

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-09

面向FMCW激光雷达的超窄线宽外腔激光器

侯铁峰^{1,2}, 王玉冰^{1*}, 李 尧^{1,2}, 宋 悦¹, 邱 橙¹, 雷宇鑫¹,
贾 鹏¹, 秦 莉¹, 梁 磊¹, 王立军¹

(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, 北京 100049)

摘要: 为满足调频连续波(FMCW)激光雷达对超窄线宽、高边模抑制比与高功率单频光源的应用需求,设计并制备一款基于半导体光放大器(SOA)与氮化硅波导混合集成的外腔激光器(ECL)。采用非对称马赫-曾德尔干涉器与双微环谐振器协同级联滤波结构,优化氮化硅波导截面尺寸与色散特性,结合透镜耦合封装方案实现芯片集成;搭建FMCW激光雷达验证系统,开展扫频线性度、测距、测速及三维成像测试。实验结果表明,该激光器在1550 nm波段实现0.628 kHz超窄本征线宽、58 dB高边模抑制比、52.3 mW输出功率;雷达系统扫频线性拟合优度 $1-r^2=2\times 10^{-5}$,测距分辨率5.90 cm、最大绝对误差2.82 cm,测速线性拟合优度 $R^2=0.99891$,可完成高精度三维点云成像。该混合集成外腔激光器可良好适配FMCW激光雷达系统,为高精度探测提供高性能光源方案。

关 键 词: FMCW激光雷达; 外腔激光器; 氮化硅波导

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260135

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260135

Ultra-narrow Linewidth External Cavity laser for FMCW Lidar

Hou Tiefeng^{1,2}, Wang Yubing^{1*}, Li Ao^{1,2}, Song Yue¹, Qiu Cheng¹, Lei Yuxin¹, Jia Peng¹,
Qin Li¹, Liang Lei¹, Wang Lijun¹

(1. National Key Laboratory of Special Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

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

Abstract: In order to meet the application requirements of frequency modulated continuous wave (FMCW) lidar for ultra-narrow linewidth, high side mode suppression ratio and high power single-frequency light source, an external cavity laser (ECL) based on hybrid integration of semiconductor optical amplifier (SOA) and silicon nitride waveguide was designed and fabricated. The asymmetric Mach-Zehnder interferometer and double micro-ring resonator are used to optimize the cross-section size and dispersion characteristics of silicon nitride waveguide, and the chip integration is realized by combining the lens coupling package scheme. The FMCW lidar verification system is built, and the sweep linearity, ranging, velocity measurement and three-dimensional imaging tests are carried out. The experimental results show that the laser achieves an ultra-narrow intrinsic linewidth of 0.628 kHz, a high side-mode suppression ratio of 58 dB, and an output power of 52.3 mW in the 1550 nm band. The scanning frequency linearity goodness of fit of the radar system is $1-r^2=2\times 10^{-5}$, the ranging resolution is 5.90 cm, the maximum absolute error is

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 吉林省自然科学基金(20250101047JJ), the 国家自然科学基金(62535009, 62574201, 62274164, U23A20355), the 吉林省长白山人才计划(202442104), the 长春市科技发展计划项目(25GNYZ06), 特种发光科学与技术实验室自主课题(SKLA-Z-2025-04).

Supported by the Science and Technology Development Project of Jilin Province (20250101047JJ), the National Natural Science Foundation of China (62535009, 62574201, 62274164, U23A20355), the Changbai Talents Program of Jilin Province (202442104), the Changchun City Science and Technology Development Project (25GNYZ06), the Autonomous Project of the National Key Laboratory of Special Luminescence Science and Technology (SKLA-Z-2025-04).

2.82 cm, and the linear goodness of fit of the velocity measurement is $R^2=0.99891$, which can complete high-precision three-dimensional point cloud imaging. The hybrid integrated external cavity laser can be well adapted to the FMCW lidar system, providing a high-performance light source scheme for high-precision detection.

Keywords: FMCW lidar; external cavity laser; silicon nitride waveguide

1 引 言

激光雷达(LiDAR)在高精度三维感知与速度测量等领域^[1-2]具有不可替代的应用价值。相较于传统脉冲飞行时间(ToF)探测体制,调频连续波(FMCW)激光雷达凭借相干探测技术,具有量子极限灵敏度、实时测速和本征的抗干扰能力等一系列优势^[3]。然而,FMCW系统的整体探测性能深度依赖于核心光源的性能参数。具体而言:光源的本征线宽决定了系统的时间相干性与最大探测范围;边模抑制比(SMSR)表征光谱的单模稳定性,直接影响拍频信号的解调信噪比;而较高的输出功率保证了远距离的回波强度。因此,研发兼具窄线宽、高SMSR与高功率的单频半导体激光光源,是突破FMCW雷达应用瓶颈的关键。

围绕高性能单频半导体光源,国内外学者在分布反馈(DFB)、分布布拉格反射(DBR)及外腔激光器(ECL)等技术路线上开展了大量研究。在DFB激光器方面,王立军课题组^[4]实现了48.8 mW输出与399 MHz线宽;Xiang等^[5]与Lu等^[6]通过波导结构优化,分别获得了250 kHz与45 kHz的窄线宽,且SMSR均超过55 dB;袁庆贺等^[7]则在808 nm波段实现了14.7 GHz线宽输出。在DBR/光栅型器件方面,Slight等^[8]与马晓辉课题组^[9]分别实现了810.9 MHz与117.3 GHz的线宽;Xu等^[10]、Zheng课题组^[11]及Huang课题组^[12]进一步将本征线宽压缩至63 kHz至288 kHz量级,并保持了优异的边模抑制能力。尽管DFB与DBR器件具备极高的集成度,但受限于半导体材料的固有损耗与较短的物理腔长,其线宽通常受限于几十千赫兹量级,难以进一步满足更长距离FMCW探测的需求。

相比之下,外腔激光器(ECL)方案在超窄线宽与高功率输出方面展现出更优异的频谱潜力。通过引入低损耗的外部反馈网络,外腔激光器能够有效增大有效腔长并提高腔内光子寿命,从而显著压窄激光线宽并降低相位噪声。例如,Guo等^[13]将洛伦兹线宽优化至4.7 kHz并具备宽调谐能力;闫等^[14]基于体布拉格光栅实现了8.12 GHz

线宽的瓦级输出;唐等^[15]提出复合外腔结构,在5 W高功率下实现了499 MHz的极窄线宽。

针对不同材料平台,目前III-V平台具有高增益与高输出功率优势,但片上大规模集成能力有限;硅基平台具备较高集成度与CMOS工艺兼容性,但波导损耗和热效应可能影响激光器相干性能;而SiN平台则具有超低波导损耗、高Q谐振器实现能力以及优异的热稳定性,更适合构建窄线宽相干光源。基于上述需求与平台特点,本文最终选择外腔激光器(ECL)方案,而非单独采用传统DFB激光器。相比DFB激光器,外腔激光器通过引入低损耗外部谐振腔,可有效延长等效腔长、提高模式选择能力并显著压缩线宽,同时改善扫频稳定性与频率噪声性能,从而更适用于FMCW系统对高相干性、高分辨率及长距离探测的需求。此外,本文采用SiN外腔平台,可进一步结合其低损耗与高稳定性优势,实现兼顾窄线宽、较高输出性能及片上集成潜力的FMCW相干光源方案。为满足上述FMCW系统对光源的极限性能需求,本文设计并制备了一款基于半导体光放大器(SOA)与氮化硅波导混合集成的高性能ECL,并以此为核心搭建了一套完整的FMCW激光雷达验证系统。通过非对称马赫-曾德尔干涉器(a-MZI)与双微环谐振器的协同级联滤波,该光源在1550 nm工作波段实现了0.628 kHz的超窄本征线宽、58 dB的高边模抑制比以及52.3 mW的高功率输出。在此光源基础上,本文全面开展了雷达系统的测距、测速及三维点云成像实验,验证了该混合集成ECL光源在实现高准度、高一致性三维空间探测中的核心价值。

2 外腔激光器设计与性能

针对FMCW激光雷达对高相干、窄线宽光源的迫切需求,本文设计并制备了一款混合集成ECL芯片,如图1所示。该器件采用SOA与氮化硅(SiN)波导芯片混合集成的技术方案。在增益介质端,基于磷化铟(InP)衬底的SOA长度为2.5 mm。为有效抑制腔内寄生振荡并减小端面反射

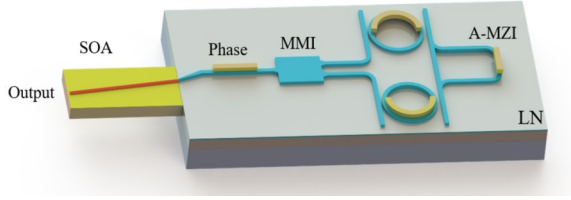


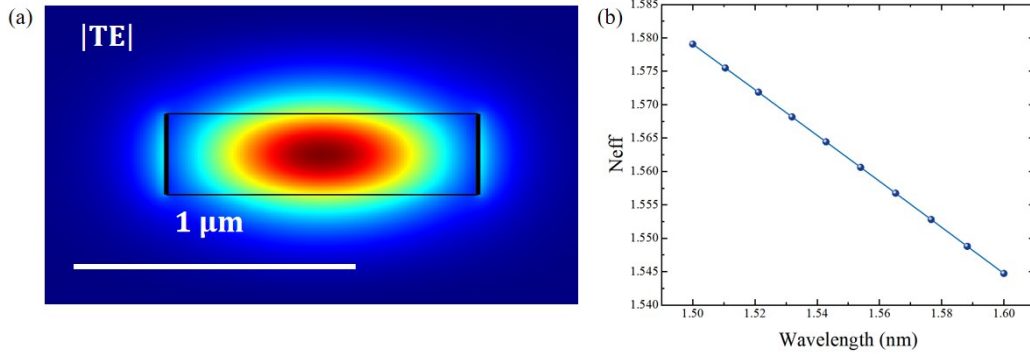
图 1 外腔激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of external cavity laser structure

干扰, SOA 的输出端波导采用 7° 倾斜角设计, 同时在两端面均镀有抗反射 (AR) 薄膜, 将其反射率严格控制在约 0.5% 的水平。外部 SiN 反馈光路的核心架构由 a-MZI、双环形谐振器、多模干涉 (MMI) 耦合器以及相位调制器共同构成。其中, a-MZI 通过两臂长度差引入与频率相关的相位延迟, 形成周期性的梳状透射谱, 负责对激光纵模进行粗粒度的初步筛选。随后, 串联的高品质因子 (Q 值) SiN 环形谐振器利用其窄带共振特性进行精细选模。a-MZI 与微环谐振器的级联滤波构成了窄带反馈峰, 仅允许单一纵模获得最大反馈增

益, 从而有效抑制模式竞争并大幅降低由多模振荡引起的频率抖动。

外腔激光器的无源波导结构直接决定了系统的输出功率、本征线宽以及调频特性。对于 FM-CW 激光雷达而言, 外腔反馈光的高模式纯度是抑制相位噪声、实现窄线宽输出的物理前提。若波导内存在高阶模式, 不同模式间的折射率差异会在外腔中引发模式竞争, 进而导致激光频率抖动与相干性退化。为满足 FMCW 系统对严格单模运行的苛刻要求, 本文选用低损耗 SiN 作为波导核心层, 并将其截面尺寸精细优化为宽度 $1.1 \mu\text{m}$ 、厚度 300 nm 。图 2(a) 展示了该波导在 1550 nm 波长下横截面内的 TE 基模光场分布。由图可知, 光场能量高度局域于波导芯层内部, 空间轮廓呈现理想的准高斯分布; 其倏逝场在包层区域迅速衰减, 表现出极强的横向与法向模式限制能力。该结果证明, 所设计的波导能够从空间域上彻底消除高阶模式的串扰, 为激光器实现单频、低噪声输出奠定了物理基础。

图 2 (a) 1550 nm 波长下的单模波导光场分布 (b) 色散曲线Fig.2 (a) Optical field distribution of single-mode waveguide at 1550 nm (b) Dispersion curve

另一方面, 波导的色散特性直接决定了 FM-CW 激光器宽带扫频的线性度。在调频连续波体制中, 激光器的谐振频率依赖于波导的有效折射率 (n_{eff})。若有效折射率随波长发生剧烈变化, 腔内调谐相位的线性变化将转化为非线性的光频输出, 从而导致雷达拍频频谱展宽, 严重恶化系统的距离分辨率。因此, 波导必须具备低色散特性以保障宽带调谐时的群时延一致性。图 2(b) 给出了该波导结构在 1550 nm 附近的有效折射率随波长变化的色散演化曲线。在目标工作波段内, 基模有效折射率呈平滑单调的下降趋势, 展现出平缓的色散斜率, 意味着波导具有较低的群速度色散。

这种优异的低色散特性从频率域上有效缓解了调谐过程中的相位畸变, 保证了激光器在宽带扫频时的高度线性与频率稳定性, 完美契合了高精度 FMCW 雷达对光源的严格要求。

外腔半导体激光器在线宽压窄分析中, 可从扩展后的 Schawlow - Townes 线宽表达式出发。基于有效反射镜模型, 外腔作用下的激光线宽可写为

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{(1 + A + B)^2} \quad (1)$$

其中, $\Delta\nu$ 为外腔半导体激光器线宽, $\Delta\nu_0$ 为等效孤立法布里 - 珀罗激光器的本征 Schawlow - Townes

线宽。式中两项修正量分别用 A 与 B 表示,并共同决定外腔引入的压窄因子。

项 A 表示由外腔等效反射相位色散引入的等效腔长增强效应,其表达式为

$$A = \frac{1}{\tau_0} \cdot \frac{d\phi_{eff}}{d\omega} \quad (2)$$

其中, τ_0 为有源区光子往返时间, ϕ_{eff} 为外腔等效反射相位, ω 为角频率。该项反映外腔相位对频率变化的敏感性,其物理意义是通过相位色散改变等效腔长,从而影响频率噪声与线宽。

项 B 表示由频率相关反射率幅值引入的振幅-相位耦合负反馈效应,可写为

$$B = \frac{\alpha_H}{\tau_0} \frac{d \ln |r_{eff}(\omega)|}{d\omega} \quad (3)$$

其中, α_H 为线宽增强因子, $|r_{eff}(\omega)|$ 为扩展腔等效反射系数幅值。该项描述反射率随频率变化所产生的振幅-相位耦合反馈对频率噪声的抑制作用。

为便于表述,引入外腔线宽压窄因子

$$F = 1 + A + B \quad (4)$$

则外腔半导体激光器的线宽表达式可写为

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{F^2} \quad (5)$$

该形式表明,外腔通过参数 A 与 B 的共同作用改变压窄因子 F ,从而实现对本征 Schawlow - Townes 线宽的压窄^[21]。

为定量评估外腔反馈结构对线宽压缩的贡献,本文基于频率依赖反馈理论,仿真分析了决定线宽演化的核心系数 A 、 B 及 F 。图 3(a)展示了上述系数随波长的变化曲线。仿真结果表明,系数 A 与 B 在 1550 nm 附近均达到了峰值,这意味着在该波段,由 a-MZI 与双环谐振器构成的级联滤波网络提供了最大的外腔群时延以及极高的频谱滤波陡度。与此同时,系数 B 在目标波段内保持平滑且较低的数值,说明外腔反馈引入的相位-振幅耦合噪声得到了有效抑制。图 3(b)给出了根据上述系数估算得到的本征洛伦兹线宽随波长的变化趋势。由图可知,在 1550 nm 中心波长处,激光器的本征线宽达到了最小值 0.628 kHz。相比于 SOA 的初始量级,线宽实现了数个数量级的显著压缩。这一结果有力地证明了所设计的混合集成外腔结构能够通过显著提升光子寿命与频谱滤波性能,深度抑制激光器的相位噪声,从而实现 FMCW 激光雷达所需的高相干、窄线宽输出。

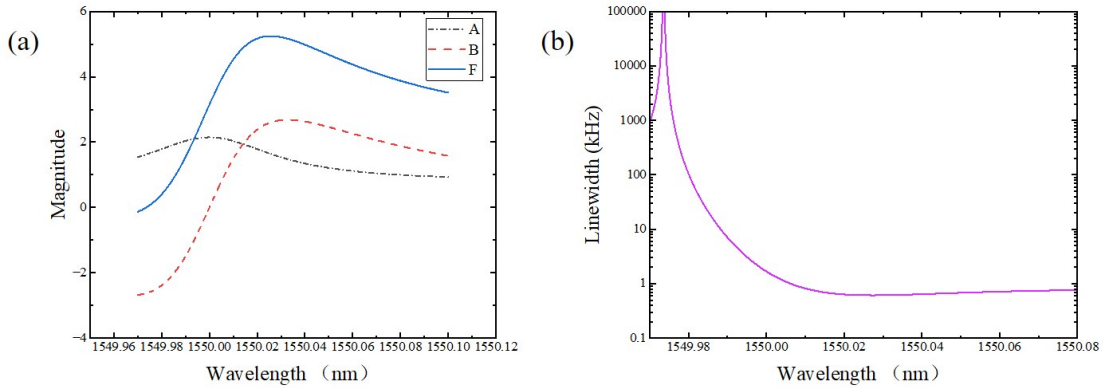


图 3 (a)线宽演化的核心系数随波长变化 (b)本征洛伦兹线宽随波长变化

Fig.3 (a)The core coefficient of linewidth evolution varies with wavelength. (b)The intrinsic Lorentz linewidth varies with wavelength.

在芯片集成封装方面,本文采用透镜耦合的混合集成方案实现了 SiN 外腔芯片与 SOA 芯片的对接。相较于传统的端面对接耦合,透镜耦合方案有效降低了对两芯片三维对准精度的严苛要求,且免除了波导外腔芯片复杂的端面研磨与抛光等后处理工艺,尽管其耦合损耗较端面耦合略高,但大幅提升了器件组装的容差与成品率。

图 4(a)展示了该混合集成外腔激光器在室温下的光功率-电流-电压(L-I-V)特性曲线。由图可知,随着注入电流的增加输出功率随电流呈近似高线性度增长,并最终达到 52.3 mW 的峰值输出功率。该高线性度的功率曲线在整个测试区间内未出现明显的热反转或功率滚降现象,证明器件内部热积累效应较弱;同时,V-I 曲线平稳且呈线性上升,反映出该混合集成器件具备优异的电学

接触特性与整体工作稳定性。

在明确器件基础电光响应后, 本文进一步评估了其光谱特性。为消除环境温度波动对谐振腔相位的干扰, 测试过程中将 SOA 的注入电流恒定偏置于 300 mA, 并通过热电制冷器 (TEC) 将器件整体工作温度精确控温于 20°C。将输出光接入高分辨率光谱分析仪测得的激光光谱如图 4(b) 所示。该激光器实现了中心波长位于 1550.02 nm 的稳定单模激光, 其主模与最强背景边模之间的 SMSR 高达 58 dB, 充分证明了所设计的外腔级联滤波网络能够极其有效地提供单纵模增益并深度压制模式竞争。

高相干与窄线宽是评估 FMCW 激光雷达光

源性能的核心指标。图 4(c) 给出了该激光器在 1550.02 nm 激光波长下的频率噪声谱密度测试结果。从物理机理上看, 频率噪声在低频段受环境热波动及机械振动 ($1/f$ 噪声) 主导而处于较高水平; 随后向高频段延伸时迅速降低, 并最终在白噪声区域趋于平坦, 呈现出典型的高性能外腔窄线宽激光器的噪声分布特征。通过对白噪声极限区域的频率噪声进行积分, 计算得到该波长下的有效洛伦兹本征线宽仅为 0.628 kHz。这一极窄的线宽数据标志着该外腔激光器凭借微环谐振器提供的巨大群时延, 成功实现了极低相位噪声与超高相干长度输出, 能够完美适配长距离、高精度 FMCW 激光雷达的应用需求。

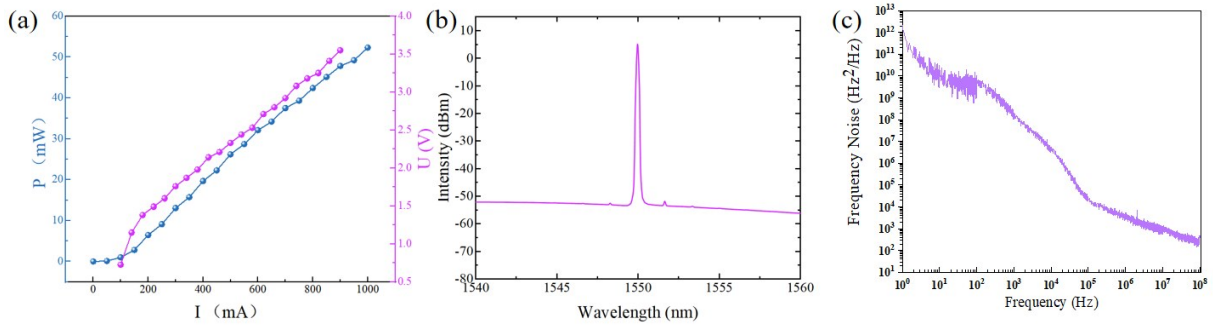


图 4(a) 激光器光功率-电流-电压特性曲线 (b) 激光器光谱 (c) 频率噪声谱密度测试结果

Fig.4 (a) Laser power-current-voltage characteristic curve (b) Laser spectrum (c) Frequency noise spectral density test

3 FMCW 激光雷达系统实验

3.1 系统扫频线性度测试

为验证所设计激光器的性能, 本文搭建了 FMCW 激光雷达系统如图 5 所示, 并开展了实验测试。该系统主要由激光发生与调制模块、收发光路、相干探测模块以及信号处理单元构成。在

信号产生端, 系统采用外部调制方案: 首先由激光器输出窄线宽的单频连续波信号, 随后将该信号注入单边带调制器, 在射频驱动下实现光频的三角波线性调制, 从而产生 FMCW 激光信号。为满足探测距离的需求, 该调制信号进一步通过半导体光放大器进行功率放大。放大后的 FMCW 激

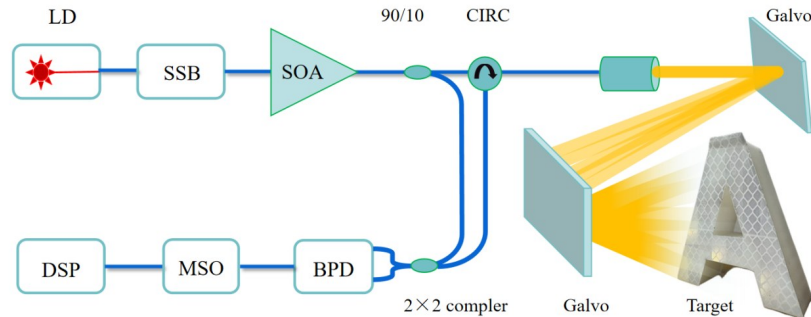


图 5 FMCW 激光雷达系统示意图 LD: 激光器, SSB: 单边带调制器, SOA: 半导体光放大器, CIRC: 环形器, Galov: 振镜, BPD: 平衡探测器, MSO: 数字示波器, DSP 数字信号处理器

Fig. 5 FMCW laser radar system schematic LD : laser, SSB : single sideband modulator, SOA : semiconductor optical amplifier, CIRC : circulator, Galov : galvanometer, BPD : balanced detector, MSO : digital oscilloscope, DSP digital signal processor

光经分束器分为两路:90%的光功率作为发射光,经发射光学系统准直后照射至目标物体;10%的光功率则作为本振光保留在系统内部,为相干探测提供参考信号。发射激光与目标发生相互作用后,形成携带有目标空间信息的散射回波,并由接收光学系统收集。随后,回波光与本振光共同进入光耦合器中进行物理干涉,并由平衡探测器完成光电转换。由于回波光不仅存在由空间飞行距离引起的时间延迟,还包含因目标相对运动产生的多普勒频移,本振光与回波光会在平衡探测器上发生拍频,输出包含目标距离与速度信息的低频电信号。拍频信号经模数转换后被送入信号处理模块。系统利用快速傅里叶变换(FFT)等频谱分析算法,分别提取出三角波上扫频阶段和下扫频阶段的拍频峰值频率。设上扫频拍频频率 f_{up} ,下扫频拍频频率为 f_{down} ,则目标的绝对距离 R 与径向速度 v 可通过以下方程联立解算得出:

$$\begin{aligned} R &= \frac{c}{4\gamma} (f_{up} + f_{down}) \\ v &= \frac{\lambda}{4} (f_{up} - f_{down}) \end{aligned} \quad (6)$$

为进一步评估所生成FMCW激光的调频线性度,本文搭建了臂长差为5 m的a-MZI进行实验测试。图6展示了对探测器输出的拍频信号进行希尔伯特变换解算后恢复的三角波调频信号^[16],以及对应的上、下扫频阶段的频率线性残差。由图可知,该调制信号的周期为200 μ s,扫频带宽约为3 GHz。为定量评估扫频质量,本文对测试数据进行了线性拟合分析。结果显示,其线性拟合优度 $1-r^2=2\times 10^{-5}$,均方根误差仅为2.74 MHz。上述测试结果充分表明,FMCW光源的三角波调频信号具备优异的线性度,对FMCW激光雷达测距分辨率影响可忽略不计^[17-18],能够完全满足FMCW激光雷达系统的实际测试与应用需求。

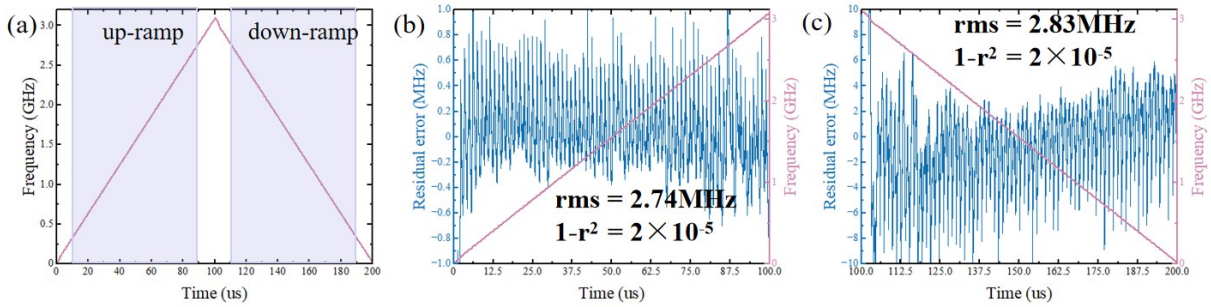


图6 (a)三角波调频信号 (b)上扫频线性拟合分析结果 (c)下扫频线性拟合分析结果

Fig.6 (a) Triangular wave frequency modulation signal (b) Up-swept linear fitting analysis result (c) Down-swept linear fitting analysis result

3.2 测距性能测试

图7(a)展示了系统的实际测距频谱。根据理论公式 $\Delta R=c/2B$ 可知,在当前扫频带宽下系统的理论测距分辨率为5 cm,而由实际测量频谱提取的距离分辨率为5.90 cm。实际分辨率的展宽主要源于光源扫频过程中存在的残余非线性,以及光电器件噪声与信号处理截断误差等综合因素^[19]。图8(a)显示,线性拟合优度 $R^2=0.99999$,这证明系统具备优异的测距一致性与距离标定准确性。在绝对测距误差(准度)方面,受限于真实距离标定过程中的空间三角测量误差以及系统残余非线性等因素,系统的最大绝对测距误差控制在2.82 cm以内。在测量稳定性(精度)方面,各距离点多次测量的结果分布近似服从正态分布;其测量结果的标准差均优于0.205 cm。综合测试

结果表明,激光器芯片具备窄线宽、高输出功率及高边模抑制比等优异特性,满足FMCW激光雷达系统对光源性能的要求,从而提高了系统的测距精度与稳定性,使系统能够实现更高精度和更可靠的距离测量。

3.3 测速性能测试

随后,本文对FMCW激光雷达系统的测速性能进行了实验评估。本次测试采用测量旋转目标表面切向速度的方式,并选取了五个不同的转速节点进行实验。如图8所示,测速结果的线性拟合优度 R^2 高达0.99891,表明系统实测速度与目标平均运动状态之间保持着极其稳定的线性比例关系。进一步的误差统计显示,系统的最大绝对测速误差(准度)低于0.00422 cm/s;同时,受转盘表面切向速度实际物理波动的主导影响,系统的

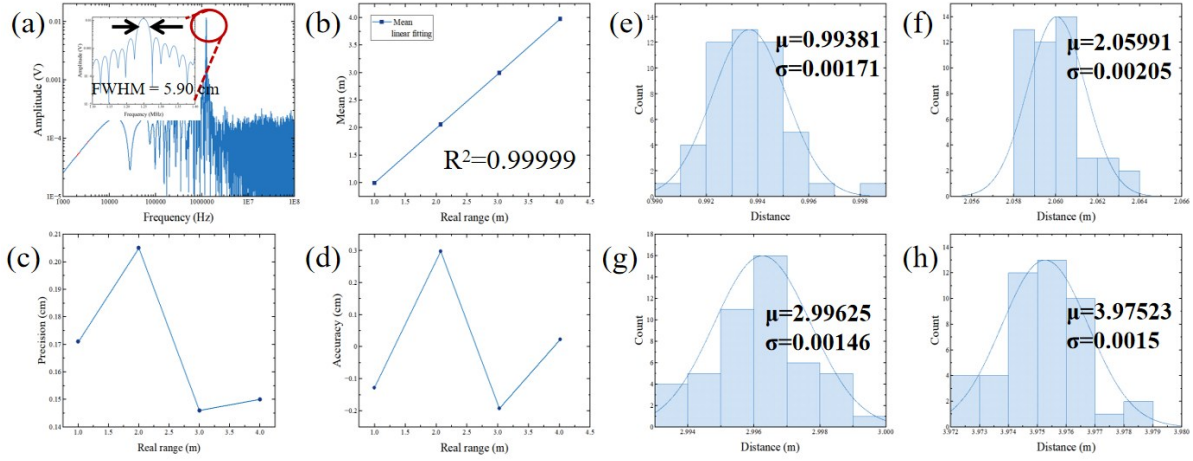


图7 (a)FMCW 雷达系统测距频谱 (b)测量距离与真实距离线性拟合 (c)测距精度 (d)测距准确度 (e)0.99m测距下测距分布 (f)2.05m测距下测距分布 (g)2.99m测距下测距分布 (h)3.97m测距下测距分布

Fig.7 (a)Ranging spectrum of FMCW radar system (b)Linear fitting between measured distance and real distance (c)Ranging accuracy (d)Ranging accuracy (e)Ranging distribution under 0.99 m Ranging (f)Ranging distribution under 2.05 m Ranging (g)Ranging distribution under 2.99 m Ranging (h)Ranging distribution under 3.97 m Ranging)

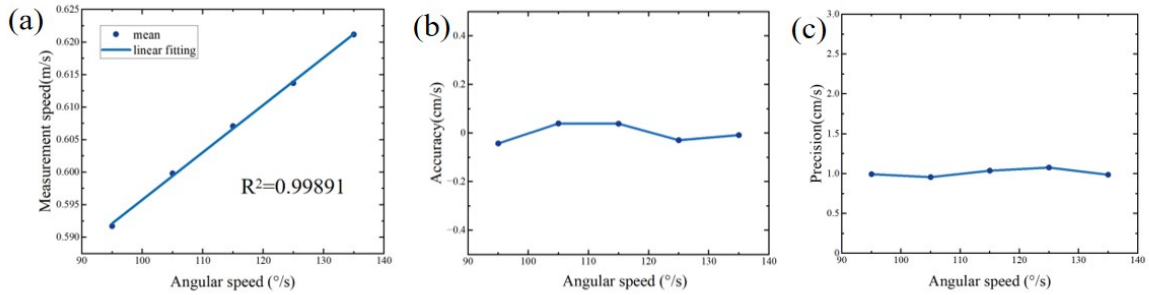


图8 (a)实际转速与测速线性拟合 (b)测速准确度 (c)测速精度

Fig.8 (a)Linear fitting of actual speed and speed measurement (b)Accuracy of speed measurement (c)Accuracy of speed measurement

测速标准差(精度)最大值控制在 1.076 cm/s 以内。上述详实的测试数据充分证明,综合测试结果表明,激光器芯片具有优异的性能指标,充分满足 FMCW 激光雷达系统的测试需求,从而保障了系统高精度、高可靠性测速的获取。

3.4 三维成像实验

三维成像能力是评价激光雷达系统综合探测性能的核心指标^[20]。为从宏观层面验证系统在复杂空间信息获取方面的能力,本文开展了目标场景的三维扫描成像实验。如图9所示,测试场景设置在纵深约 2.0 m 的空间内,由三个存在明显深度阶跃的层次构成:最前端距离约 1.7 m 的纸盒基底、固定于其上距离约 1.9 m 的字母 A 目标,以及距离约 2.0 m 的平整背景面。

实验重构的三维点云图像清晰地还原了目标

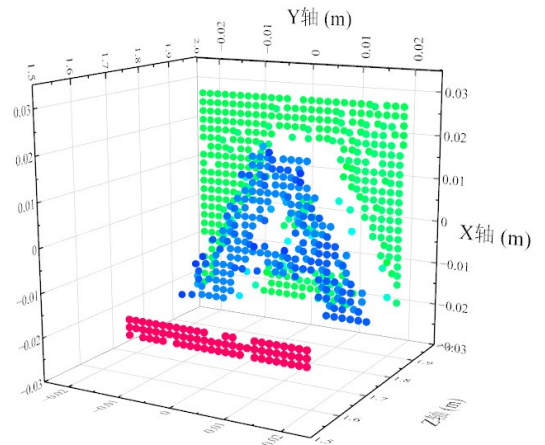


图9 三维扫描成像

Fig.9 Three-dimensional scanning imaging

场景的几何轮廓与空间拓扑结构。除目标边缘区域存在极少数的畸变点外,主体区域均实现了高

保真度的空间坐标重建,充分表明该系统具备优异的三维空间分辨与成像能力。针对物体边缘处出现的局部“点云粘连”现象,其核心物理机制在于混合像素效应:当具有一定空间尺寸的激光光斑扫掠过目标深度跳变边缘时,同一个光斑足迹会同时照射在前景物体与后方背景上。这导致探测器接收到的干涉回波中同时混叠了对应不同距离的中频拍频信号分量。这种频谱的多峰干扰会导致局部信噪比劣化,进而使峰值提取算法产生空间位置解算偏差。

4 结 论

针对 FMCW 激光雷达对兼具窄线宽、高边模抑制比及高输出功率单频激光器的需求,本

文设计并实现了一种基于 SOA 与氮化硅波导芯片混合集成的窄线宽外腔激光器。该激光器实现了 0.628 kHz 的有效洛伦兹本征线宽,边模抑制比高达 58 dB,表现出优异的单频输出特性和频率稳定性。在此基础上,搭建了 FMCW 激光雷达实验系统,并开展了目标物体的测距、测速及三维成像实验。实验结果表明,所设计的外腔激光器能够良好满足 FMCW 激光雷达系统的工作需求,在测量精度、抗干扰能力及复杂场景适应性等方面均表现出显著优势。相关结果验证了该窄线宽外腔激光器作为 FMCW 激光雷达光源的可行性与优越性,为系统的高精度测量及工程化应用提供了一种可靠的高性能光源方案。

参 考 文 献:

- [1] Li Y, Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2020, 37(4): 50-61.
- [2] Roriz R, Cabral J, Gomes T. Automotive LiDAR technology: A survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(7): 6282-6297.
- [3] Zhou J. A review of LiDAR sensor technologies for perception in automated driving[J]. *Academic Journal of Science and Technology*, 2022, 3(3): 255-261.
- [4] Gao F, Qin L, Chen Y, et al. Study of gain-coupled distributed feedback laser based on high order surface gain-coupled gratings[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 936-940.
- [5] Xiang M, Zhang Y, Li G, et al. Wide-waveguide high-power low-RIN single-mode distributed feedback laser diodes for optical communication[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30187-30197.
- [6] Lu Q, Zhang Y, Liu C, et al. High-performance PCW-DFB laser diodes using offset quantum well epitaxial structures [J]. *Optics Express*, 2024, 32(6): 9562-9572.
- [7] 袁庆贺,张娜玲,张秋月,等. 808 nm 窄线宽分布反馈半导体激光器[J]. *激光与红外*, 2025, 55(11): 1676-1679. \n YUAN Q H, ZHANG N L, ZHANG Q Y, et al. 808 nm narrow linewidth distributed feedback semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 55(11): 1676-1679. \n
- [8] Slight T J, Stanczyk S, Watson S, et al. Continuous-wave operation of (Al, In) GaN distributed-feedback laser diodes with high-order notched gratings[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(11): 112701.
- [9] Hai Y, Zou Y, Fan J, et al. Narrow-linewidth surface-emitting distributed feedback laser emitting from P-surface[J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126499.
- [10] Xu Y, Wang M, Qu H, et al. Narrow-linewidth semiconductor laser with high-order sidewall gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 35(2): 85-88.
- [11] . Xu Y, Fu T, Fan J, et al. High-power supersymmetric semiconductor laser with a narrow linewidth[C]//*Photonics. MDPI*, 2023, 10(3): 238.
- [12] Sheng M W, Hao Y Z, Wang W, et al. Narrow linewidth laser based on a sidewall grating active distributed Bragg reflector[J]. *Optics Express*, 2024, 32(7): 12012-12023.
- [13] Guo J, Xiang C, Morin T J, et al. E-band widely tunable, narrow linewidth heterogeneous laser on silicon[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(4).
- [14] 闫运浩,柴聪鹏,曹波涛,等. 基于 1.5 μm 体布拉格光栅的外腔半导体激光器研究[J]. *激光与红外*, 2025, 55(9): 1345-1351.

- YAN Y H, CHAI C P, CAO B T, *et al.* Research on external cavity semiconductor laser based on 1.5 μm volume Bragg grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 55(9): 1345-1351.
- [15] 唐瑞云, 姜龙飞, 罗福宾, 等. 可调谐高功率窄线宽双波长激光器[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-12[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260305.1558.028>.
- TANG R Y, JIANG L F, LUO F B, *et al.* Tunable high power narrow linewidth dual wavelength laser [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1-12[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260305.1558.028>.
- [16] Tang L, Jia H, Shao S, *et al.* Hybrid integrated low-noise linear chirp frequency-modulated continuous-wave laser source based on self-injection to an external cavity[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1948-1957. Zhang X, Pouls J, Wu M C. Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR[J]. *Optics express*, 2019, 27(7): 9965-9974.
- [17] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, *et al.* Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements[J]. *Optics letters*, 2013, 38(12): 2026-2028.
- [18] Pinto L C P, Medeiros M C R. Enhanced high-resolution and long-range FMCW LiDAR with directly modulated semiconductor lasers[J]. *Sensors*, 2025, 25(13): 4131.
- [19] Wang S, Lin Z, Wang Q, *et al.* High-Performance Integrated Laser Based on Thin-Film Lithium Niobate Photonics for Coherent Ranging[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(10): 2400224.
- [20] Tran M A, Huang D, Guo J, *et al.* Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(2): 1-14.



王玉冰(1989-), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2017年于中国科学院半导体研究所获得博士学位, 主要从事激光雷达的研究。

E-mail: wangyubing@ciomp.ac.cn



侯铁峰(2001-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 2024年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事激光雷达的研究

E-mail: houtiefeng24@mails.ucas.ac.cn