

用于量子传感的窄线宽无磁垂直腔面发射激光器

张星 张建伟 周寅利 薛洪波 宁永强 王立军

Narrow line width and magnetism-free vertical-cavity surface-emitting lasers for quantum sensing

ZHANG Xing, ZHANG Jian-wei, ZHOU Yin-li, Xue Hong-bo, NING Yong-qiang, WANG Li-jun

引用本文:

张星, 张建伟, 周寅利, 薛洪波, 宁永强, 王立军. 用于量子传感的窄线宽无磁垂直腔面发射激光器[J]. *中国光学*, 2022, 15(5): 1038-1044. doi: 10.37188/CO.2022-0135

ZHANG Xing, ZHANG Jian-wei, ZHOU Yin-li, Xue Hong-bo, NING Yong-qiang, WANG Li-jun. Narrow line width and magnetism-free vertical-cavity surface-emitting lasers for quantum sensing[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1038-1044. doi: 10.37188/CO.2022-0135

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器

High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 190 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0190>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学 (中英文). 2017, 10(2): 194 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194>

基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展

Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 68 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0068>

12 W高功率高可靠性915 nm半导体激光器设计与制作

Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 590 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0590>

瓦级319nm单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子Rydberg激发

Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 701 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0701>

文章编号 2097-1842(2022)05-1038-07

用于量子传感的窄线宽无磁垂直腔面发射激光器

张 星^{1,2*}, 张建伟^{1,2}, 周寅利^{1,2}, 薛洪波³, 宁永强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, 吉林 长春 130033;
2. 长春中科长光时空光电技术有限公司, 吉林 长春 130102;
3. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 为了研制出表面微透镜集成外腔的垂直腔面发射激光器 (VCSEL), 实现窄线宽无磁激光输出, 满足原子磁强计等量子传感器应用要求, 本文设计并生长了适合于表面集成微透镜的 VCSEL 外延结构, 完成了表面微透镜集成外腔 VCSEL 器件制备, 在电极材料方面选取无磁材料以满足应用要求。实验结果表明: 研制的 VCSEL 器件工作温度达到 90 °C, 激光波长为 896.3 nm, 功率为 1.52 mW, 边模抑制比为 36.3 dB, 激光线宽为 38 MHz, 封装为模组后的磁场强度低于 0.03 nT。结果表明本文研制的窄线宽无磁 VCSEL 满足量子传感的应用需求。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 量子传感; 高温; 窄线宽; 无磁

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0135

Narrow line width and magnetism-free vertical-cavity surface-emitting lasers for quantum sensing

ZHANG Xing^{1,2*}, ZHANG Jian-wei^{1,2}, ZHOU Yin-li^{1,2}, Xue Hong-bo³, NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun¹
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *CGPhoton Inc., Changchun 130102, China;*
3. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to realize single mode, narrow linewidth and low magnetism field intensity operation of lasers, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL) with integrated micro-lens extended cavity was designed and fabricated. First, an epitaxial structure suitable for the micro-lens integration was designed and grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). The fabrication steps of the micro-lens in-

收稿日期: 2022-06-17; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFB2002401); 国家自然科学基金项目 (No. 62090060, No. 52172165); 中国科学院科技网络服务计划项目 (No. KFJ-STQ-QYZD-2021-15-001); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2017260, No. 2018181)

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2018YFB2002401); National Natural Science Foundation of China (No. 62090060, No. 52172165); Science and Technology Service Network Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-STQ-QYZD-2021-15-001); Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2017260, No. 2018181)

egrated VCSEL was carried out and the magnetism-free material was used in the electrode deposition. Experimental results indicate that the operating temperature is 90 °C, the laser wavelength is 896.3 nm, the laser power is 1.52 mW, the side mode suppression ratio is as high as 36.3 dB and the operating magnetic field intensity is less than 0.03 nT. A narrow line width and magnetism-free VCSEL suitable for quantum sensing was demonstrated.

Key words: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL); quantum sensing; high temperature; narrow linewidth; magnetism-free

1 引 言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) 是一种以低功耗、高光束质量、高直调带宽为主要特点的新型半导体激光器^[1-2]。由于功耗低, VCSEL 的工作温度范围很宽, 比如: 能在 80 °C 以上的高温环境中长期稳定工作^[3]; 由于光束质量高, VCSEL 对光束整形系统要求较低, 因此易于制成紧凑的光学模组^[4]。鉴于以上优势, 从 20 世纪 90 年代中后期成功用于光通信领域开始, VCSEL 至今已经广泛应用于数据中心和超级计算机内部光互连^[5]、智能手机和车载激光雷达等领域^[6-7], 国内外有较多研究报道^[8-11]。

量子传感被认为是具有颠覆性意义的下一代计量手段^[12], 量子磁探测技术由于具有高灵敏度和低功耗等特点, 在高端装备和科学研究等方面有重要的应用前景^[13]。例如在杭州建设的极弱磁场重大科技基础设施, 就是基于量子磁探测技术对极弱磁场开展的研究。

量子磁探测传感器, 或称为原子磁强计, 其原理是借助激光与原子的相互作用实现对微弱磁场的高灵敏度检测。原子磁强计中采用的光源以 VCSEL 为主, 主要是因为 VCSEL 具备工作温度范围宽及高光束质量这两大优势, 使用 VCSEL 作为光源, 能与传感器紧凑地进行一体化封装, 大幅降低整机体积、成本和功耗。然而, 原子磁强计对 VCSEL 的性能要求十分苛刻, 包括高温工作 (≥ 80 °C)、单模 (SMSR > 30 dB)、窄线宽 (< 100 MHz) 以及无磁, 这大大增加了 VCSEL 芯片和模组的研发难度。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究 (简称长春光机所) 和长春中科光时空间光电技术有限公司从 2010 年起, 围绕芯片级原子钟应用, 在 VCSEL 的高温低阈值工作、波长控制、模式稳

定以及 VCSEL 在芯片原子钟系统中的实际应用等方面报道了一系列研究成果^[14]。在此期间, 北京工业大学、中国科学院半导体研究所、苏州纳米技术与纳米仿生研究所、长春理工大学等多个团队从 2016 年开始也陆续发表了相关研究成果^[3]。然而, 在原子磁强计等高端量子传感器需要的窄线宽无磁 VCSEL 研究方面, 国外只有美国 Sandia 国家实验室和德国 ULM 大学报道了相关研究, 国内目前只报道了理论研究结果^[15], 尚无实际器件方面的报道。

本文介绍了本课题组在高温、窄线宽、无磁 VCSEL 方面的最新研究成果。首先设计并生长了适合集成微透镜的 VCSEL 外延结构, 随后完成了器件制备和微透镜集成, 最后对其输出特性, 特别是线宽特性和无磁特性进行了测试, 并对结果进行了讨论。

2 外延结构设计及生长

图 1 (彩图见期刊电子版) 为本文研制的 VCSEL 外延和器件结构示意图。该器件对应的外延材料由长春光机所发光学及应用国家重点实验室的 AIXTRON 200/4 金属有机物气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 设

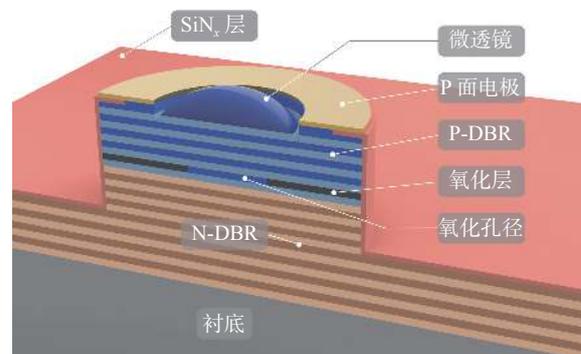


图 1 VCSEL 器件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VCSEL structure

备(研发型)生长而成,外延片直径为 2 inch(1 inch=0.025 4 m),满足研发阶段的需要。根据器件高温工作和窄线宽的要求,有源区采用了高增益-腔模失配设计^[16],通过采用大于 20 nm 的高增益-腔模失配量,使 VCSEL 能在 80 °C 以上的高温环境下保持稳定的低功耗工作状态。

该 VCSEL 的外延结构中:N 型分布布拉格反射镜(N-doped Distributed Bragg Reflector, N-DBR)采用 34.5 对 AlAs/GaAs 材料,之所以采用二元组分主要是考虑提高热导率,降低热阻,以利于高温工作;P 型分布布拉格反射镜(P-doped Distributed Bragg Reflector, P-DBR)采用 20 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{Al}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 材料,较少的 P-DBR 对数有助于提高输出功率。为了克服高温环境下功率衰减过大的问题,器件的有源区采用 5 组 $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ 量子阱,对应的室温增益峰值波长为 870 nm,与腔模形成 20 nm 以上的失配量,确保器件在高温下具有较低的阈值电流。氧化层采用 35 nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$,具体位置在有源区和 P-DBR 之间。

需要特别指出的是,该结构的盖层(cladding layer)厚度设计为 500 nm,一方面是考虑到微透镜刻蚀深度问题,另外,该设计可以使微透镜刻蚀主要在 GaAs 层中进行,避免刻蚀 GaAs/AlGaAs 交替结构带来的速率不稳定和刻蚀形貌不易控制的问题。

3 器件制备

3.1 制备工艺

完成 MOCVD 外延材料生长后,VCSEL 的制备是在长春光机所发光学及应用国家重点实验室的半导体激光芯片工艺平台完成的,主要采用了本课题组在长期科研和器件工程化实践中形成的标准 VCSEL 制备工艺。具体步骤如下:首先采用光刻+磁控溅射的方法在外延片表面制备环形金属图形,作为 P 面电极;之后采用德国 SENTECH SI500 型电感耦合等离子体干法刻蚀设备刻蚀出直径为 30 μm 的台面(mesa)结构,暴露出 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层;采用法国 AET 公司的 ALOX 型在线监控氧化设备制作氧化孔径,该设备在 10.16 cm 范围内的氧化精度可达到 $\pm 1 \mu\text{m}$;之后经过 SiN_x 薄膜生长、P-pad 制备等工艺后,将晶圆整体减薄抛光到 100 μm ,并制作 N 面电极。

为了满足无磁要求,上述 N 面电极使用的金属材料不能含有磁性材料,对此,参考文献 [17] 的方法,采用了非常规的 50 nm Cr/350 nm Au N 面电极,并对其退火工艺进行了调整,在实现器件的无磁性能前提下,确保其电阻无明显升高。

完成上述工艺后,晶圆被解理为单颗 VCSEL 芯片,为了便于进行各项常规性能测试,将芯片焊接到带有温控器和热敏电阻的 TO46 管壳上。完成常规封装的 VCSEL 如图 2 所示。

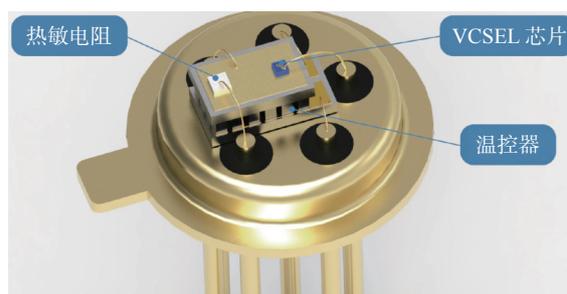


图 2 封装后的 VCSEL
Fig. 2 The packaged VCSEL

3.2 集成微透镜刻蚀

本研究中 VCSEL 制备工艺与标准工艺的主要区别在于前者需要制备集成微透镜结构。本课题组在前期研究中开发出一种成本低廉、工艺稳定的湿法刻蚀工艺,用于在低发射 VCSEL 的衬底表面制作微透镜阵列^[18]。其主要原理是利用特定比例的氢溴酸腐蚀液在 VCSEL 窗口表面和四周的刻蚀速率不同,通过精密控制实验条件实现不同尺寸微透镜的制备。

微透镜制备工序安排在 P 面电极制备完成后,具体流程如图 3(彩图见期刊电子版)所示。微透镜刻蚀采用的腐蚀液是 $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HBr}:\text{CH}_3\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:1:1:10$,在图 3 所示掩模露出部分制作微透镜。该腐蚀液中 H_2O_2 的作用是将 HBr 中的 Br^+ 还原为 Br_2 , CH_3OH 的加入主要是减小液体表面张力,使反应产生的气体不附着在刻蚀窗口表面,使微透镜表面更加光滑。为了控制反应速度,采用了低温刻蚀的方法,在冰水混合物的低温环境中进行刻蚀,最终成功制备出具有特定曲率半径的微透镜,微透镜表面形貌的原子力显微镜(AFM)测试结果如图 4 所示。其中图 4(a)~4(d)分别表示直径为 9 μm 、11 μm 、13 μm 、15 μm 刻蚀窗口经过相同刻蚀时间形成的微透镜,根据该测试结果可计算出微透镜的曲率半径和焦距。

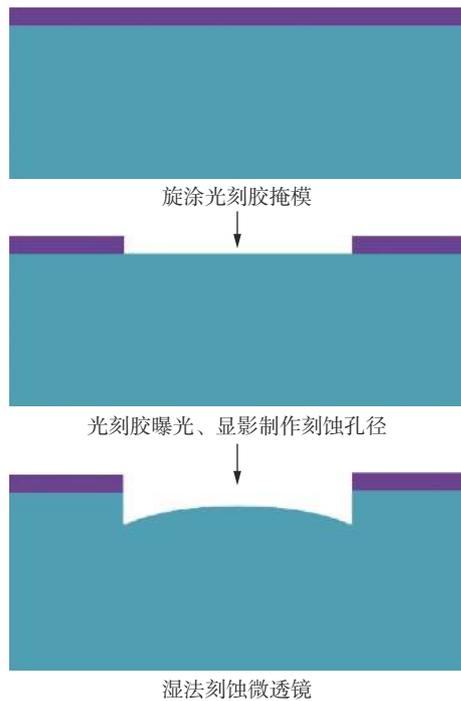


图 3 湿法刻蚀微透镜的工艺流程

Fig. 3 Fabrication steps of micro-lens wet etching

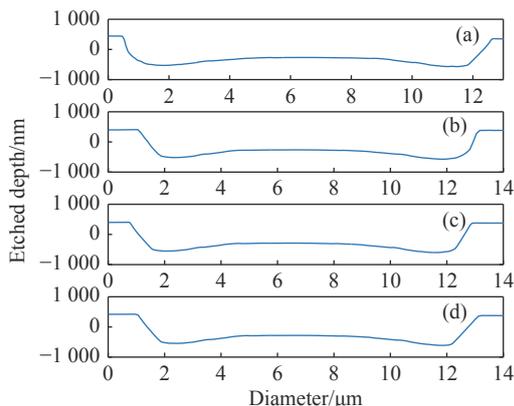


图 4 微透镜表面形貌 AFM 测试结果

Fig. 4 Surface morphology of the micro-lens by AFM

最终实现了图 1 所示的集成微透镜 VCSEL 激光器。

4 实验结果与讨论

在前一小节中, 成功制备出集成微透镜的 VCSEL 器件, 接下来, 将该器件的输出特性进行研究, 并对结果进行讨论。

4.1 输出特性

测试了集成微透镜的 VCSEL 器件在室温和高温环境下的电流-功率特性, 以评估该器件的高温工作适应性, 测试中采用了美国 THORLABS

公司的 LDC201CU 型电流控制器(电流分辨率为 0.05 mA)、自行开发的温度控制器(温控精度为 0.1 °C)以及 THORLABS 公司的 PM100D 型功率计和 S130C 型功率探头。

图 5 所示为室温(25 °C)下测试得到的 VCSEL 功率-电流-电压曲线。从图中可见, 室温下 VCSEL 在 5 mA 驱动电流下的输出功率为 2.559 mW, 此时对应的电压为 2.79 V, 电-光转换效率为 18.3%。

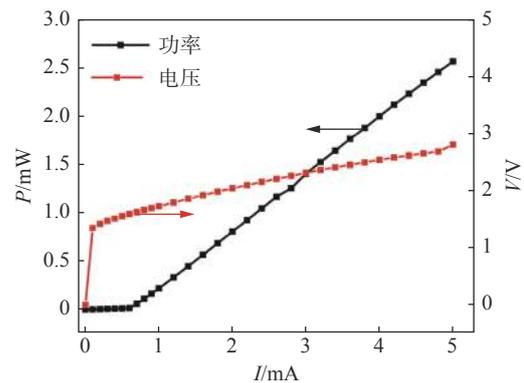


图 5 25 °C 下测试得到的功率-电流-电压曲线

Fig. 5 P - I - V characteristics at room temperature (25 °C)

由于本研究中的 VCSEL 的目标工作温度是 80 °C 以上的高温环境, 因此对器件在温度升高后的输出特性变化情况进行研究是十分必要的。图 6 (彩图见期刊电子版) 给出了 VCSEL 在 20~90 °C 内的功率-电流曲线变化情况。从图 6 可见, 器件的阈值电流呈现先降低后升高的趋势, 对比 4 mA 下的输出功率, 20 °C 为 1.84 mW, 90 °C 为 1.52 mW, 高温下相对室温的激光功率仅衰减了 22.8%。说明该器件采用的腔模-增益失配和多组高增益量子阱有效缓解了其在高温下的性能劣化。

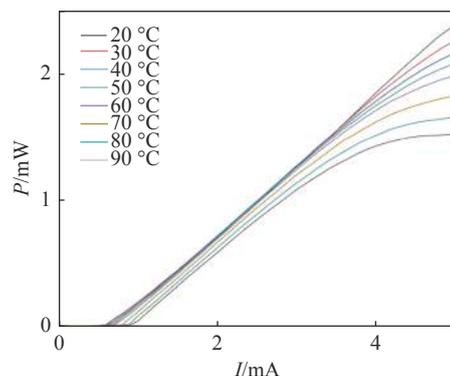


图 6 20~90 °C 下测试得到的功率-电流曲线

Fig. 6 P - I characteristics under 20~90 °C

确定 VCSEL 是否为单模工作需要对其输出光谱的边模抑制比 (Side Mode Suppression Ratio, SMSR) 进行测试。图 7 给出了在 4 mA 驱动电流、90 °C 下 VCSEL 输出光谱的测试结果, 在该条件下激光中心波长为 896.3 nm, SMSR> 为 36.3 dB, 激光器能够保持较好的单模工作状态。



图 7 VCSEL 的输出光谱测试结果

Fig. 7 Measured output spectrum of the VCSEL

采用 THORLABS 公司的扫描式法布里-珀罗干涉仪对本研究中 VCSEL 的激光频率线宽进行测试, 具体测试方法见索雷博公司网站。该干涉仪的精细度大于 200, 自由频谱区带宽为 1.5 GHz, 对应的线宽测试分辨率为 7.5 MHz, 可以满足 VCSEL 这类频率线宽相对较宽的半导体激光器的检测需要。

在实际测试中, VCSEL 发射的激光经过准直后射入干涉仪, 形成的干涉峰显示在示波器上, 两个干涉峰之间的距离为其自由频谱区带宽 1.5 GHz, 根据干涉峰的半高全宽与自由频谱区的比值即可推算出 VCSEL 发射的激光线宽。图 8 为 VCSEL 激光线宽的测试结果, 经换算可得出其线宽为 38 MHz。

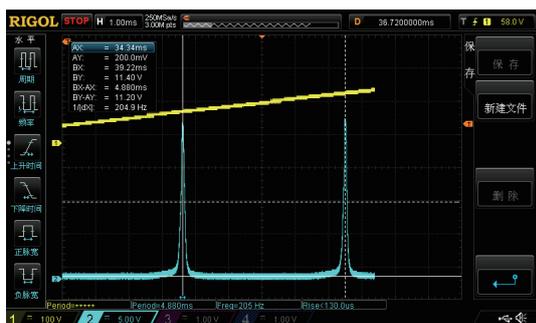


图 8 VCSEL 线宽测试结果

Fig. 8 Measured frequency line width of the VCSEL

4.2 磁性测试

为了满足原子磁强计的应用要求, 使用上述 VCSEL 芯片制成了无磁封装 VCSEL 光源模组, 封装后的模组如图 9 所示, 并采用中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室的 QUSPIN QZFM 型磁强计对该光源模组的剩磁进行测试, 测试是在磁屏蔽筒零磁环境中进行的, 被测样品距离磁强计探头距离约 1 cm。测试结果如图 10 所示, 可见该模组产生的磁场强度低于 0.03 nT (峰-峰值), 能够满足实际应用要求。

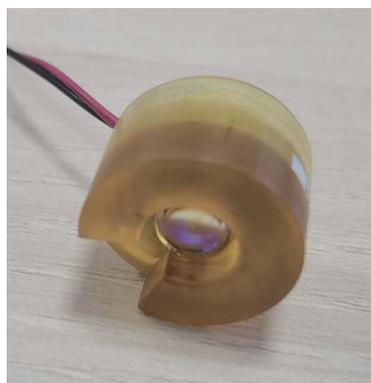


图 9 无磁封装 VCSEL 光源模组

Fig. 9 Packaged VCSEL magnetism-free module

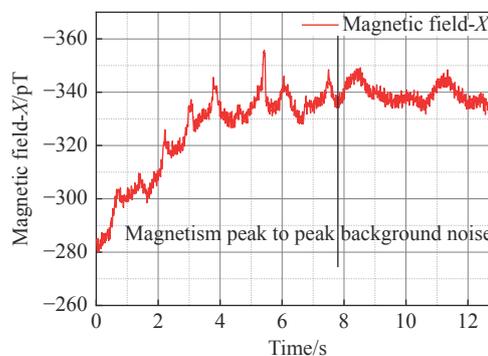


图 10 VCSEL 模组剩磁测试结果

Fig. 10 Testing results of the remaining magnetic field intensity of VCSEL

5 结论

本文面向量子传感对 VCSEL 高温工作、窄线宽、无磁等应用要求, 从芯片结构着手, 研制出带有集成微透镜结构的 VCSEL, 测试结果表明该芯片能够在 90 °C 高温环境下实现稳定单模工作 (SMSR=36.3 dB), 对应的激光输出功率为 1.52 mW, 激光频率线宽为 38 MHz; 采用上述 VCSEL 芯片

制成的光源模组磁场仅为 0.03 nT。实验结果证实 本文成功研制出满足量子传感要求的 VCSEL。

参考文献:

- [1] SODA H, IGA K I, KITAHARA C, *et al.*. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [2] 张继业, 李雪, 张建伟, 等. 垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(12): 1443-1459.
ZHANG J Y, LI X, ZHANG J W, *et al.*. Research progress of vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(12): 1443-1459. (in Chinese)
- [3] 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 高温工作垂直腔面发射半导体激光器 现状与未来(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251201.
ZHANG J W, NING Y Q, ZHANG X, *et al.*. Development and future of vertical cavity surface emitting lasers operated at high temperatures (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251201. (in Chinese)
- [4] LARSSON A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [5] 刘安金. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701005.
LIU A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701005. (in Chinese)
- [6] IGA K. Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: invention and innovation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(8S2): 08PA01.
- [7] HONG K B, HUANG W T, CHUNG H C, *et al.*. High-speed and high-power 940 nm flip-chip VCSEL array for LiDAR application[J]. *Crystals*, 2021, 11(10): 1237.
- [8] 刘畅, 肖焱, 刘恒, 等. 多结级联垂直腔面发射激光器失效分析[J]. *发光学报*, 2022, 43(3): 388-395.
LIU CH, XIAO Y, LIU H, *et al.*. Failure analysis of multi-junction cascade vertical cavity surface emitting laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2022, 43(3): 388-395. (in Chinese)
- [9] 何晓颖, 董建, 胡帅, 等. 采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 190-197.
HE X Y, DONG J, HU SH, *et al.*. High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 190-197. (in Chinese)
- [10] 周广正, 兰天, 李颖, 等. 高温稳定25 Gbit/s 850 nm垂直腔面发射激光器[J]. *发光学报*, 2019, 40(5): 630-634.
ZHOU G ZH, LAN T, LI Y, *et al.*. High temperature-stable 25 Gbit/s 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(5): 630-634. (in Chinese)
- [11] KHAN Z, CHANG Y H, PAN T L, *et al.*. High-brightness, high-speed, and low-noise VCSEL arrays for optical wireless communication[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 2303-2317.
- [12] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035002.
- [13] 王宇, 赵惟玉, 康翔宇, 等. SERF原子磁强计最新进展及应用综述[J]. *光学仪器*, 2021, 43(6): 77-86.
WANG Y, ZHAO W Y, KANG X Y, *et al.*. The latest development and application of SERF atomic magnetometer: a review[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(6): 77-86. (in Chinese)
- [14] 张星, 张建伟, 张建, 等. 原子传感用垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *导航与控制*, 2020, 19(1): 116-124.
ZHANG X, ZHANG J W, ZHANG J, *et al.*. Progress on vertical-cavity surface-emitting laser for atomic sensing applications[J]. *Navigation and Control*, 2020, 19(1): 116-124. (in Chinese)
- [15] 张福领, 付丽珊, 胡丕丽, 等. 795 nm亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性[J]. *物理学报*, 2021, 70(22): 224207.
ZHANG F L, FU L SH, HU P L, *et al.*. Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(22): 224207. (in Chinese)
- [16] ZHANG J W, ZHANG X, ZHU H B, *et al.*. High-temperature operating 894.6 nm-VCSELs with extremely low threshold for Cs-based chip scale atomic clocks[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14763-14773.
- [17] 宋金伟, 张峰, 郭艳玲, 等. 基于非磁性材料Cr/Au的VCSEL欧姆接触特性[J]. *微纳电子技术*, 2020, 57(6): 430-435,449.

SONG J W, ZHANG F, GUO Y L, *et al.*. Ohmic contact properties of VCSEL based on non-magnetic material Cr/Au[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2020, 57(6): 430-435,449. (in Chinese)

[18] WANG ZH F, NING Y Q, ZHANG Y, *et al.*. High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23900-23905.

作者简介:



张 星(1983—),男,吉林辉南人,博士,硕士生导师,2005年于吉林大学获得学士学位;2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事窄线宽垂直腔面发射激光器芯片研究。E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/O4

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com