

原子传感用垂直腔面发射激光器研究进展

张 星, 张建伟, 张 建, 宁永强, 王立军

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL) 是半导体激光器家族中的最重要成员之一, 因其具有单纵模、低功耗、光束易整形等一系列独特优势, 是多种微型化原子传感器的理想光源。围绕原子传感这一应用需求, 国内外多个科研机构和企业对 Rb 原子和 Cs 原子传感用 VCSEL 开展了不同层次的研究, 主要对其中的代表性研究进展进行综述。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 原子传感; 单模; 偏振

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5558(2020)01-01845

doi: 10.3969/j.issn.1674-5558.2020.01.013

Progress on Vertical-cavity Surface-emitting Laser for Atomic Sensing Applications

ZHANG Xing, ZHANG Jian-wei, ZHANG Jian, NING Yong-qiang, WANG Li-jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: Vertical-cavity surface-emitting lasers(VCSEL) is one of the most important members in the semiconductor laser family. VCSEL has many advantages, including single longitudinal mode, low power consumption and convenience of beam-shaping. Therefore, VCSEL is ideal candidate for the light sources of many kinds of miniaturized atomic sensors. Focusing on the atomic sensing requirements, the researches on VCSEL for Rb and Cs atomic sensing are carried out by scientific institutions and companies. The main advances are reviewed in this paper.

Key words: vertical-cavity surface-emitting lasers(VCSEL); atomic sensing; single mode; polarization

0 引言

垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL) 是日本 Tokyo 工业大学的伊贺健一教授于 1977 年提出并于 1979 年研制成功的^[1]。经过 40 余年的发展, VCSEL 成为了独立于半导体边发射激光器(Edge Emitting Lasers, EEL)的一种重要的半导体激光器件。VCSEL 得名的原因在于其光学谐振腔与半导体芯片的衬底垂直, 因此能够通过芯片表面输出激光, 即“垂直腔面

发射”。VCSEL 的反射镜由多层高低折射率交替分布的半导体材料组成, 而不像 EEL 那样采用解理面或刻蚀光栅作为反射镜。图 1 为典型的 VCSEL 结构, 器件的谐振腔由两个分部 Bragg 反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR) 构成, 并通过其中一组 DBR 输出激光^[2]。

VCSEL 的谐振腔与有源区均为外延生长而成, 器件结构紧凑, 腔长一般为波长量级(约为 $1\mu\text{m}$), 以上结构特点带来一系列优势: 1) 由于谐振腔长度短, VCSEL 具有较高的直调带宽, 并能保持稳定的单纵模工作; 2) 采用湿法氧化等微纳加工工

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB2002401); 国家自然科学基金(编号: 11774343)

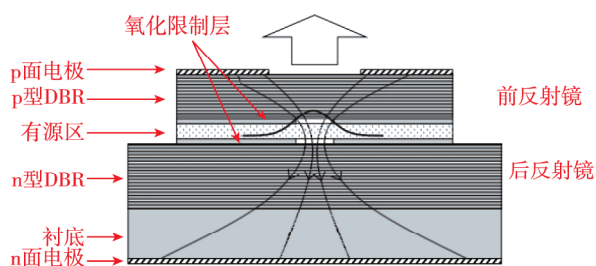
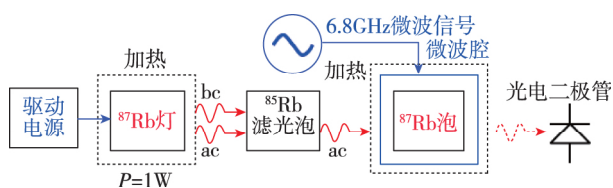


图 1 典型的 VCSEL 器件结构示意图

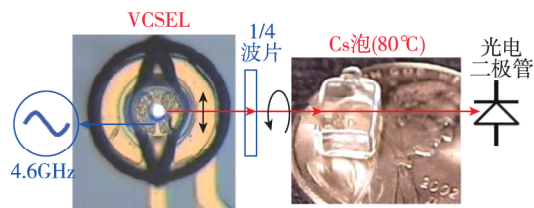
Fig. 1 Structure diagram of the typical VCSEL

对 VCSEL 进行光电限制后，其阈值电流可低至 0.1mA 乃至几十微安(μA)，工作状态下的典型功耗小于 2mW，可在无主动制冷或加热状态下工作；3) VCSEL 能输出圆形且对称的高光束质量的激光，通过单个透镜即可实现光束整形。上述特点使得 VCSEL 特别适用于对工作温度范围要求高、供电资源和空间均有限的场合，如目前国内外重点关注的微型原子传感器(原子钟/原子磁力仪/原子陀螺)，其主要原理是利用激光与原子的相互作用来实现对时间、磁场以及载体姿态的精密测量。原子传感器的关键部件之一是高温工作、小体积以及低功耗的半导体激光光源，如前面所述，VCSEL 的几大优势可完美满足原子光学传感的应用要求。因此，国外从发展微型原子光学传感器技术之初便将 VCSEL 视为必须同步发展的关键技术之一。

以微型原子传感器的典型代表——芯片级原子钟(Chip-scale Atomic-clock, CSAC)为例，灯泵原子钟和基于 VCSEL 芯片级原子钟的工作原理示意图如图 2 所示，其主要区别是芯片级原子钟是在 VCSEL 上直接外加一个正弦 RF 源，系统无需采用灯泵和微波腔，这显著降低了原子钟的体积和功耗，进一步结合微纳加工技术，实现了原子钟的芯片化制备^[3]。



(a) 传统的双路调制原子钟系统工作原理图



(b) 采用 VCSEL 驱动源的芯片级原子钟示意图

图 2 传统原子钟与芯片级原子钟的结构对比

Fig. 2 Structure comparison of conventional double-resonance Rb atomic clock and VCSEL-based chip-scale atomic clock

为满足原子传感器的应用需求，VCSEL 的性能一般需要达到如下水平：1) 必须能够输出稳定的单模激光，并能调谐到与碱金属原子的 D_1 或 D_2 能级相对应的频率；2) 在高温下(80°C 以上)稳定工作；3) 能够输出稳定的线偏振光；4) 在满足以上要求的前提下，寿命要超过 10 年。

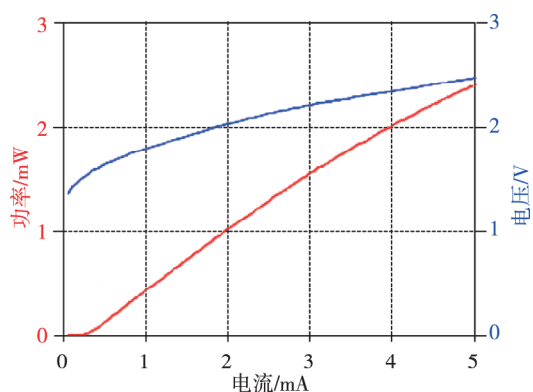
上述共性要求可总结为“单模、单偏振、高温工作、稳定可靠”。此外，各种不同类型的原子传感器如原子磁强计、原子陀螺等分别对 VCSEL 的其他性能如功率、线宽等提出不同要求。随着微型原子传感器技术的不断发展，各种新的应用场景不断被开发出来，而作为核心部件的 VCSEL 性能对系统整体指标的影响尤为明显，是原子传感器研发过程中需要重点解决的瓶颈技术之一。

1 Cs 原子传感用 VCSEL

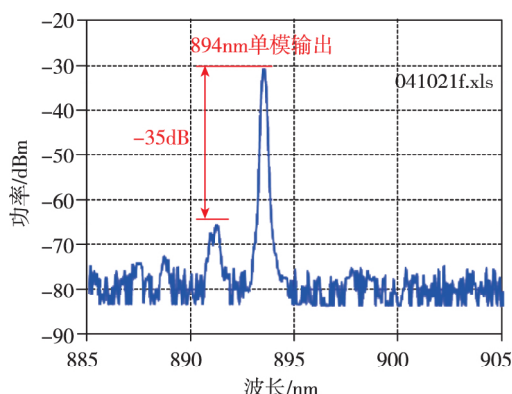
Cs 原子传感使用的 VCSEL 主要为 852nm 和 894nm 波段，这两个波长对应的 VCSEL 器件结构及工艺与光通信领域常用的 850nm VCSEL 基本一致。因此，在其发展过程中采用的设计和技术均源自相关研究机构和企业的光通信领域的积累。国外主要研究机构包括德国 Ulm 大学、美国 Sandia 国家实验室等在该领域取得了早期的研究成果，国内的中科院长春光机所报道了自主研发的器件以及相关应用结果。在商用产品方面，目前以国外企业为主，主要供应商有美国 VIXAR 公司以及德国 Philips Photonics 公司(原 ULM Photonics 公司)。

2003 年, 德国 Ulm 大学通过在 850nm VCSEL 表面刻蚀椭圆状的形貌获得了稳定的单模单偏振激光输出^[4], 为 VCSEL 满足原子传感应用需求奠定了基础。2005 年, 德国 Ulm 大学提出了表面反相光栅结构, 研制出满足单模单偏振以及高温工作要求的 VCSEL 器件, 其性能指标为: 边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio, SMSR) 大于 30dB, 正交偏振抑制比(Orthogonal Polarization Suppression Ratio, OPSR) 大于 20dB, 室温基模功率大于 2mW, 在高温下(90℃) 的 SMSR 和 OPSR 均保持稳定^[5]。

2006 年, 美国 Sandia 国家实验室与 Symmetricom 公司合作研制出了阈值电流为 0.3mA、激光线宽为 50MHz、在 1mA 注入电流下的 SMSR>35dB 的高性能 894nm VCSEL, 其工作特性曲线如图 3 所示, 足以满足原子钟和磁强计的应用要求^[3]。



(a) 电流-电压-功率曲线

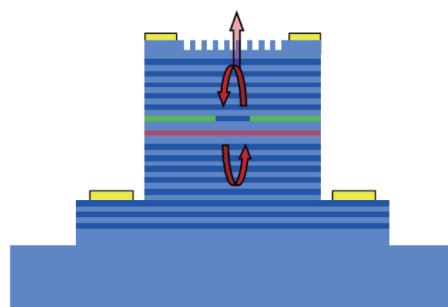


(b) 光谱特性曲线

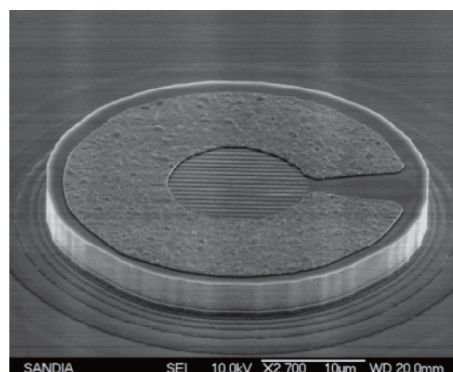
图 3 美国 Sandia 国家实验室研制的 894nm VCSEL 工作特性曲线

Fig. 3 Output characteristic curves of Sandia 894nm VCSEL

2007 年, 美国 Sandia 国家实验室在其年度报告中详细介绍了专门为原子传感应用设计的表面集成光栅 VCSEL, 其设计思路与德国 Ulm 大学类似。如图 4 所示, 最终实现了 OPSR>15dB, 并且温度稳定性良好, 在环境温度为 85℃、注入电流为 10 倍阈值时仍能保持单偏振工作^[6]。2009 年, 美国 Sandia 国家实验室又报道了其在窄线宽 852nm VCSEL 方面的研究成果, 实现的激光线宽为 23MHz^[7]。



(a) 光栅集成结构示意图

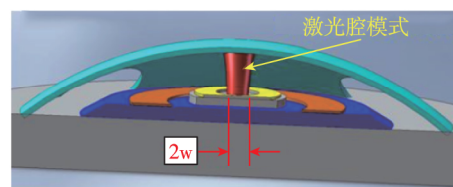


(b) 表面光栅的扫描电镜照片

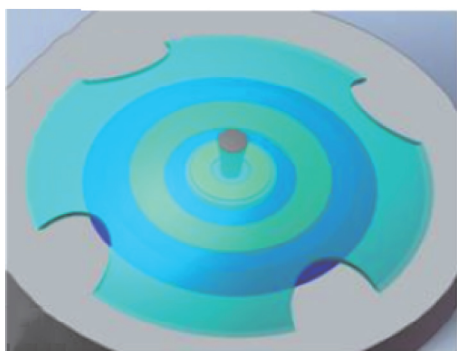
图 4 偏振稳定 VCSEL 器件

Fig. 4 Diagram of polarization stabled VCSEL

2011 年, 美国 Sandia 国家实验室在一份项目报告中总结了其在 852nm 以及 894nm VCSEL 方面的研究成果, 重点介绍了为实现 VCSEL 窄线宽激光输出所采用的一种空气腔结构, 如图 5 所示。



(a) 剖面图



(b) 顶视图

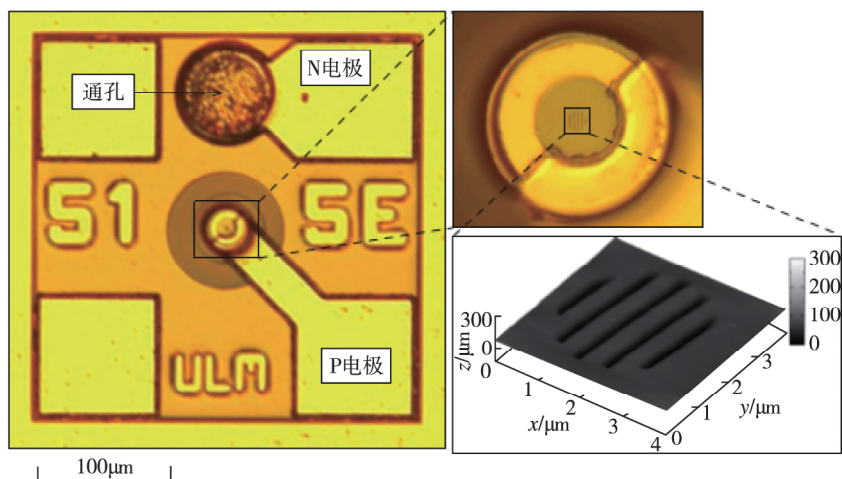
图 5 “空气腔”结构 VCSEL 示意图

Fig. 5 Diagram of “air-cavity” VCSEL

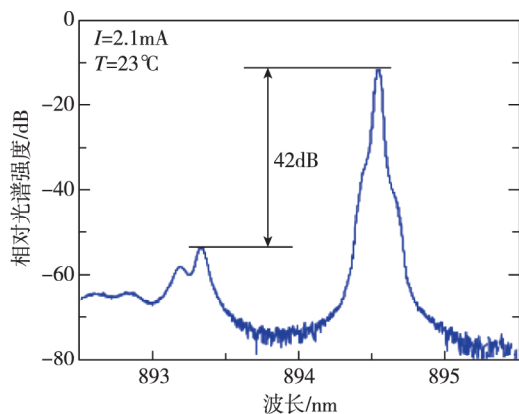
通过该结构将 VCSEL 的基模输出功率提高至 2mW 以上, 使其满足更多种类的原子传感器应用需求^[8]。

美国 Sandia 国家实验室研制的 VCSEL 器件在输出功率、线宽等方面较为突出, 2011 年后相关研究转入工程化应用阶段, 再未有相关文献报道。

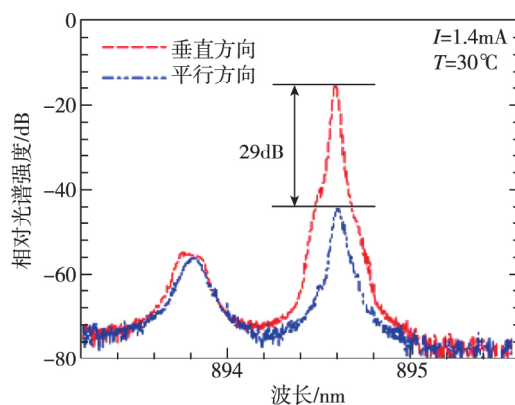
德国 Ulm 大学在 2011 年报道了表面集成光栅结构的 894nm VCSEL 方面的研究^[9], 2013 年报道了该器件设计和相关性能表征的详细结果, 器件的 SMSR 最高为 42dB, OPSR 最高为 29dB, 在 80℃ 下的单模输出功率为 0.5mW, 同时报道了所研制的 VCSEL 用于原子钟的实验结果, 具体如图 6 所示^[10-11]。德国 Ulm 大学研制的 VCSEL 器件代表了世界最高水平, 不过在结束了相关项目研究之后再未见报道原子传感 VCSEL 的相关工作。笔者曾到访德国 Ulm 大学的实验室并与 VCSEL 相关研究人员进行交流, 他们认为原子传感应用对 VCSEL 输出波长的苛刻要求导致良率过低, 这是未来需要解决的关键技术难点。



(a) VCSEL 器件显微照片



(b) 单模输出特性



(c) 偏振光谱特性

图 6 德国 Ulm 大学研制的 894nm VCSEL 器件

Fig. 6 894nm VCSEL developed by Ulm University

在国内, Cs 原子传感专用 VCSEL 技术方面也取得了一定进展。中科院长春光机所于 2015 年报道了 894nm VCSEL 的研究结果, 器件在 110℃ 下的阈值电流为 0.32mA, 输出波长为 894.6nm, SMSR>25dB, 如图 7 所示^[12]。2016 年, 中科院长春光机所又报道了与用户单位合作将自主研制的 VCSEL 成功用于 Cs 原子钟的实验结果, 初步验证了国产 VCSEL 在原子传感领域的适用性, 如图 8 所示^[13]。

2017 年, 中科院长春光机所通过表面浮雕结构实现了 894nm VCSEL 器件 80℃ 下单模输出功率为 0.45mW, 对应的 SMSR 为 30dB^[14]。2018 年, 中科院长春光机所与德国 Berlin 工业大学合作开发

出了适用于批量生产的表面光栅集成技术, 将单模 894nm VCSEL 80℃ 下的 OPSR 提高至 30dB, 如图 9 所示^[15]。

Cs 原子传感专用 VCSEL 的商用产品主要由德国 Philips Photonics 公司和美国 VIXAR 公司提供。Philips Photonics 公司的前身为 U-L-M Photonics, 该公司与德国 Ulm 大学长期保持了密切的合作关系, 其提供的 852nm VCSEL 的主要技术指标为: 20℃ 下的单模输出功率为 0.5mW, SMSR>40dB, 线宽为 100MHz。美国 VIXAR 公司主要提供 894nm VCSEL, 主要技术指标为: 80℃ 下的单模输出功率为 0.15mW, SMSR 约为 20dB, OPSR 约为 13dB, 线宽为 50MHz。

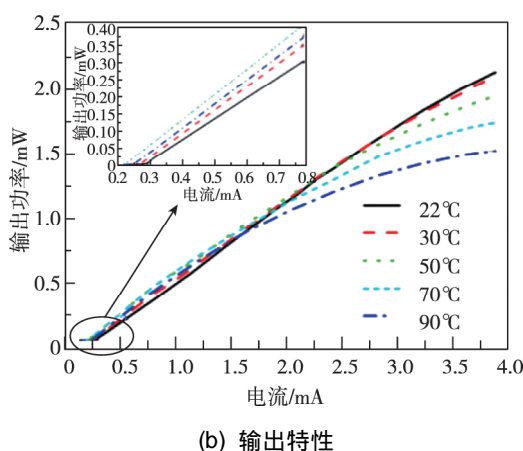
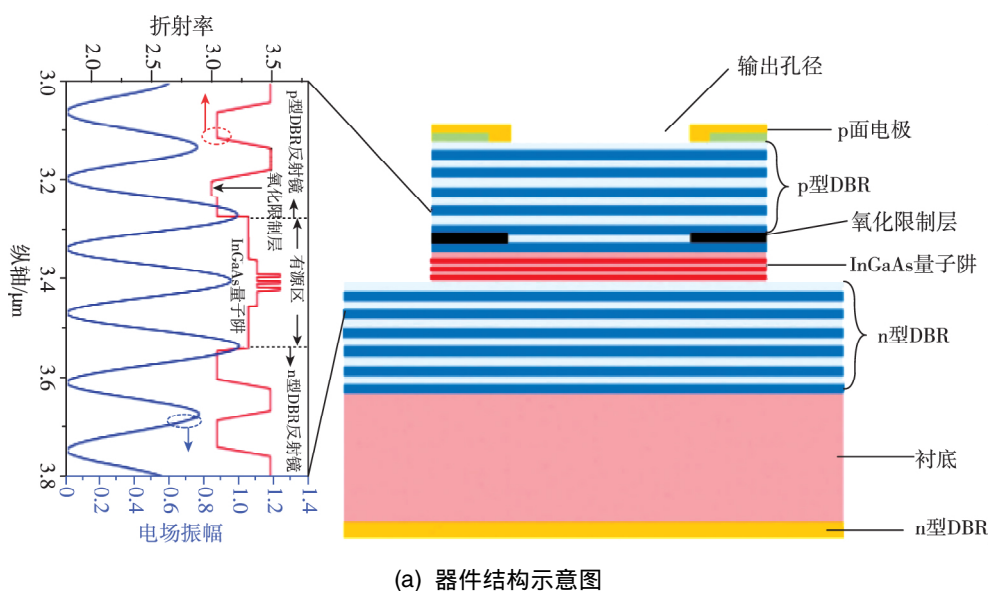


图 7 中科院长春光机所研制的 894nm VCSEL 器件

Fig. 7 894nm VCSEL developed by Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

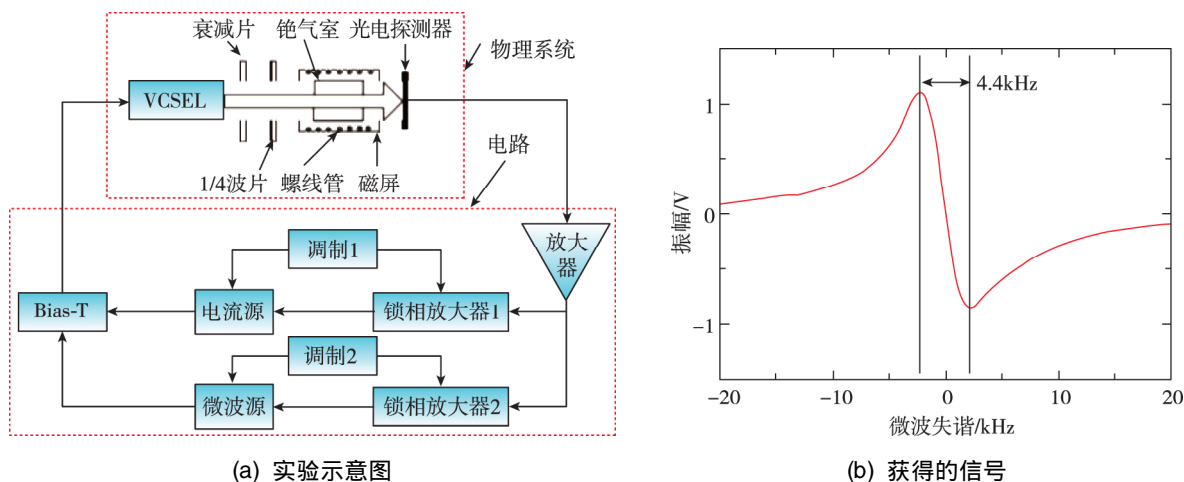


图 8 VCSEL 在原子钟中的验证系统示意图及获得的信号

Fig. 8 Schematic diagram of VCSEL verification system in atomic clock and its acquired signal

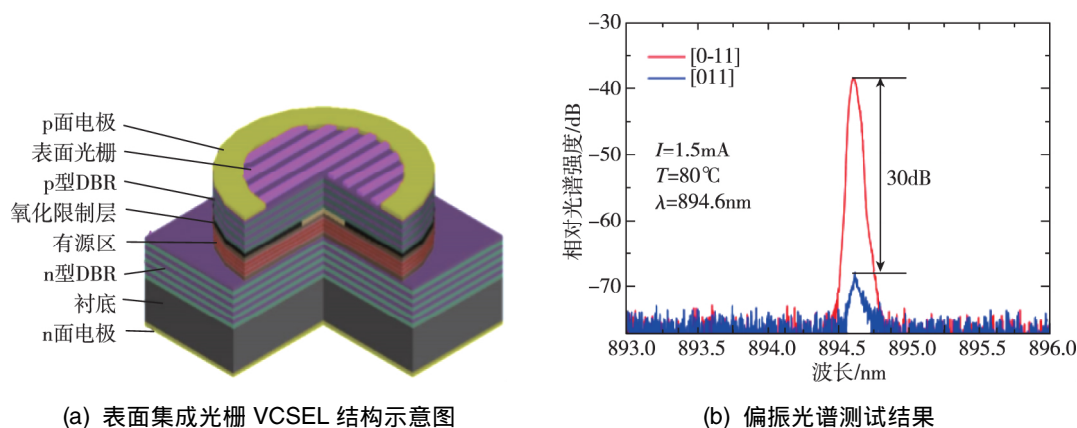


图 9 中科院长春光机所研制的表面集成光栅 VCSEL 器件

Fig. 9 Surface grating integrated VCSEL developed by Changchun Institute of Optics ,
Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences

2 Rb 原子传感用 VCSEL

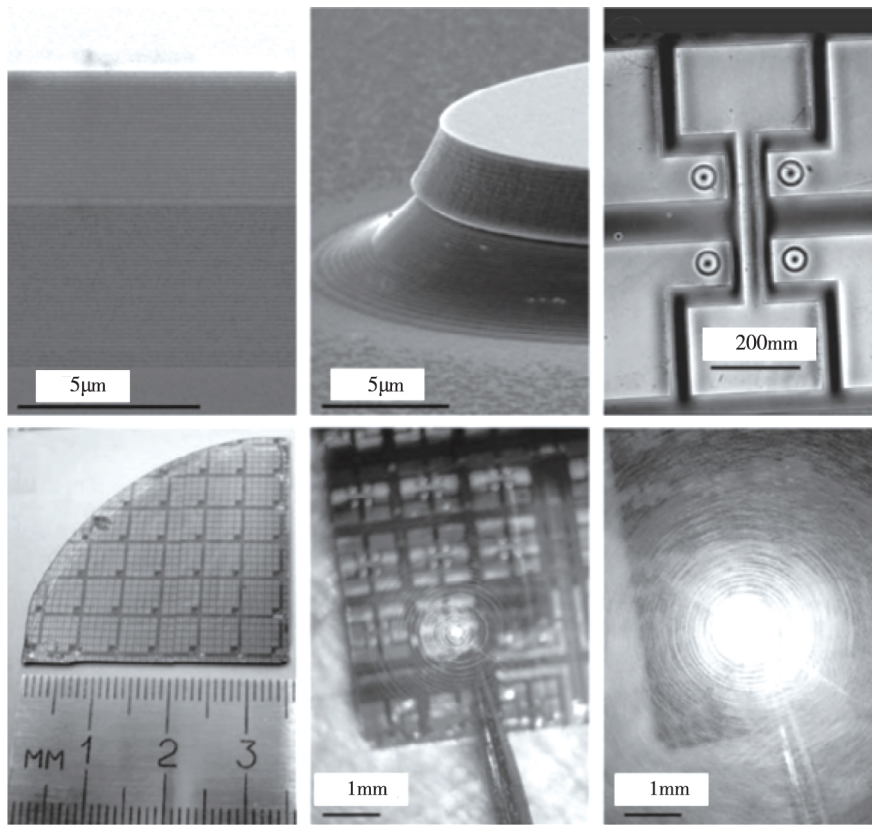
Rb 原子传感要求 VCSEL 的输出波长为 780nm 或 795nm 波段, 由于该波段与光通信波段相差较大, 国外公开的报道较少。商用产品的主要供应商仍为德国 Philips Photonics 公司和美国 VIXAR 公司。

2009 年, 俄罗斯科学院 Rzhano 半导体物理研究所制作出了高性能单模稳定工作的 795nm VCSEL, 阈值电流为 0.15mA, 0.9mA 下的 SMSR > 30dB, 输出功率为 0.219mW, 如图 10 所示^[16]。

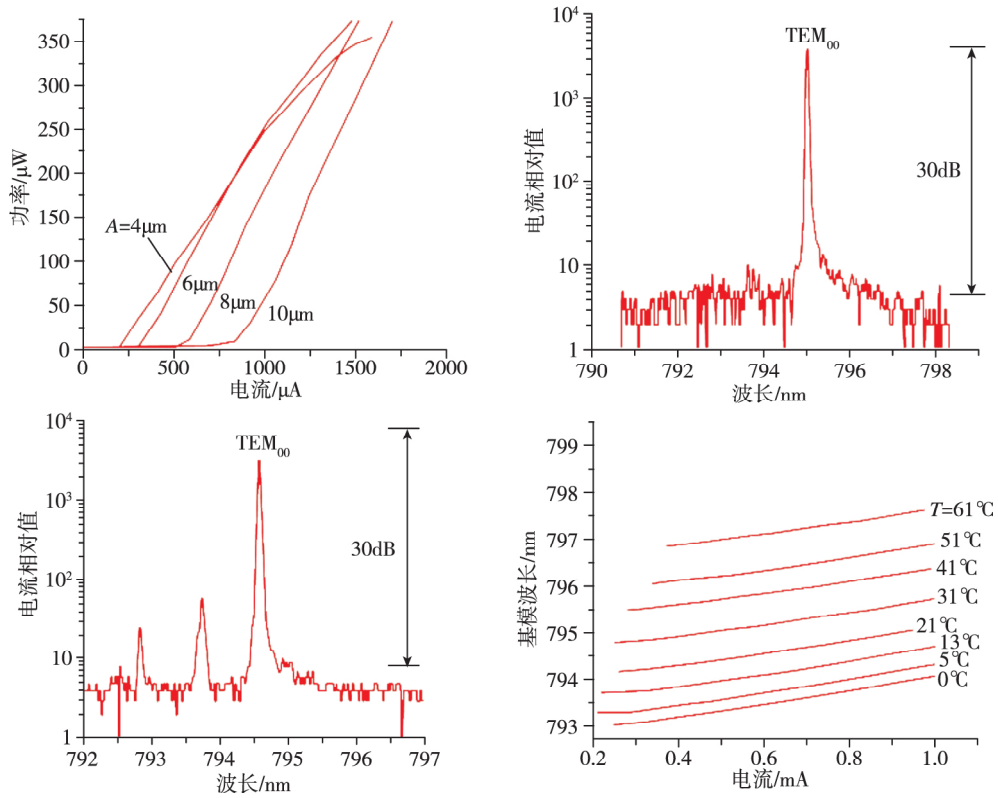
中科院长春光机所于 2013 年报道了采用增益-腔模失配结构实现高温稳定工作的 795nm VCSEL 器件, 提出了完整的理论和设计模型^[17], 通过调控量子阱增益与腔模之间的失配量实现 VCSEL 在特定温度范围内的低阈值电流工作, 同时提出了

构建侧向散热通道的 VCSEL 器件结构^[18]。2014 年, 中科院长春光机所报道了 795nm VCSEL 的材料生长及器件测试结果, 器件呈现多模工作状态, 在 52℃ 条件下的激射波长为 794.7nm^[19]。

在商用产品方面, 美国 Princeton Optonics 公司曾是 Rb 原子传感专用 VCSEL 的主要供应商, 但该公司在被奥地利 AMS 集团收购之后停止了所有特殊波长 VCSEL 的相关业务。目前, 美国 VIXAR 公司提供的 795nm VCSEL 芯片产品主要性能为: 75℃ 下输出功率为 0.15mW, SMSR 约为 20dB, OPSR 约为 16dB, 线宽为 40MHz。德国 Philips Photonics 公司提供的 TO 封装产品性能为: 最大输出功率为 1mW, SMSR 约为 35dB, 线宽为 30MHz。



(a) VCSEL 器件实物照片



(b) 输出特性

图 10 俄罗斯科学院 Rzhanov 半导体物理研究所研制的 795nm VCSEL

Fig. 10 795nm VCSEL developed by Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences

近几年,国内外学术界及产业界的关注焦点主要是面向消费电子或光通信应用的高速 940nm 或 850nm 波段 VCSEL。原子传感作为一种相对小众的高端应用,对 VCSEL 的波长及其他光电性能均提出了很高的技术要求。在这一细分领域中,不同类型的原子传感器对 VCSEL 的功率、线宽、偏振等的要求又不尽相同。得益于相关科研机构和企业多年来在光通信等领域的技术积累,基于同类技术开发的 VCSEL 器件能够较好地满足对功率要求较低的原子传感应用(如原子钟或原子磁强计)。但对于需要光源具有更高功率的原子陀螺等,基于常规技术的 VCSEL 在单模功率方面遇到了明显瓶颈:国内外报道的 VCSEL 器件单模功率普遍低于 10mW,而目前已经实现工程化应用的分布反馈(Distributed Feedback,DFB)激光器的功率通常为 40mW 以上。如何突破常规结构的功率瓶颈,决定了 VCSEL 能否在原子传感领域进一步推广应用。

国内在原子传感用 VCSEL 技术研发方面目前进展较快,并且也进行了部分示范应用。在后续发展中,需要加深对器件失效机理的理解。在提高可靠性、一致性的基础上,进一步提高 VCSEL 的功率等关键性能。

3 结论

VCSEL 是原子传感器实现微型化和低功耗的使能技术之一。国外在发展原子传感器技术的同时,对包括 VCSEL 在内的各种关键部件进行了研发布局,目前在原子传感专用 VCSEL 技术方面已经趋于成熟。相比之下,国内在 VCSEL 领域虽然取得了部分研发和示范应用进展,实现的技术指标部分接近或略优于国外已公开报道的结果,但在器件工程化水平方面与国外尚存在明显差距。此外,原子传感器技术的不断发展和新应用场景的不断提出,对 VCSEL 的性能提出了更为苛刻的要求。需要进一步探索新的结构和方法,突破现有 VCSEL 技术的性能“天花板”,助力我国原子传感技术的发展。

参考文献

- [1] Soda H, Iga K, Kitahara C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [2] Yu S F. Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers [M]. New York: Wiley, 2003.
- [3] Serkland D K, Peake G M, Gerb K M, et al. VCSELs for atomic clocks [J]. SPIE, 2006, 6132: 613208.
- [4] Debernardi P, Unold H J, Maehns J, et al. Single-mode, single-polarization VCSELs via elliptical surface etching: experiments and theory [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(5): 1394-1405.
- [5] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, et al. Polarization-stable oxide-confined VCSELs with enhanced single-mode output power via monolithically integrated inverted grating reliefs [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(5): 982-989.
- [6] Keeler G A, Geib K M, Serkland D K, et al. VCSEL polarization control for chip-scale atomic clocks [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2007.
- [7] Serkland D K, Keeler G A, Geib K M, et al. Narrow linewidth VCSELs for high-resolution spectroscopy [J]. SPIE, 2009, 7229: 722907.
- [8] Serkland D K, Chow W W, Geib K M, et al. Final report on LDRD project: narrow-linewidth VCSELs for atomic microsystems [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2011.
- [9] Al-Samaneh A, Sanayeh M B, Renz S, et al. Polarization control and dynamic properties of VCSELs for MEMS atomic clock applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1049-1051.
- [10] Gruet F, Al-Samaneh A, Kroemer E, et al. Metrological characterization of custom-designed 894.6 nm VCSELs for miniature atomic clocks [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5781-5792.
- [11] Miah M J, Al-Samaneh A, Kern A, et al. Fabrication and characterization of low-threshold polarization-stable VCSELs for Cs-based miniaturized atomic clocks [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1701410.
- [12] Zhang J W, Zhang X, Zhu H B, et al. High-temperature operating 894.6nm-VCSELs with extremely low threshold for Cs-based chip scale atomic clocks [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14763-14773.
- [13] 张星, 张奕, 张建伟, 等. 894nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用 [J]. 物理学报, 2016, 65(13): 134204.

ZHANG Xing, ZHANG Yi, ZHANG Jian-wei, et al.

- 894nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65 (13): 134204.
- [14] Xiang L, Zhang X, Zhang J W, et al. Stable single-mode operation of 894.6 nm VCSEL at high temperature for Cs atomic sensing [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26 (7): 074209.
- [15] Liu Y Y, Zhang X, Huang Y W, et al. OPSR enhancement of high-temperature operating shallow-surface grating VCSELs [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4486-4490.
- [16] Derebezov I A, Haisler V A, Bakarov A K, et al. Single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers for atomic clocks [J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, 45(4): 361-366.
- [17] Zhang J, Ning Y Q, Zeng Y G, et al. Design and analysis of high-temperature operating 795 nm VCSELs for chip-scale atomic clocks [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(4): 045802.
- [18] 张建伟, 宁永强, 张星, 等. 增益-腔模失配型高温工作垂直腔面发射半导体激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0502001.
- ZHANG Jian-wei, NING Yong-qiang, ZHANG Xing, et al. Gain-cavity mode detuning vertical cavity surface emitting laser operating at the high temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0502001.
- [19] 张建, 宁永强, 张建伟, 等. 微型铷原子钟专用 795nm 垂直腔面发射激光器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 50-57.
- ZHANG Jian, NING Yong-qiang, ZHANG Jian-wei, et al. 795nm VCSELs for ^{87}Rb based miniaturized atomic clock [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (1): 50-57.



姓名: 张星
性别: 男
学历: 博士研究生
专业: 光电子
职称: 副研究员
研究方向: 垂直腔面发射半导体激光器、半导体激光芯片技术

(上接第 115 页)

- RRT algorithm [J]. *Computer Engineering and Design*, 2018, 39 (12): 3705-3711.
- [8] 毕京强. 内河船舶自动避碰决策研究[D]. 大连海事大学, 2016.
- BI Jing-qiang. The study on inland ship automatic collision avoidance decision[D]. *Dalian Maritime University*, 2016.
- [9] Thrun S, Burgard W, Fox D. 概率机器人[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- Thrun S, Burgard W, Fox D. *Probabilistic robotics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [10] Xu Q Y, Wang N. A survey on ship collision risk evaluation [J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2014, 26(6): 475-486.



姓名: 文龙贻彬
性别: 男
学历: 硕士研究生
专业: 控制科学与工程
研究方向: 导航、制导与控制