

激光与光电子学进展

面向激光测距的大功率混沌激光

郭一岩¹, 贾志伟^{1,2*}, 赵爱忠¹, 王安帮¹, 李璞¹, 张建国¹, 赵彤¹¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024;²中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083

摘要 面向混沌激光测距对大功率混沌激光的需求,利用半透半反镜提供光反馈,使波长 1530 nm 的宽脊大功率半导体激光器(SL)产生了大功率自由空间混沌激光。同时,正是由于其多横模光束,混沌激光的时延特征被抑制,消除了时延特征对混沌激光测距的干扰。随着 SL 驱动电流的增大,时延特征被逐步抑制,但是弛豫振荡特征只在一定的电流区间被抑制。然后,详细研究了不同透射/反射比例下,周期性特征抑制的电流区间和相应的输出激光功率,最终产生了平均功率为 440 mW、自相关主峰半峰全宽为 0.07 ns、旁瓣峰水平为 -6.3 dB 的混沌激光。该研究工作为混沌激光测距提供了一种结构简单、低成本、高性能的混沌激光光源。

关键词 激光光学; 混沌激光; 激光测距; 大功率; 抗干扰

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2114004

High-Power Chaotic Laser for Laser Ranging

Guo Yiyang¹, Jia Zhiwei^{1,2*}, Zhao Aizhong¹, Wang Anbang¹, Li Pu¹,Zhang Jianguo¹, Zhao Tong¹

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

²Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract High-power free space chaotic laser is generated by a 1530 nm wide-ridged high-power semiconductor lasers (SL) with optical feedback. The multi-transverse-mode output beam result in the suppression of time-delay signature (TDS), eliminating the TDS's interference on the chaotic laser ranging. As the SL drive current increases, the TDS is gradually suppressed, but the relaxation oscillation signature is suppressed only in some current range. The current range and corresponding output laser power at different transmission/reflection ratios of beam splitter are investigated in detail. A chaotic laser with average power of 440 mW, the autocorrelation main peak half-height width of 0.07 ns, and the peak side lobe level of -6.3 dB is generated. This paper provides a chaotic laser source with simple structure, low cost, and high performance for chaotic laser ranging.

Key words laser optics; chaotic laser; laser ranging; high-power; anti-interference

1 引言

混沌激光是一种强度随时间呈现随机、快速振荡的特殊激光状态^[1-3],具有宽带频谱、类噪声等特性^[4-5]。以混沌激光作为光源的混沌激光测距技术具有与生俱

来的抗干扰特性和 cm 量级的测距精度^[6-8],是研制抗干扰激光雷达的优选技术方案。相比于脉冲体制激光测距,混沌激光测距技术的信噪比要低得多,严重限制了混沌激光测距的长距离应用^[9]。混沌激光的功率不高(一般为 mW 量级)是造成信噪比低的一个重要

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-07-13; 录用日期: 2022-07-20

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803500)、国家自然科学基金(61805168)、山西省自然科学基金(202103021231853, 201801D22118)、山西省回国留学人员科研资助项目(2021-032)、山西省重点研发国际合作项目(201903D421012)、山西省“1331 工程”重点创新团队项目

通信作者: *jiazhiwei@tyut.edu.cn

原因。

半导体激光器(SL)具有体积小、电光转化效率高、易于集成的特点^[10-12],是激光雷达应有的优选光源,也是当前产生混沌激光最常用的激光光源^[13-14]。混沌激光产生最为常用的技术方案是给SL提供一个外腔光反馈使SL进入混沌状态^[15-16],这种方案具有结构简单、只用到一支SL、混沌控制方便的优点,但是所产生的混沌激光中包含了与外腔时延一致的周期性振荡成分,称为时延特征,给混沌激光测距带来干扰。利用光纤光栅分布式反馈^[17]、光注入^[18-19]等技术方案能够抑制时延特征,但是相关工作均基于光纤光路和小功率半导体激光器^[20-23],不适用于用作激光雷达光源。

目前为止,大功率、时延特征抑制的自由空间混沌激光光源仍未见报道。因此,产生高功率、时延特征抑制的混沌激光,对于实现长距离、抗干扰的混沌激光测距至关重要。

现有混沌激光功率不高的原因在于,为了获得较高的光反馈效率,要求SL具有基横模圆形光斑,即SL的增益区脊宽必须为2~5 μm,如此窄脊的增益区,必然导致所能输出激光的功率不高。通过增大SL增益区面积,半导体激光器能够实现高达29.5 W的高功率输出^[24],但是,会不可避免地出现多横模工作状态^[25-27],恶化输出光束质量。实际上,脉冲激光雷达常采用宽脊大功率SL作为光源,也就是说,宽脊SL的光束质量恶化并不影响激光测距应用。同时,多横模光束在光反馈结构中实现类似于分布式反馈的效果,

有望实现时延特征抑制。

本文采用一支波长1530 nm的宽脊大功率SL,利用半透半反镜(BS)提供光反馈,产生了大功率、时延特征抑制的自由空间混沌激光。研究发现,光反馈宽脊SL产生的混沌激光振荡中,包含有明显的外腔周期性成分和弛豫振荡周期性成分。固定反馈强度,随着驱动电流的增加,外腔周期性成分逐渐被抑制,而弛豫振荡周期性成分则先被抑制,而后又出现。选择不同透射率与反射率比例(简称透反比)的半透半反镜,详细研究了不同反馈强度下,弛豫振荡特征抑制的电流区间和输出功率,并选取透反比为40/60、SL驱动电流为3.5 A,产生了平均功率为440 mW、旁瓣峰水平为-6.3 dB的混沌激光。进而,进行了简单测距实验,验证了其抗干扰、高分辨特性,测距分辨率达到1.1 cm。

2 实验装置

本研究所使用的宽脊大功率SL为商用的多模法布里-珀罗(F-P)腔激光二极管(L1550G1, Thorlabs, 美国)^[28]。图1(a)给出了该激光器在25 °C下的功率-电流-电压($P-I-V$)曲线,激光器阈值电流为0.68 A,标称最大工作电流为4 A,在0.68~4 A范围内,输出光平均功率随电流呈线性增长,最大输出功率可达1.1 W。图1(b)给出了激光器在不同电流下的输出光谱,在低电流 $1.18I_{th}$ 时中心波长约为1525 nm,多个激光模式共存,随着偏置电流增加,激光模式的数量逐渐增多,中心波长不断红移。与普通窄脊F-P SL不同,宽脊大

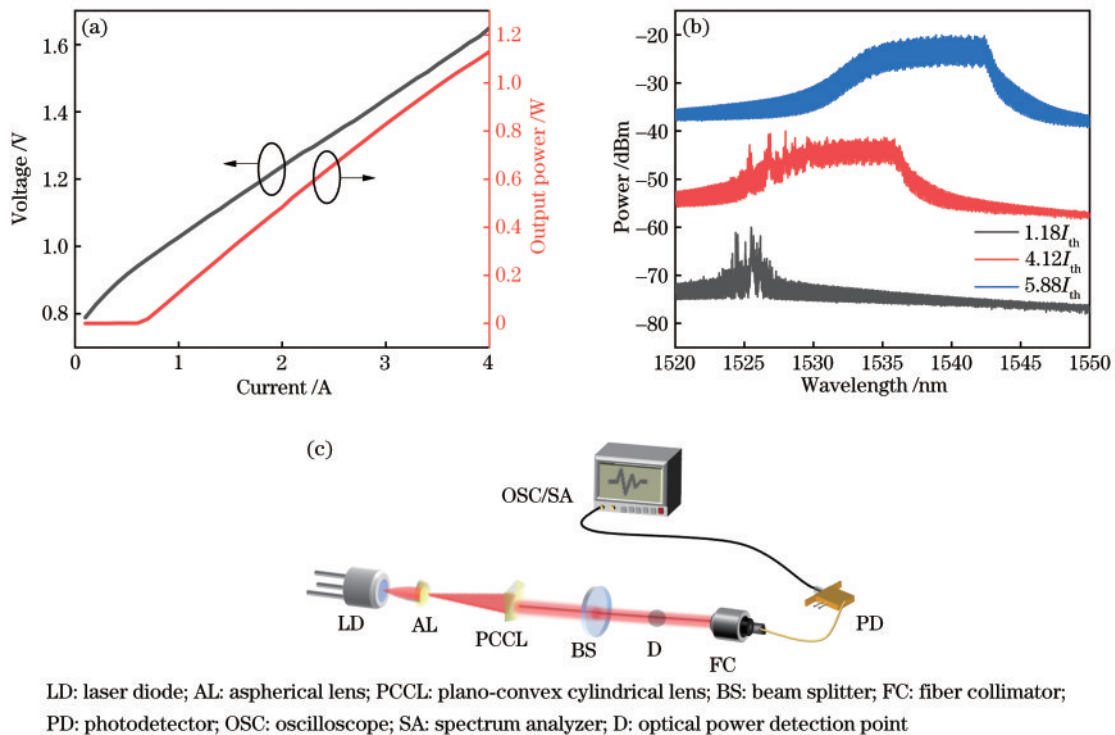


图1 实验装置图和结果。(a) 25 °C激光器静态输出 $P-I-V$ 曲线;(b) 静态输出光谱图;(c) 混沌激光的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup diagram and results. (a) Static output $P-I-V$ curves of 25 °C laser; (b) static optical spectrum; (c) schematic of experimental setup of chaotic laser

功率 SL 光谱中无法看到严格等间距的一系列模式,这是因为宽脊大功率 SL 输出不仅有多个纵模,每个纵模又有多个横模存在,光谱中存在多套等间距的纵模,交叠在一起。所用激光器波长位于大气窗口波段,在空气中传输损耗较低,适于作为激光测距光源。

图 1(c) 为本文产生大功率混沌激光的实验装置示意图。宽脊大功率 SL 发出的激光在垂直和水平两个方向具有不同的发散角和焦点位置,因此,无法利用一个透镜实现光束准直。本实验中,先利用一个非球面透镜(AL, 焦距为 4.51 mm)对光束进行一次准直,使垂直方向发散角尽可能小,水平方向仍有一定发散度,然后利用一个平凸柱面透镜(PCCL, 焦距为 75 mm)在不影响垂直方向的同时,实现对水平方向的准直,从而得到一束平行光束。光束传播至 BS 处,一部分光被反馈回激光器中,扰动激光器,产生混沌激光,另一部分光透过 BS 输出。本实验中外腔长度为 45 cm,通过更换不同透反比的 BS,可实现对反馈强度的分档调节。将光功率计放置于 D 点可测量得到输出混沌激光束的平均功率。利用光纤准直器(FC, TC18APC-1550, Thorlabs, 美国)将空间光束耦合进入光纤耦合的光电探测器(PD, 响应带宽为 45 GHz),将光信号转化为电信号,FC 的耦合效率控制在 1% 左右,以适应 PD 响应区间。PD 接频谱分析仪(SA, 测量带宽为 50 GHz)和高速实时示波器(OSC, 采样率为 80 GSa/s),用于采集混沌激光的频谱和时序。通过观察频谱,可判断激光器输出的动力学状态。将 OSC 采集的时序传输至计算机,进行自相关运算,得到自相关曲线的主峰半峰全宽(FWHM)和旁瓣峰水平(PSL),这两个参数是影响激光测距精度和抗干扰性能的主要参数^[29-33]。PSL 定义为

$$L_{\text{PSL}} = 10 \cdot \lg \frac{c_{\text{subpeak}}}{c_{\text{peak}}}, \quad (1)$$

式中: c_{peak} 表示自相关曲线中主峰高度; c_{subpeak} 表示最强旁瓣峰高度。

3 大功率混沌激光产生

首先,我们选取透反比为 65/35 的半透半反镜,在此反馈条件下,改变激光器偏置电流,观察了宽脊大功率 SL 在光反馈下的动力学状态变化。

图 2 给出了不同偏置电流下激光器输出的频谱、时序和自相关曲线,图 2(a)~(e)表示偏置电流分别为 1.8 A、2.2 A、2.6 A、3.2 A、4.0 A。当偏置电流为 1.8 A ($2.6I_{\text{th}}$)时,频谱上能观察到若干簇频谱峰,这是由于激光输出状态包含了较强周期性成分,其中,每一簇峰所处频率,对应于弛豫振荡频率 f_r (约 5 GHz)及其整数倍频率,簇内峰间隔对应于外腔频率 f_c (约 290 MHz,对应于 45 cm 外腔长度)。时序呈现无规则性,表明激光输出呈弱混沌状态,其自相关曲线上能够观察到较高的旁瓣峰,旁瓣峰位置分别对应外腔时延

和弛豫振荡时延。当偏置电流为 2.2 A ($3.2I_{\text{th}}$)时,频谱中仍包含若干簇峰,表明激光输出仍为弱混沌状态,自相关曲线中的旁瓣峰在一定程度上被抑制,表明随着偏置电流增大,外腔时延特征和弛豫振荡特征均被抑制。当偏置电流为 2.6 A ($3.8I_{\text{th}}$)时,频谱上的周期性峰值几乎消失,整体能量大幅抬起,时序起伏值明显增大,自相关曲线接近 δ 函数,旁瓣峰高度与噪底接近,此时激光输出呈现完全的混沌动力学状态。当偏置电流增大至 3.2 A ($4.7I_{\text{th}}$)时,频谱上再次出现弛豫振荡周期性峰,自相关曲线上的弛豫振荡旁瓣峰明显变强,外腔旁瓣峰仍被较好地抑制。在最大偏置 4.0 A ($5.8I_{\text{th}}$)时,频谱上弛豫振荡周期性峰变得更加明显,自相关曲线上的弛豫振荡旁瓣峰进一步变强,PSL 达到 -3.5 dB,外腔旁瓣峰仍被抑制。频谱整体能量仍较高,时序无明显规则,表明此时激光输出为包含强弛豫振荡周期性的混沌激光状态。

综上所述:固定反馈强度,在较低偏置电流下,激光输出呈弱混沌状态,外腔时延特征和弛豫振荡特征都很明显;随着偏置电流增大,输出光横模数量不断增加,外腔时延特征和弛豫振荡特征都逐步被抑制,激光输出进入完全混沌状态,混沌带宽大、时延特征被抑制,是满足混沌激光测距应用需求的高质量混沌状态;继续增大偏置电流,弛豫振荡特征再次出现,外腔时延特征仍被抑制,激光输出逐步转变为包含强弛豫振荡周期性的混沌激光状态。弛豫振荡特征先被抑制,然后明显变强的原因在于混沌激光产生有两种物理机制:1)光反馈对弛豫振荡的扰动;2)多模模间相互作用,包括多横模反馈、模式拍频,增强混沌振荡复杂度。随着激光器电流的增大,激光器本身的模式稳定性越强,光反馈的扰动作用越弱,但激光器内部模式数量大大增加,复杂混沌振荡对弛豫振荡的掩藏作用为主,当电流增大到一定值后,光反馈的扰动作用弱到一定程度,弛豫振荡大大加强,超过复杂混沌振荡对弛豫振荡的掩藏作用。

接下来,我们详细研究了不同反馈强度下,外腔和弛豫振荡周期性特征能被抑制的电流区间,及其对应的激光输出平均功率。在此,从混沌激光测距的应用需求出发,本文界定自相关 PSL 低于 -6 dB 时,为周期性特征被抑制。

图 3 给出了选取 BS 反比例分别为 65/35、50/50、40/60、30/70 时,输出激光平均功率随偏置电流变化曲线,图中实心点表示该处激光输出为周期性特征被抑制的混沌状态。在同一反馈强度下,SL 动力学状态变化趋势都与图 2 相同,即外腔时延特征和弛豫振荡特征都存在的弱混沌,到两种周期性特征都被抑制的完全混沌,再到只含有弛豫振荡周期性的混沌。随着 BS 透反比例由 65/35 减小至 30/70,透射光功率也减小,系统整体输出光功率随之减小。同时,由于反馈强度的增大,SL 进入混沌所需的偏置电流越来越大,并

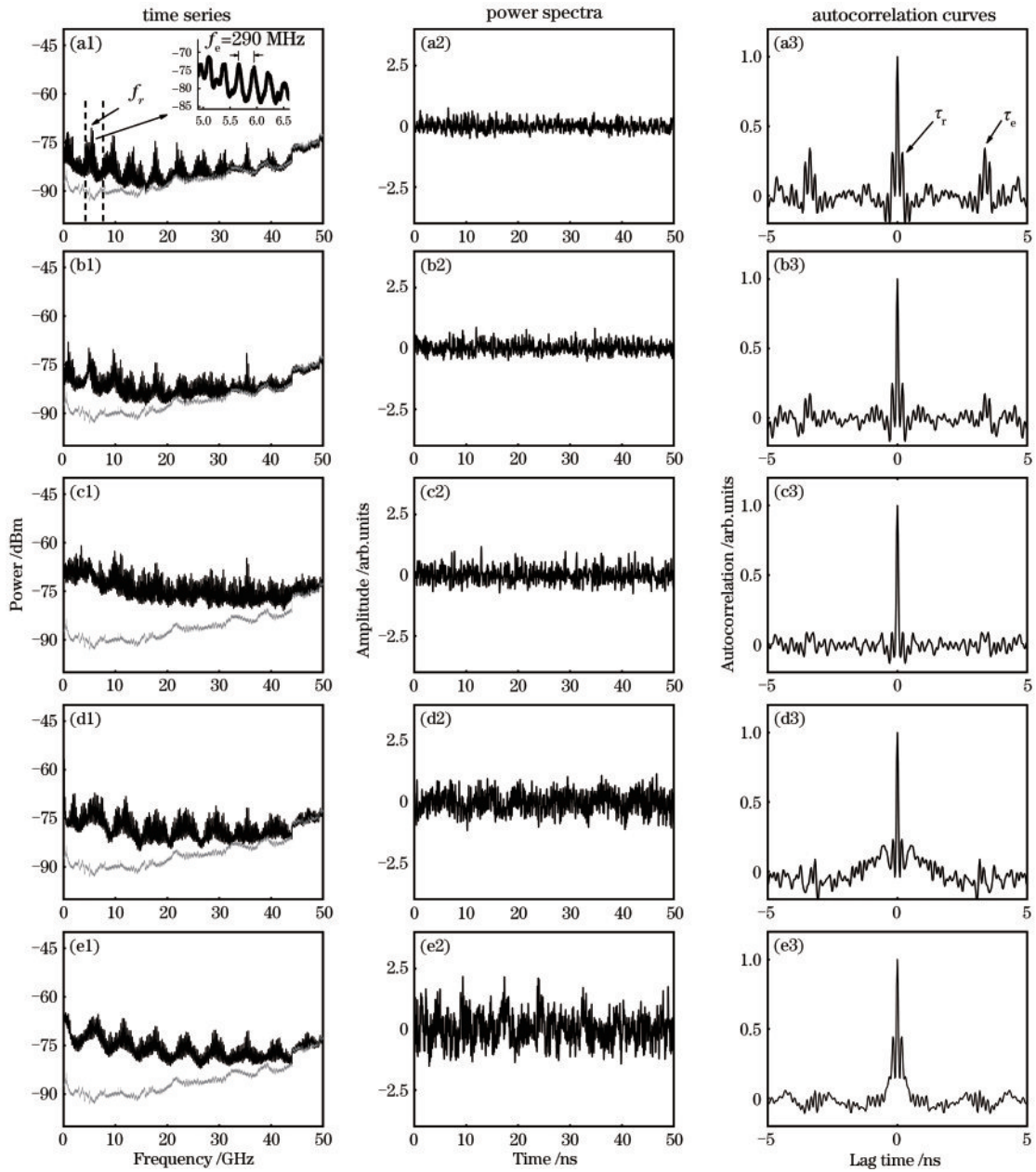


图 2 透反比为 65/35 时输出状态随着偏置电流改变的变化。(a)~(e) 电流分别为 1.8 A、2.2 A、2.6 A、3.2 A、4.0 A

Fig. 2 Change of output state with bias current when the transmission to reflection ratio is 65/35. (a)~(e) Currents are 1.8 A, 2.2 A, 2.6 A, 3.2 A, and 4.0 A, respectively

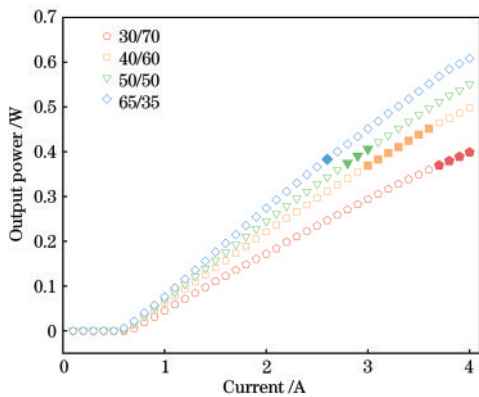


图 3 不同反馈强度下的 PI 曲线

Fig. 3 PI curves under different feedback intensities

且周期性特征被抑制的电流区间也相应增大, 30/70 的范围受 SL 最大驱动电流限制而无法继续增加。图中标注为实心点的各点混沌激光自相关峰主峰 FWHM 值都在 0.07~0.1 ns 区间内, PSL 低于 -6 dB, 满足混沌激光测距的应用需求。

4 测距实验

进一步, 本文选取 BS 透反比例为 40/60, 激光器偏置电流为 3.5 A 时输出的混沌激光作为光源, 进行了混沌激光测距的验性实验。此条件下, 混沌光平均功率为 440 mW, 对应的时序、频谱及自相关曲线如图 4 所示, 频谱有效带宽为 26 GHz (有效带宽计算方

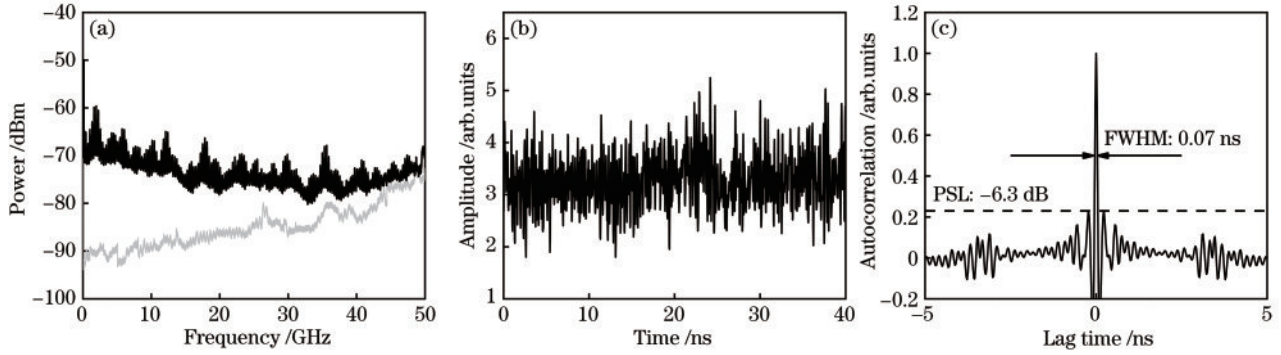


图 4 透反比 40/60、偏置电流 3.5 A 下的激光器输出状态。(a) 频谱; (b) 时序; (c) 自相关曲线

Fig. 4 Output state of the laser at transmission to reflection ratio is 40/60 and bias current is 3.5 A. (a) Power spectrum; (b) time series; (c) autocorrelation curves

法见文献[34-35])自相关曲线主峰 FWHM 为 0.07 ns, PSL 水平为 -6.3 dB。

图 5 给出了混沌激光测距装置示意图,混沌源部分的 SL 经过 AL 和 PCCL 两步准之后,由半透半反镜 BS₁ 完成反馈光再注回产生混沌光信号,经由分束镜 (BS₂) 分为两束,BS₂ 透反比例为 60/40,一束直接由光纤准直器 (FC₁) 耦合进光电探测器 (PD₁),输入实时示波器 (OSC) 一通道中作为参考光,一束作为探测光照射待测目标 (实验中用反射镜 R 代替目标物,反射率为 97%),经 R 反射后由 FC₂ 接收信号,在距离较远时回波信号较为微弱,需要使用光纤放大器 (EDFA) 放大耦合光信号功率,使得 PD₂ 可以响应接收信号,并输入到 OSC 另一通道中,对两通道中的参考信号与探测信号做互相关运算,相关曲线中相关峰所在的位置对应光飞行时间 t ,根据公式 $L = ct/2$ 计算得到距离,其中 L 为待测距离, c 为光速,即可完成单次距离测量。待测目标作为合作目标分别在放置于距发射系统 1 m、3 m、6 m、10 m 处完成单个静止目标测距实验。

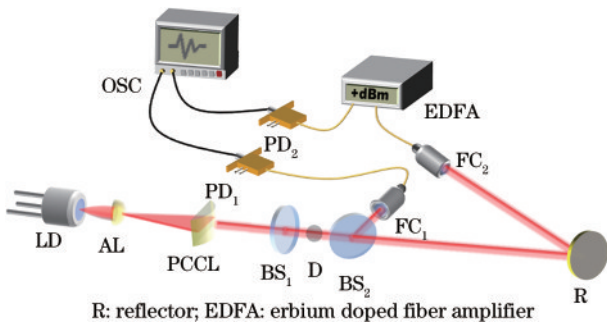


图 5 测距装置图

Fig. 5 Device diagram of ranging

图 6 为混沌激光测距实验结果,相关峰出现的位置包含各距离的位置信息,经计算得到各目标的距离分别为 0.945 m、3.198 m、6.326 m、10.353 m。本实验中,宽脊 SL 在简单的光反馈结构下即可产生时延特征抑制良好的大功率混沌激光信号,对比文献中复杂的时延特征抑制光路和利用掺铒光纤放大器对混沌激

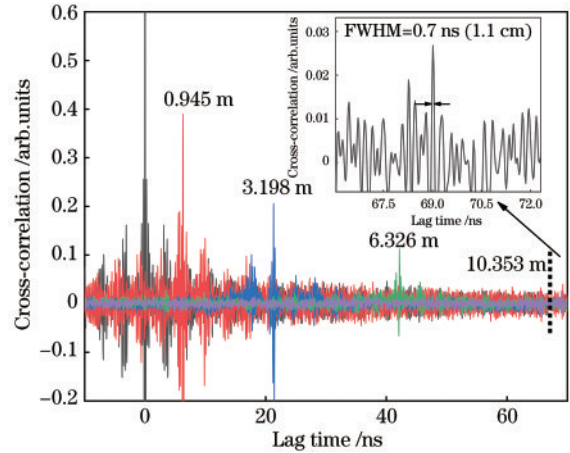


图 6 混沌测距实验结果

Fig. 6 Experimental results of chaotic ranging

光进行功率放大的方案,大大降低了混沌光源结构的复杂程度,且在测距精度和抗干扰特性方面并无损失。随着测量距离的增加,回波信号经空间传输损耗,功率减小,导致信噪比降低。测距精度在测量区间内不受影响,互相关曲线的主峰 FWHM 一直保持在 0.07 ns 左右,距离分辨率可以维持在 1.1 cm,但 PSL 从 -6.3 dB 显著增加至 -1.5 dB,且互相关主峰高度随距离增加而降低,降低速度较快,这是由于本实验光路未经优化,信噪比过低所致。

5 结 论

本文基于商用的波长 1530 nm 的宽脊大功率 SL,使用简单的光反馈结构,产生了周期性特征抑制的大功率自由空间混沌激光。研究发现,随着 SL 偏置电流的增大,混沌激光功率不断增大,外腔时延特征和弛豫振荡特征均逐渐被抑制。但是,当电流增大到一定程度后,弛豫振荡特征又开始变强,即偏置电流并非越大越好。进而,详细研究了不同反馈下,外腔时延特征和弛豫振荡特征都能被抑制的电流区间,及其输出混沌激光功率。最终,在 BS 透反比例 40/60、偏置电流 3.5 A 的条件下,产生了平均功率 440 mW 的大功率混

沌激光,其自相关主峰半峰全宽为 0.07 ns,旁瓣峰水平为 -6.3 dB。验证性测距实验表明,随着测量距离的增大,测距分辨率不会降低,保持在 1.1 cm 左右。

后续研究应着手优化光路,改善发射系统与接收系统,通过合适的光增益手段提升测距系统的整体性能^[36],如在发射系统增加扩束器、减小发散角、增大光斑直径,在接收端增加反射式望远镜接收系统、换用空间光探测器等光学增益手段保证最大限度地接收回波信号,扩大混沌激光雷达的动态范围。

参 考 文 献

- [1] 房鑫,高沁中,张江江,等.量子噪声增强混沌激光的熵含量[J].中国激光,2021,48(21):2112001.
Fang X, Gao Q Z, Zhang J J, et al. Entropy enhancement of chaotic laser via quantum noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2112001.
- [2] 刘蓬勃,张胜海,卫正统,等.混沌半导体激光器延时特征与有效带宽的实验研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(17):1714003.
Liu P B, Zhang S H, Wei Z T, et al. Experimental study on time-delay characteristic and effective bandwidth for chaotic semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714003.
- [3] 刘彤,郭晓敏,张浩杰,等.混沌激光光子互相关的分析与测量[J].光学学报,2021,41(24):2414002.
Liu T, Guo X M, Zhang H J, et al. Analysis and measurement of photon cross-correlation of chaotic laser [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2414002.
- [4] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 151-162.
- [5] 王云才.混沌激光的产生与应用[J].激光与光电子学进展,2009,46(4):13-21.
Wang Y C. Generation and applications of chaotic laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(4): 13-21.
- [6] 王云才,王安帮.一种新型的抗干扰高精度混沌激光雷达[J].红外与激光工程,2007,36(S1):214-218.
Wang Y C, Wang A B. Novel antijamming chaotic lidar with high resolution[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 214-218.
- [7] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(5): 991-997.
- [8] Zhang M J, Ji Y N, Zhang Y N, et al. Remote radar based on chaos generation and radio over fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 7902412.
- [9] Shen Z M, Guo Z W, Wang B J, et al. Chaotic macropulse green laser beam generated by modulating a 520 nm laser diode with optical feedback[J]. Journal of Russian Laser Research, 2021, 42(1): 66-74.
- [10] 龚天安,王云才,孔令琴,等.面向汽车防撞的混沌激光雷达[J].中国激光,2009,36(9):2426-2430.
Gong T A, Wang Y C, Kong L Q, et al. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2426-2430.
- [11] 王冰洁.混沌激光雷达技术研究[D].太原:太原理工大学,2012:20-40.
Wang B J. Research on chaotic laser radar technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012: 20-40.
- [12] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [13] 匡尚奇,郭祥帅,冯玉玲,等.半导体激光器系统输出混沌激光研究进展[J].中国光学,2021,14(5):1133-1145.
Kuang S Q, Guo X S, Feng Y L, et al. Research progress of optical chaos in semiconductor laser systems [J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1133-1145.
- [14] 郭亘立,贾志伟,王安帮,等.噪声光注入分布式布拉格反射型激光器的混沌动力学特性[J].中国激光,2021,48(23):2301003.
Guo G L, Jia Z W, Wang A B, et al. Chaotic dynamics in DBR laser with noise-light injection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2301003.
- [15] Olesen H, Osmundsen J, Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(6): 762-773.
- [16] Simpson T B. Mapping the nonlinear dynamics of a distributed feedback semiconductor laser subject to external optical injection[J]. Optics Communications, 2003, 215(1/2/3): 135-151.
- [17] Li S S, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 541-552.
- [18] Zhong Z Q, Wu Z M, Wu J G, et al. Time-delay signature suppression of polarization-resolved chaos outputs from two mutually coupled VCSELs[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 1500409.
- [19] Tang X, Wu J G, Wu Z M, et al. Properties of the time delay signature in mutually coupled semiconductor lasers [C]//2011 Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), May 16-18, 2011, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2011.
- [20] Lee M W, Rees P, Shore K A, et al. Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications[J]. IEE Proceedings: Optoelectronics, 2005, 152(2): 97-102.
- [21] Xiao P, Wu Z M, Wu J G, et al. Time delay signatures of chaotic output in 1550 nm VCSELs with double variable-polarization optical feedback[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8552: 85520G.
- [22] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, et al. Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback[J]. Optics Letters, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [23] Kanno K, Uchida A. Consistency and complexity in coupled semiconductor lasers with time-delayed optical feedback[J]. Physical Review E, 2012, 86(6): 066202.

- [24] Demir A, Peters M, Duesterberg, R, et al. 29.5 W continuous wave output from 100 μm wide laser diode[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480G.
- [25] 齐军, 邹永刚, 范杰, 等. 1064 nm 侧向微结构宽脊波导半导体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1301003.
Qi J, Zou Y G, Fan J, et al. 1064 nm wide-ridge waveguide semiconductor laser with lateral microstructure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1301003.
- [26] 仲莉, 王俊, 冯小明, 等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1037-1042.
Zhong L, Wang J, Feng X M, et al. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(8): 1037-1042.
- [27] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [28] HomeThorlabs. L1550G1-1550 nm, 1.7 W, \varnothing 9 mm, pin codeG, MM laser diode[EB/OL]. [2022-03-06]. <https://www.thorlabschina.cn/thorproduct.cfm?partnumber=L1550G1>.
- [29] Zhang T, Jia Z W, Wang A B, et al. Experimental observation of dynamic-state switching in VCSELs with optical feedback[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(7): 335-338.
- [30] Wiczorek S, Krauskopf B, Simpson T B, et al. The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers[J]. Physics Reports, 2005, 416(1/2): 1-128.
- [31] Mork J, Tromborg B, Mark J. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(1): 93-108.
- [32] Lin F Y, Liu J M. Ambiguity functions of laser-based chaotic radar[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(12): 1732-1738.
- [33] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- [34] 张艺腾, 贾志伟, 李青天, 等. 基于光反馈双模DFB激光器的宽带混沌信号产生[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2114001.
Zhang Y T, Jia Z W, Li Q T, et al. Broadband chaos signal generation based on dual-mode DFB laser with optical feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2114001.
- [35] Lin F Y, Chao Y K, Wu T C. Effective bandwidths of broadband chaotic signals[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 1010-1014.
- [36] 丁红波, 王珍珠, 刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2401001.
Ding H B, Wang Z Z, Liu D. Comparison of de-noising methods of LiDAR signal[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2401001.