

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2020.01.003

基于端面耦合的InP基激光器/硅光波导混合集成技术研究

王 艳^{1,2}, 王东辰², 徐鹏霄², 唐光华², 尤国庆², 孔月婵^{1,2}

(1. 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 南京 210016; 2. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘 要: 针对硅光子集成电路缺少实用化光源的问题, 提出了一种 1.55 μm 波段 InP 基 FP 激光器芯片、InP 基 PIN 光电探测器芯片与硅光波导芯片集成模块的设计与制备方法。使用 CMOS 工艺兼容的硅光无源器件制备工艺, 设计并制备了倒拉锥型端面耦合器, 与锥形透镜光纤耦合效率为 36.7%。采用微组装对准技术将激光器芯片与硅波导芯片耦合、UV 固化胶固化后耦合效率为 35.8%, 1 dB 耦合对准容差横向为 1.2 μm , 纵向为 0.95 μm 。

关键词: InP 基激光器; 硅光波导; 端面耦合; 混合集成

中图分类号: TN256; TN491 文献标志码: A 文章编号: 1005-488X(2020)01-0013-06

Hybrid Integration of InP FP Laser / Silicon Optical Waveguide Based on Silicon Edge Coupler

WANG Yan^{1,2}, WANG Dongchen², XU Pengxiao², TANG Guanghua², YOU Guoqing²,
KONG Yuechan^{1,2}

(1. *Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing 210016, CHN*; 2. *The 55th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN*)

Abstract: To solve the problem of practical light source lacking in silicon photonic integrated circuit, design and preparation method of integrated module including 1.55 μm InP FP laser chip, InP PIN photodetector chip and silicon optical waveguide was proposed. Silicon edge coupler of inverted cone type was fabricated by CMOS compatible process, and the coupling efficiency was 36.7%. The laser chip and silicon waveguide chip were coupled by micro-assembly alignment technology, and the coupling efficiency was 35.8% after UV adhesive curing. The 1 dB alignment tolerance was 1.2 μm horizontally and 0.95 μm longitudinally.

Key words: InP-based laser; silicon-based optical waveguide; edge coupler; hybrid integration

收稿日期: 2019-12-28

作者简介: 王 艳(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电集成方向的研究; (E-mail: 274551507@qq.com)

王东辰(1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电探测和光电集成方向的研究;

徐鹏霄(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事真空-半导体混合型光电器件和光电集成方向的研究。

引 言

硅基光子技术因其可以利用成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)制备工艺获得了极大的关注^[1],小尺寸、高性能的硅基无源器件和基于SiGe工艺的光电探测器已有较多报道^[2-7]。体硅材料作为间接带隙半导体,发光效率极低^[8]。目前硅基光泵浦同质光源已有报道,如在硅材料上发光的硅基拉曼激光器^[9]、光泵浦硅纳米晶激光器^[10]等,而电抽运的实用化激光光源仍是硅光子集成电路的瓶颈。利用Ⅲ-V族激光器与硅光波导进行异构集成获得了国内外的广泛关注,国外美国Intel公司、加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)、加州理工学院(MIT)、比利时根特大学、日本NEC公司和东京大学等研究机构已有较大突破^[11-12],国内中科院半导体所、中科院微电子所、北京大学、中国电科55所和中国电科44所等科研机构也开展了相关研究^[13-14],与国外在性能方面尚存在较大差距,也限制了国内光电集成领域的总体发展。

利用工艺较为成熟的Ⅲ-V族激光器,采用直接端面耦合^[15]或倒装键合的方式^[16]与绝缘衬底上的硅衬底(Silicon-on-Insulator, SOI)进行异构集成,是目前工程化的主要解决方案。文中基于直接端面耦合技术与超薄层BCB键合技术,提出了一种InP基FP激光器芯片与硅光波导芯片集成结构的设计与制备方法。该方法利用成熟的InP基FP激光器、InP基光电探测器和CMOS工艺兼容的硅光波导,实现了1.55 μm波段硅基异构集成光源。文章详细介绍了倒拉锥型硅基端面耦合结构设计及制备方法、激光器-硅基光波导对准固化工艺等,并对该集成器件波长、功率等性能进行了测试分析。

1 实 验

激光器与硅光波导耦合示意图见图1。在硅片上分别制作端面耦合器、光栅耦合器,用于InP基激光器与硅光波导以及硅光波导与InP基PIN光电探测器的耦合,其中光电探测器将起到光电转换和激光器/硅光波导耦合效率在线监测的作用。

图2为硅基端面耦合器示意图。如图所示为倒拉锥型^[7]光波导结构,通过一段长度为80 μm的宽度渐变结构,由500 nm宽波导在芯片边缘缩窄至150 nm,硅光波导中的传播模式通过该段锥形波导结构,光场会逐渐地扩散至包裹的二氧化硅层中,从

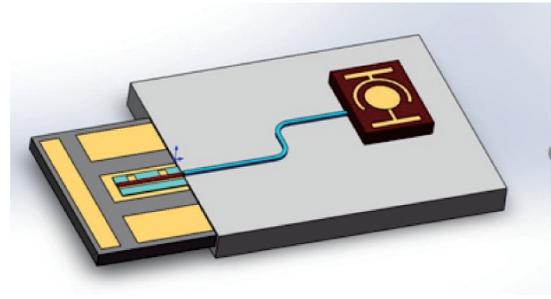


图1 激光器-硅波导耦合示意图

Fig.1 Schematic of silicon waveguide coupling with laser

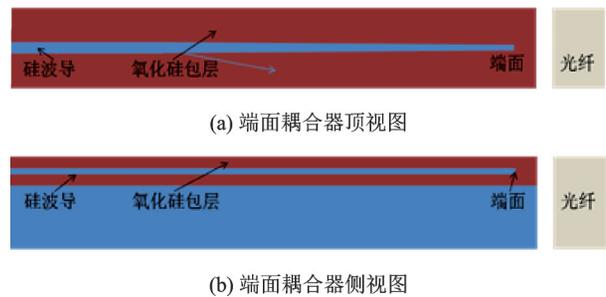


图2 硅基端面耦合器示意图

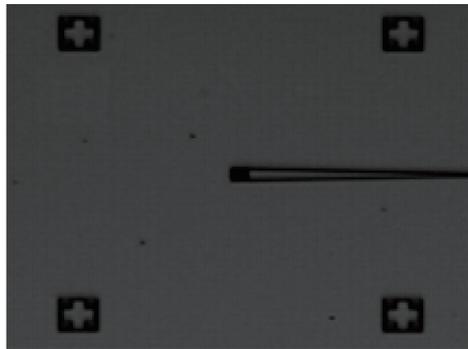
Fig.2 Schematic of silicon edge coupler

而在芯片边缘的模场尺寸放大到单模光纤纤芯尺寸量级,有效地实现了模场转换功能,使得端面的模场与光纤模场具有较高的耦合效率。

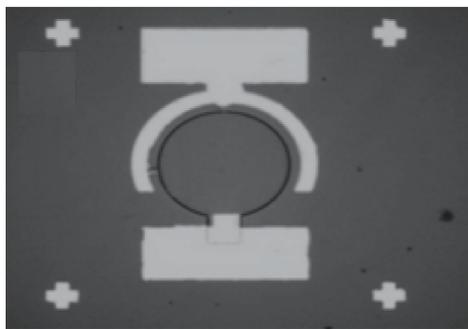
硅光波导芯片制备工艺如下:首先采用电子束光刻机(Vistec EBPG 5200)光刻出全刻蚀的波导和倒拉锥结构,使用ZEP520作为电子束光刻胶。然后通过电感耦合等离子体反应离子刻蚀机(ICP-RIE)在顶硅层刻蚀出波导和倒拉锥结构。采用电子束光刻技术光刻出浅刻蚀的光栅图形,使用ICP-RIE刻蚀机在硅层刻蚀出光栅,采用等离子体增强化学气相沉积技术(PECVD)沉积2 μm的氧化硅层。利用化学机械抛光技术(CMP)将硅光芯片背面减薄,芯片总厚度减薄至300 μm。利用紫外光刻机和基于CHF₃气体的ICP-RIE深硅刻蚀机制作出深300 μm宽1 mm的沟槽。得到如图1所示的具有端面水平耦合器、硅光波导、光栅垂直耦合器的硅光无源芯片。硅光芯片端面测试仪器为扫描电子显微镜,InP基激光器光波长测试仪器为近红外波段光谱仪,激光器/硅光波导芯片耦合平台为六轴精密对准测试平台。

使用苯并环丁烯(BCB)在光栅位置贴上光电探测器InP基PIN光电探测器集成工艺如下:在硅光波导光栅制作时,光栅四周制作十字对准标记,同时使用紫外双面对准光刻机在探测器的正面和背面对应位置分别制作十字对准标记,贴片时保证

探测器的十字对准标记与光栅四周的对准标记对准。使用BCB在光栅位置贴上光电探测器,按照BCB:稀释剂=1:1,转速3000转的旋涂条件,在硅片上旋涂一层400 nm厚的键合层,使用倒装贴片机将探测器键合在硅光芯片上^[18],如图3所示。



(a) 硅基光栅SEM照片



(b) InP基光电探测器显微镜照片



(c) 硅基光栅-InP基光电探测器键合结构SEM照片

图3 硅基光栅-InP基光电探测器键合图

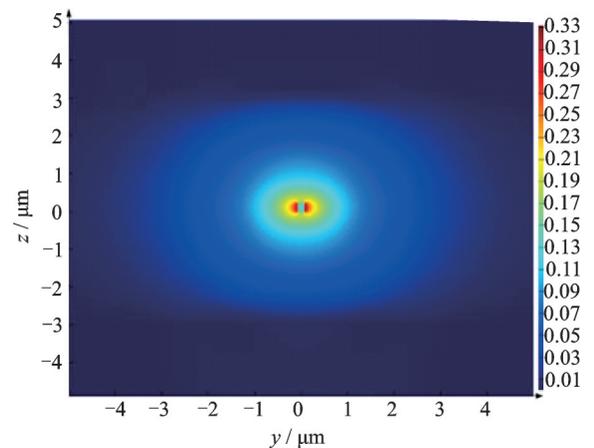
Fig.3 Bonding graph of grating coupler and photodetector bonding

使用导电胶将InP基激光器键合在载片上,将电极打丝引出。使用六维调节架调整激光器位置,如图1所示,粗调使激光器脊波导与硅波导端面对准,寻找光电探测器接收到的光功率最强位置,即光电探测器的输出光电流最大位置。然后,在激光器与硅光波导接触面上涂上一层UV固化胶,再次微调激光器位置,调整好位置后,使用紫外灯分阶

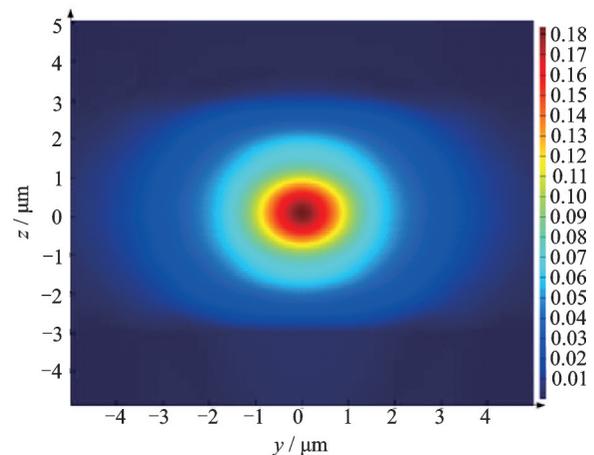
段照射UV固化胶,使其固化,实现激光器与硅波导芯片键合。

2 结果与讨论

使用FDTD(时域有限差分方法)对端面耦合结构进行仿真,硅波导上覆盖的SiO₂厚度2 μm,折射率为1.45;倒拉锥硅光波导结构参数为:长度80 μm、宽度由500 nm渐变至150 nm。仿真结果如图4所示,图4(a)为150 nm宽波导端面处的模场图,模场面积约4×4 μm²,由于端面处硅波导过窄,无法将光限制在硅波导中,硅光波导中的光扩散到二氧化硅包层中,图4(b)为150 nm宽波导端面外1 μm处的模场图,模场面积约为5×5 μm²,此时的光被限制在二氧化硅包层中。



(a) 端面处模场图



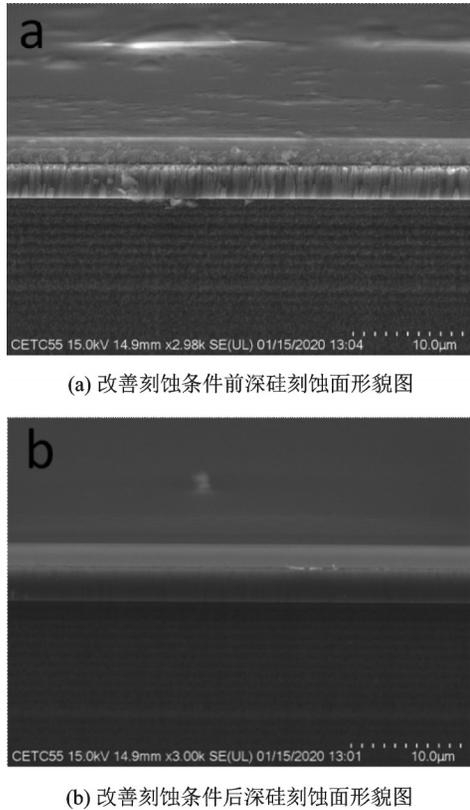
(b) 端面外1 μm处模场图

图4 端面耦合结构模场仿真结果图

Fig.4 Field simulation results of edge coupler structure

图5(a)为扫描电子显微镜下深硅刻蚀面形貌图。使用纤芯直径为4 μm的锥形透镜光纤测得端面耦合效率为19.9%,这是由于刻蚀时基台温度较

高,导致端面耦合器的端面刻蚀比较粗糙,耦合效率较低。改善刻蚀条件,将基台温度稳定在 20 °C,刻蚀面形貌改善,如图 5(b)所示。此时使用光斑尺寸为 4 μm 的锥形透镜光纤测量的端面耦合效率为 36.7 %。



(a) 改善刻蚀条件前深硅刻蚀面形貌图

(b) 改善刻蚀条件后深硅刻蚀面形貌图

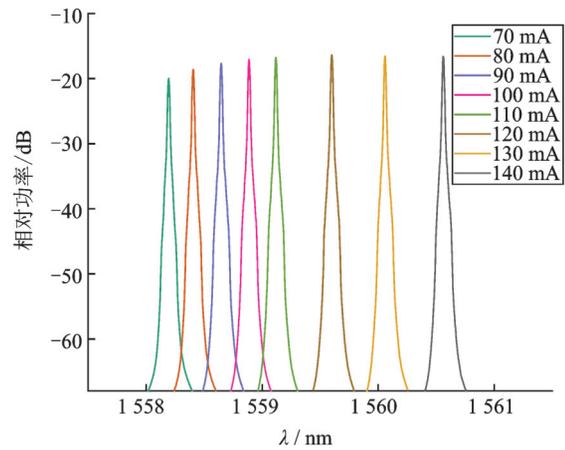
图 5 深硅刻蚀面形貌图

Fig. 5 Topographies of deep silicon etching surface

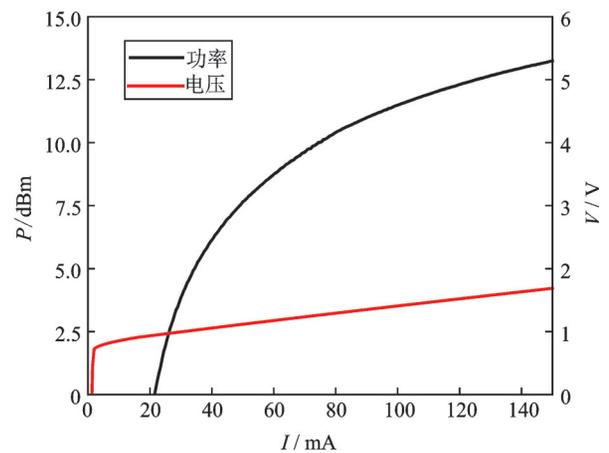
图 6(a)是激光器的光谱图,可以看出,增大激光器的注入电流,激光器的输出波长向长波长方向移动。由于光栅对于不同波长的光具有不同的出射角,因此,改变激光器注入电流时,需要不断调整测试光纤角度,为解决这一问题,在光栅上贴上一个光电探测器收集光栅出射的光,将光栅的出射光功率转换成探测器光电流。图 6(b)是激光器的 $P-I$ 曲线,注入电流 78 mA 时,输出功率为 10 mW。

InP 基 PIN 光电探测器/硅光波导耦合工艺与测试结果在本课题组已发表论文中有详细描述。经测试,探测器的响应度为 0.95 A/W,光栅至探测器耦合效率 CE_{WP} 为 39 %^[18]。已知光栅至探测器的耦合效率 CE_{WP} 、探测器的响应度 R_e 、探测器的输出光电流 PIN 根据式(1)进行计算,可以得到波导到光栅的输出光功率 P_{FC} 。

$$P_{FC} = \frac{P_{IN}}{R_e \times CE_{WP}} \quad (1)$$



(a) InP 激光器的光谱图



(b) 激光器的 $P-I-V$ 曲线

图 6 InP 激光器光谱图及 $P-I-V$ 曲线

Fig. 6 Spectra and $P-I-V$ graph of InP based laser

将激光器贴到一载片上,给激光器加上一固定电流(78 mA),此时激光器的输出功率为 10 mW,通过调节二维调节架调整激光器位置,使激光器出光口与硅波导端面对准,使得光栅接收到的光功率最强,探测器的光电流最大为 1.35 mA,由式(1)计算得出,此时波导到光栅的输出光功率为 3.64 mW,使用 cut-back 方法测得波导传输损耗约 2.2 dB/cm^[17],波导长度为 250 μm,波导损耗为 0.055 dB,得到激光器-硅波导端面的耦合效率为 37.1 %,该结果与 4 μm 单模光纤测试数据相符。增加激光器的注入电流,激光器的输出功率增大,探测器的光电流随激光器输出功率的增加而增加,如图 7(黑色)所示。使用紫外灯分阶段照射 UV 固化胶,UV 胶固化后激光器-硅光波导芯片位置固定,如图 8 所示,此时的探测器的响应光电流随激光器的注入电流的变化曲线如图 7(红色)所示,固化后探测器响应的光电流降低,这是由于 UV 胶热膨胀导致激光器位置发生微小偏移从而使激光器-硅光波导耦合

效率降低。固化后激光器注入电流为 78 mA 时,探测器的光电流最大为 1.30 mA,此时波导到光栅的输出光功率为 3.51 mW,激光器-硅波导端面的耦合效率为 35.8%,UV 固化引入耦合效率恶化系数为 0.15 dB。

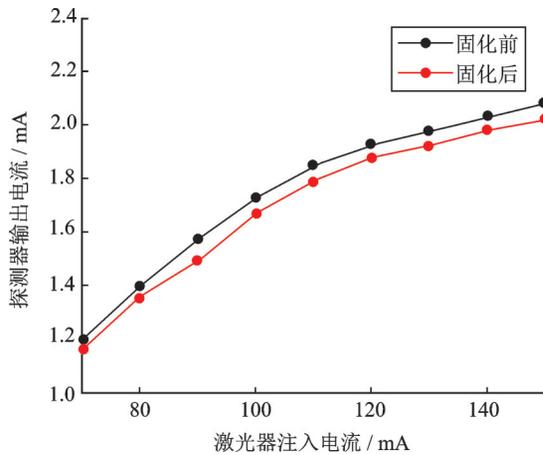


图7 探测器输出电流随激光器注入电流变化曲线

Fig.7 Change curves of detector output current with laser input current

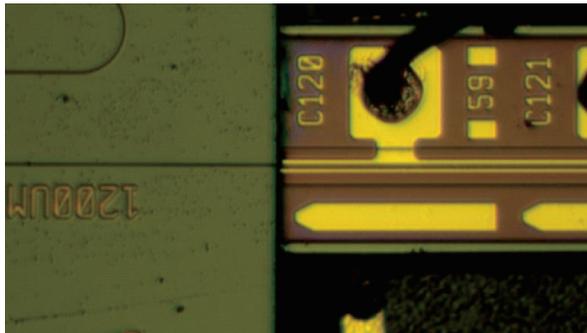


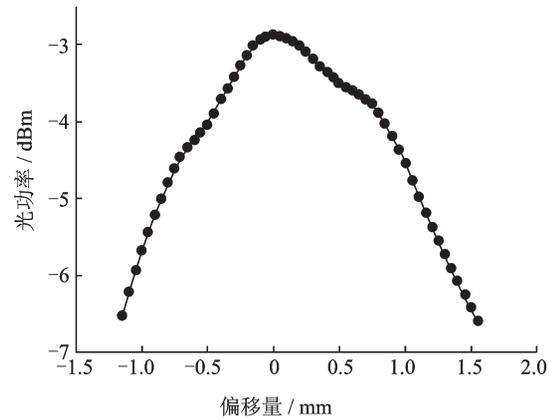
图8 激光器-硅光波导芯片键合图

Fig.8 Bonding graph of laser and silicon waveguide

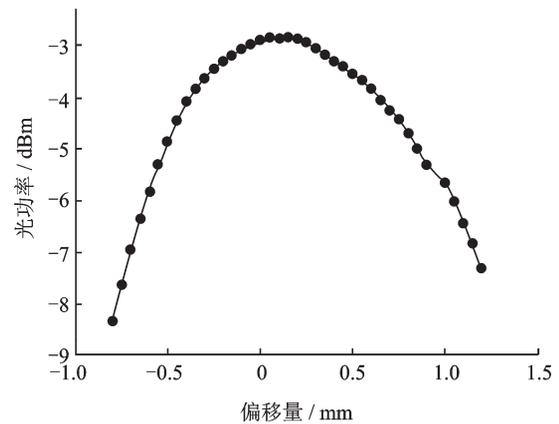
针对 InP 基激光器与硅光波导端面耦合工艺,分别测试了横向方向(X轴)和纵向方向(Y轴)工艺容差。如图 9(a)所示,经拟合计算,横向方向容差约为 $1.2 \mu\text{m}$ (1 dB)、 $2.4 \mu\text{m}$ (3 dB);如图 9(b)所示,纵向方向容差 $0.95 \mu\text{m}$ (1 dB)、 $1.7 \mu\text{m}$ (3 dB)。

3 结 论

通过设计与制备硅基光波导、倒拉锥端面耦合器、光栅耦合器,使用硅基异构集成的 InP 基 PIN 光电探测器作为输出功率监测器,实现了 InP 基 FP 激光器与硅基光波导的对准与耦合,耦合效率为 35.8%,同时研究了该结构下激光器耦合 1 dB 对准工艺容差,横向为 $1.2 \mu\text{m}$,纵向为 $0.95 \mu\text{m}$ 。研究结



(a) X轴工艺容差曲线



(b) Y轴工艺容差曲线

图9 工艺容差曲线

Fig. 9 Curves of process tolerance

果为进一步提高硅基光源耦合效率、实现硅基多器件、多功能光电集成提供了可参考的依据。

参 考 文 献

- [1] Bogaerts W, Baets R, Dumon P, et al. Nano photonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology [J]. *Lightwave Technol*, 2005, 23:401-412.
- [2] Dumon P, Bogaerts W, Wiaux V, et al. Low-loss SOI photonic wires and ring resonators fabricated with deep UV lithography [P]. *Photon. Technol. Lett*, 2004, 16:1328-1331.
- [3] Sasaki K, Ohno F, Motegi A, et al. Arrayed waveguide grating of $70 \times 60 \mu\text{m}^2$ size based on Si photonic wire waveguides [J]. *Electron Lett.*, 2004, 41:801-802.
- [4] Yue Y, Zhang L, Yang J Y, et al. Silicon-on-insulator polarization splitter using two horizontally slotted waveguides [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9):1364-1366.
- [5] Halir R, Cheben Pavel, González Luque, et al. Ultra-broadband nano photonic beam splitter using an anisotropic sub-wavelength metamaterial [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6):1039-1046.
- [6] Ahn D, Hong C Y, Liu J, et al. High performance, waveguide integrated Ge photodetector [J]. *Opt. Express*, 2007, 15:3916-3921.

- [7] Cardenas J, Poitras C B, Luke K, et al. High coupling efficiency etched facet tapers in silicon waveguide [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2014, 26 (23):2380-2382.
- [8] Pavesi L. Routes toward silicon-based lasers [J]. Materials Today, 2005, 8(1):18-25.
- [9] Rong H, Jones R, Liu A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser [J]. Nature, 2005, 433(7027):725-728.
- [10] Wang D C, Zhang C, Zeng P, et al. An all-silicon laser based on silicon nanocrystals with high optical gains [J]. Science Bulletin, 2018, 63:75-77.
- [11] Hong T, Ran G, Chen T, et al. A selective-area metal bonding InGaAsP-Si laser [J]. IEEE Photonic Tech. L., 2010, 22 (15):1141-1143.
- [12] Fang A W, Park H, Cohen O, et al. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. Optics Express, 2006, 14(20):9203-9210.
- [13] Zhou Z P, Gao D S, Wang Y, et al. Progress on Si-based optoelectronic devices and integration [J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2012, 49(9):090003.
- [14] Chu T, Fujioka N, Ishizaka M. Compact, lower-power-con-
- sumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic wire waveguide micro-ring resonators [J]. Optics Express, 2009, 17(16):14063-14068.
- [15] Tanaka S, Jeong S H, Sekiguchi Shigeaki, et al. High-output-power, single-wavelength silicon hybrid laser using precise flip-chip bonding technology [J]. Optics Express, 2012, 20(27):28057-28069.
- [16] Stankovic S, Jones Richard, Sysak Matthew N, et al. Hybrid III-V/Si distributed-feedback laser based on adhesive bonding [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2012, 24 (23):2155-2158.
- [17] Wang X D, Quan X L, Liu M, et al. Silicon-nitride-assisted edge coupler interfacing with high numerical aperture fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(5):349-351.
- [18] Wang Y, Wang D C, Xu P X, et al. Ultra-thin benzocyclobutene bonding of InGaAs PIN photodetector onto silicon photonic chip [C]. Proc. of SPIE Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application, Beijing, China, 2019:838.

(上接第5页)压缩激光脉宽、消除高压脉冲对控制电路的干扰问题,可将条纹像的时间抖动控制在 ns 量级,达到 cm 级的距离分辨能力,与系统高空间分辨率相匹配,结合多维度图像融合算法,可实现对水下小目标的成像与识别。

4 结 论

条纹管激光雷达具有非扫描激光雷达的诸多性能优点,系统集成度高,成像速率与保真度高,其独特的探测机理决定了系统具有极高的时间解析能力与距离分辨能力,探测视场大,图像分辨率高,可实现全景快照生成多维度图像并与其他图像进行融合处理,关键器件发展日益成熟可靠,已在激光主动高分辨 3D 成像、目标识别、制导、测绘、搜索、侦察等领域获得广泛关注和研究,尤其是在水下探测领域具有独特的应用优势,国外已有相关装备投入应用。

基于条纹管探测体制设计了原理样机,通过理论分析与试验测试,实现对地面大目标和水下金属架小目标的成像探测,获得了目标距离、灰度与 3D 像,在样机技术参数未充分优化的情况下,水下目标探测距离接近 18 m,距离分辨率为 0.1 m,20 m 远的空间分辨率优于 5 cm。通过进一步优化设计参数,可提高系统综合性能,使探测距离增大一倍并达到 cm 级的距离分辨率,满足水下目标识别的要求,为激光高分辨快速 3D 成像应用提供一个重要技术途径。

参 考 文 献

- [1] Knight F K. Three dimensional imaging using a single laser pulse [J]. Proc. SPIE, 1989, 1103: 174-189.
- [2] Gelbart Asher, Redman Brian C, Light Robert S, et al. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar [J]. Laser Radar Technology and Applications VII, SPIE, 2002, 4723: 9-18.
- [3] Gelbart Asher, Webera Chris, Bybee-Driscolla Shannon, et al. Flash lidar data collections in terrestrial and ocean environments [J]. Proc. SPIE, 2003, 5086:27-38.
- [4] Todd Holmesa V, Wrighta James A, Mc Carley Karen A, et al. Lidar signatures of very shallow water and surf zone mines [J]. Proc. SPIE, 2003, 5089:285-295.
- [5] 王葵,石吟馨,李拂晓,等,一种用于激光成像雷达的条纹管研制 [J]. 光电子技术, 2013, 33(3):152-154.
- [6] 田进寿,白永林,刘百玉,等,飞秒条纹变相管的设计 [J]. 光子学报, 2006, 35(12):1832-1836.
- [7] 孙剑峰,郝键,魏靖松,等,条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5):811-814.
- [8] 赵文,韩绍坤. 条纹管成像激光雷达距离分辨率 [J]. 中国激光, 2013, 40(7):214-219.
- [9] Morrison Ryan A1a, Jeffrey T Turnera, Mike Barwick, et al. Urban reconnaissance with an airborne laser radar [J]. Laser Radar Technology and Applications X. SPIE, 2005, 5791: 6-13.
- [10] Ricklin J C, Tomlinson P G. Active imaging at DARPA [J]. Proc. SPIE, 2005, 5895: 1-9.
- [11] Murray James T, Moran Steve E, Roddier Nick, et al. Advanced 3D polarimetric flash lidar imaging through foliage [J]. Proc. SPIE, 2003, 5086: 84-95.
- [12] Ma Longxiao, Han Shaokun, Ma Chenning. A method to obtain distance resolution information based on streak-tube camera [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7513: 751320-1-751320-7.