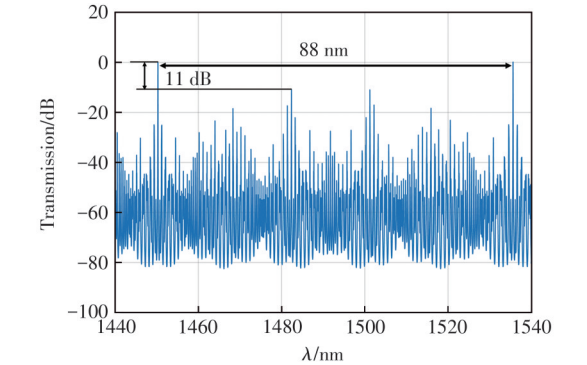


图 12 三微环游标图

Fig.12 Schematic diagram of the three-microring vernier filter

3.2 线宽性能仿真

激光线宽是决定 FMCW 激光雷达测距精度的核心指标之一,在氮化硅波导中观察到的最低传播损耗低于 0.1 dB/m^[24]。表 1 是本文激光器仿真参数。

表 1 激光器仿真参数

Tab. 1 List of laser design parameters laser generations

符号	λ/nm	$\alpha_p/(\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1})$	n_g	d/dB	$L_a/\mu\text{m}$	$L_p/\mu\text{m}$	PCC
描述	波长	波导损耗	群折射率	耦合损耗	增益长度	无源波导长度	微环功率耦合系数
数值	1 490. 03	0. 5	2. 07	2	2 500	2 016	0. 12

基于氮化硅平台^[25]实现了小于 10 kHz 线宽输出,满足 FMCW 激光雷达对激光器线宽要求。为了分析混合集成激光器的线宽特性,我们建立了包含环形谐振器反馈的扩展腔激光器模型。该模型基于 Schawlow-Townes 线宽公式,并考虑了

扩展腔带来的线宽压缩因子。通过对外腔激光器线宽进行计算,如图 13 所示。我们首先计算了线宽压缩因子 A 、 B 和 F ,结果如图 13(a)所示。因子 A 和 B 分别反映了扩展腔相位和幅度变化对线宽的影响。可以看到 A 和 B 均出现峰值,并且 A 的

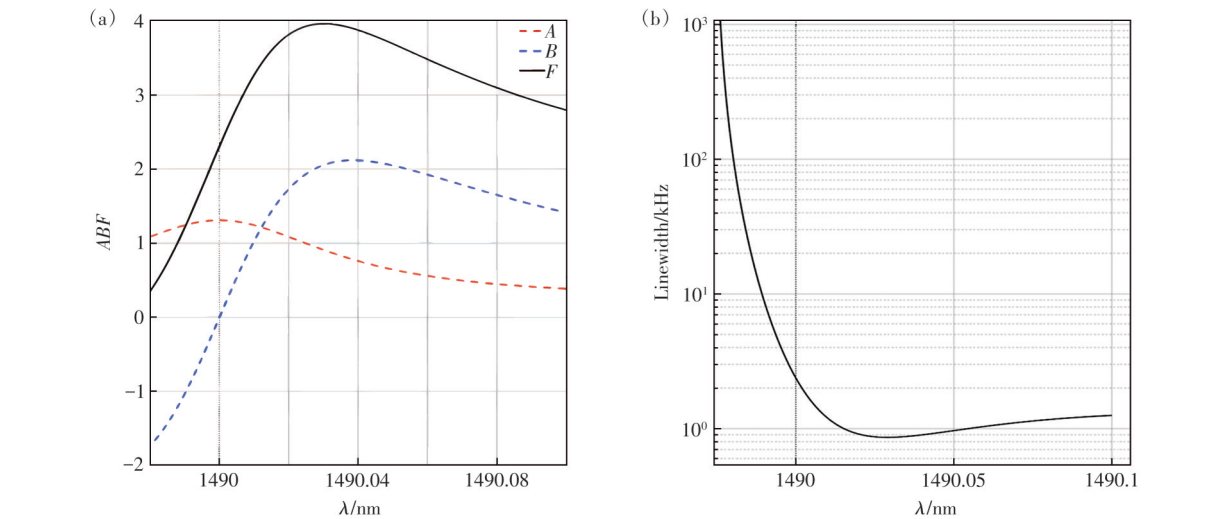


图 13 仿真线宽压缩因子(a)和本征线宽(b)

Fig.13 ABF (a) and linewidth(b) simulation

贡献远大于 B , 这表明扩展腔的相位变化是线宽压缩的主要因素。接着计算了激光器的本征线宽, 如图 13(b) 所示。在 1 490. 03 nm 处, 线宽达到最小值 0. 89 kHz。这一结果与线宽压缩因子 F 的峰值位置相对应, 验证了扩展腔激光器通过环形谐振器反馈可以实现极窄线宽。通过建立包含环形谐振器反馈的扩展腔激光器模型, 我们仿真了所设计的激光器的线宽特性。仿真结果表明, 在 1 490. 03 nm 处, 激光器的最小线宽可达 0. 89 kHz。

3. 3 光谱性能仿真

建立外腔激光器模型对输出光谱进行仿真, 建立的外腔激光器模型包含 RSOA、微环滤波器、定向耦合器、热电极以及光谱仪等模块。如图 14 所示, 该外腔激光器在 S 波段实现了单模激射, 其边模抑制比大于 55 dB, 通过集成加热器调节波导的有效折射率, 可实现激射波长的调谐, 覆盖 1 450~1 538 nm 内 88 nm 的调谐范围。

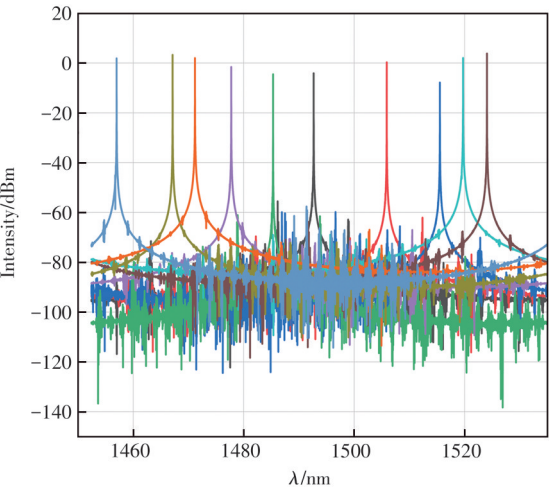


图 14 调谐光谱仿真

Figure 14 Tunable spectrum simulation

基于本文的设计方案及团队在 C+L 波段硅基可调谐激光器上积累的研制经验^[14], 后续工作将

围绕该外腔结构开展流片制备与耦合封装实验。本设计方案与其他氮化硅外腔激光器性能对比如表 2 所示。

表 2 氮化硅外腔激光器对比

Tab. 2 Comparison of silicon nitride external cavity lasers

年份	波段	调谐范围 (设计)/nm	线宽/ kHz	边模抑 制比/dB
2022 ^[12]	C	93	26	45
2023 ^[26]	C	53	2	50
2025 ^[14]	C	80	0. 25	60
本工作	S	88	0. 89	55

4 结 论

本文面向全固态 OPA-FMCW 激光雷达对宽调谐、窄线宽光源的需求, 设计了一种覆盖 S 波段的氮化硅基三微环外腔可调谐窄线宽激光器。该设计作为成熟的 C+L 波段硅基可调谐激光器频谱补充, 通过混合集成 InP 基 RSOA 与低损耗 Si₃N₄ 波导芯片, 结合三微环游标滤波结构与可调谐 Sagnac 环形反射镜, 在仿真上实现了 88 nm 的宽调谐范围、最小 0. 89 kHz 的窄线宽输出以及大于 55 dB 高边模抑制比。结果表明, 所提出激光器在调谐范围、线宽等核心指标上均满足调频连续波光学相控阵激光雷达系统对扩展波长的迫切需求, 其 S 波段输出不仅适配 Ge/Si 探测器在短波方向的高响应度, 未来还可与 C+L 波段激光器集成, 通过微转印^[27]等新型集成方式形成覆盖 S+ C+L 全波段的宽谱可调谐光源, 从而为支持大角度纵向扫描的全固态激光雷达提供高性能集成化解决方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260041>

参 考 文 献:

[1] CHEN B S, LI Y Z, XIE Q J, *et al.* SiN-on-SOI optical phased array LiDAR for ultra-wide field of view and 4D sensing [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(10): 2301360.

[2] HULME J C, DOYLEND J K, HECK M J R, *et al.* Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(5): 5861.

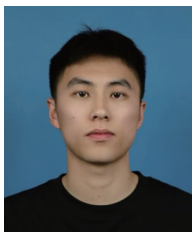
[3] HECHT J J O. Lidar for self-driving cars [J]. *Opt. Photonics News*, 2018, 29(1): 26-33.

[4] MA W C, TAN S, WANG K K, *et al.* Practical two-dimensional beam steering system using an integrated tunable laser and an optical phased array [J]. *Appl. Opt.*, 2020, 59(32): 9985-9994.

[5] BIANCONI S, RIBES-PLEGUEZUELO P, SILVESTRI F. Requirements for next-generation integrated photonic FMCW

- LiDAR sources [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 6739.
- [6] YANG C J, LIANG L, QIN L, *et al.* Advances in silicon-based, integrated tunable semiconductor lasers [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(2): 197-217.
- [7] FAN Y W, VAN REES A, VAN DER SLOT P J M, *et al.* Hybrid integrated InP-Si₃N₄ diode laser with a 40-Hz intrinsic linewidth [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(15): 21713-21728.
- [8] GUO Y Y, ZHAO R L, ZHOU G Q, *et al.* Thermally tuned high-performance III-V/Si₃N₄ external cavity laser [J]. *IEEE Photonics J.*, 2021, 13(2): 1500813.
- [9] WANG S X, LIN Z J, WANG Q, *et al.* High-performance integrated laser based on thin-film lithium niobate photonics for coherent ranging [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 18(10): 2400224.
- [10] LI X T, QU H, WANG W P, *et al.* A novel on-chip bridged balanced photodetector with high common-mode rejection ratio (~49 dB) for FMCW LiDAR [C]. *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, San Diego, 2025: M3J. 2.
- [11] GUO Y Y, ZHOU L J, ZHOU G Q, *et al.* Hybrid external cavity laser with a 160-nm tuning range [C]. *Proceedings of the 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, 2020: 1-2.
- [12] GUO Y Y, LI X H, JIN M H, *et al.* Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range [J]. *APL Photonics*, 2022, 7(6): 066101.
- [13] XU W H, GUO Y Y, LI X H, *et al.* Fully integrated solid-state LiDAR transmitter on a multi-layer silicon-nitride-on-silicon photonic platform [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(3): 832-840.
- [14] YANG C J, 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.
- [15] 孙媛媛, 李 政, 钟咏兵, 等. 2 μm 工作波长下氮化硅槽波导特性研究 [J]. *传感器技术与应用*, 2023, 11(2): 9. SUN Y Y, LI Z, ZHONG Y B, *et al.* Study on characteristics of silicon nitride slot waveguide at 2 μm operating wavelength [J]. *J. Sensor Technol. Appl.*, 2023, 11(2): 9. (in Chinese)
- [16] LIU C, LU L J, GUO Y Y, *et al.* Hybrid integrated frequency-modulated continuous-wave laser with synchronous tuning [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2022, 40(16): 5636-5645.
- [17] 张杨博文. 用于FMCW激光雷达的环形谐振器波长可调谐特性研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2024. ZHANG Y B W. *Study on Wavelength Tunable Characteristics of Ring Resonator for FMCW LiDAR* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024. (in Chinese)
- [18] PAN B W, BOURDERIONNET J, BILLAULT V, *et al.* III - V -on-Si₃N₄ widely tunable narrow-linewidth laser based on micro-transfer printing [J]. *Photonics Res.*, 2024, 12(11): 2508.
- [19] HE A, GUO X H, WANG K N, *et al.* Low loss, large bandwidth fiber-chip edge couplers based on silicon-on-insulator platform [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(17): 4780-4786.
- [20] LIU Z H, SUN J J, LI Z H, *et al.* Low-loss, large-bandwidth multi-tip edge coupler for heterogeneous chip integration with large-mode-field-diameter [J]. *Opt. Express*, 2025, 33(23): 48035-48048.
- [21] FAN Y W, OLDENBEUVING R M, ROELOFFZEN C G, *et al.* 290 Hz intrinsic linewidth from an integrated optical chip-based widely tunable InP-Si₃N₄ hybrid laser [C]. *Proceedings of the 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, 2017: JTh5C. 9.
- [22] REN Y K, XIONG B, YU Y L, *et al.* Widely and fast tunable external cavity laser on the thin film lithium niobate platform [J]. *Opt. Commun.*, 2024, 559: 130415.
- [23] GUO Y Y, LI X H, XU W H, *et al.* A hybrid-integrated external cavity laser with ultra-wide wavelength tuning range and high side-mode suppression [C]. *Proceedings of the 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, San Diego, 2022: 1-3.
- [24] JI X C, BARBOSA F A S, ROBERTS S P, *et al.* Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold [J]. *Optica*, 2017, 4(6): 619-624.
- [25] PORCEL M A G, HINOJOSA A, JANS H, *et al.* [INVITED] Silicon nitride photonic integration for visible light applications [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2019, 112: 299-306.
- [26] CHEN C, WEI F, HAN X Y, *et al.* Hybrid integrated Si₃N₄ external cavity laser with high power and narrow linewidth [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(16): 26078-26091.

- [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(1): 396.



李尧(1999-),男,山东青岛人,硕士研究生,2023年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事硅基混合集成可调谐激光器的研究。

E-mail: liyao232@mails.ucas.ac.cn



梁磊(1985-),男,山东日照人,博士,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