

基于偏振测量的 VCSEL 激光器阈值行为研究

石 凡^{1,2}, 崔永顺^{1,2}, 赵 环^{1,2},
王暖让^{1,2}, 方维海^{1,2}, 杨仁福^{1,2}, 年 丰^{1,2}, 冯克明^{1,2}
(1. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100039;
2. 计量与校准技术重点实验室, 北京 100039)

摘 要:设计构建了垂直腔面发射激光器偏振测试系统,利用该测试系统研究了激光器不同偏振模式的阈值行为特点。激光器的输出光随着驱动电流的增大将会出现 P 偏振以及 S 偏振两种相互正交的偏振分量,并且两者具有不同的工作阈值;进一步依据测得的阈值点将激光器分为三个工作区域,通过对非偏振及偏振测试结果的比较分析得出:垂直腔面发射激光器的非偏振测量中观测到的工作阈值点体现的是 P 偏振分量的阈值点;激光器 S 偏振分量的阈值需要通过偏振测量才能明显观测到;P 偏振与 S 偏振分量阈值电流之间的工作区域具有最好的线偏振度。本文的研究为垂直腔面发射激光器的未来研制测试工作和更好应用夯实了基础。

关键词:垂直腔面发射激光器;偏振测试系统;阈值行为;工作特性

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.006

Study on the threshold behavior of a VCSEL based on polarization test system

SHI Fan^{1,2}, CUI Yong-shun^{1,2}, ZHAO Huan^{1,2}
WANG Nuan-rang^{1,2}, FANG Wei-hai^{1,2}, YANG Ren-fu^{1,2}, NIAN Feng^{1,2}, FENG Ke-ming^{1,2}
(1. Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100039, China;
2. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100039, China)

Abstract:The polarization test system for a vertical cavity surface emitting laser(VCSEL)is designed. With this test system,the threshold behaviors of VCSEL are studied. With the increase of driven current,two orthogonal polarization states are observed and their thresholds are different. According to the thresholds,the working region of the laser is divided into three parts. The analysis based on the non-polarization and polarization experimental results show that the threshold of the experimental curve from the non-polarization measurements is the threshold of P-polarized light; the threshold of the S-polarized light of the laser is observed obviously with polarization measurements; In the working region between the thresholds of P-polarized and S-polarized light,the degree of the linear polarization is higher than other working regions. The studies of this paper set the steady basis for further researches,test,and applications of a vertical cavity surface emitting laser.

Key words:vertical cavity surface emitting laser;polarization test system;threshold behavior;working characteristic

1 引 言

垂直腔面发射激光器^[1-5](vertical cavity surface emitting laser,VCSEL)是一种基于半导体技术的小型化激光器,与传统激光系统相比具有低阈值、单纵模工作、动态调制频率高、易实现二维集成等优

点,在相干布居囚禁(coherent population trapping)原子频标、光通信、光互联、空间技术、图像信号处理等

作者简介:石 凡(1984-),男,工程师,博士,主要从事非线性光学及光电技术研究。E-mail:shifan_chinese@sina.com

收稿日期:2013-08-26

技术领域有着十分广泛的应用前景^[6-13]。

作为光电系统中的激光源, VCSEL 激光器工作特性的优劣影响着系统的性能。对于一个激光器来说, 阈值行为是其最基本的工作特性, 并且在不同的偏振配置下激光器可能会展现出不同的行为特性, 这些特性直接决定了整体光电系统的研制测试方案以及所能达到的技术指标。因此, 无论在科学研究还是实际工程应用中, 把握偏振测量条件下 VCSEL 激光器的阈值行为并理解其体现的内在机制能够直接为相关光电系统的研制开发提供非常重要的技术支持和理论制导, 拥有不可替代的核心作用。我们设计并构建了 VCSEL 激光器偏振测试系统, 利用该系统测试研究了非偏振和偏振测量配置下 VCSEL 激光器不同偏振模式的阈值行为, 并根据测试结果进行了进一步比较分析, 讨论了 VCSEL 激光器在不同工作区域内的特征, 为 VCSEL 激光器未来的研制测试工作以及在工程领域的更好应用夯实了基础。

2 实验配置

实验测试系统配置如图 1 所示, 选用的 VCSEL 激光器的中心波长为 795 nm, 输出光束形状为锥形光。首先, 利用基于 FPGA 的驱动电路系统使 VCSEL 激光器进入工作状态, 系统的驱动电流可以在 0~3 mA 之间连续调谐。进一步通过电压电流检测系统实时测量并记录 VCSEL 激光器的实际工作电流以及工作电压, 可以由该检测系统得到 VCSEL 激光器的电压-电流 ($V-I$) 变化趋势。

VCSEL 激光器的输出光束通过一个准直透镜形成准直光束, 随后, 通过操作复位镜使准直光束发生反射行为或是直行通过, 当复位镜处于直立状态时, 图 1 中的有效实验测试系统为长虚线框 I 内所示装置, 实验测试系统为非偏振测量配置, 准直光束经过复位镜反射后由聚焦透镜聚焦至光电探测器上, 由光电探测器直接测量得到 VCSEL 激光器的总输出光功率, 调整驱动电流可以得到 VCSEL 激光器的总输出光功率随驱动电流的变化趋势; 当复位镜处于放倒状态时, 图 1 中的有效实验测试系统为短虚线框 II 内所示装置, 实验测试系统为偏振测量配置, 此时利用偏振分光棱镜 (Polarization beam splitting prism, PBS) 将准直光束中相互正交的 P 偏振光和 S 偏振光彼此分开, 进一步通过两组由聚焦透镜和光电探测器构成的光功率测量装置分别对 P 和 S 偏振模式的光功率随驱动电流的变化趋势进行测量。

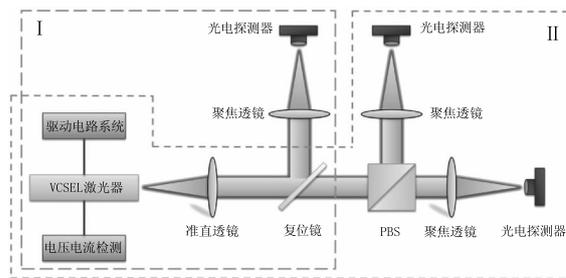


图1 VCSEL激光器测试系统实验配置(长虚线框 I 内所示实验测试系统为非偏振测量配置;短虚线框 II 内所示为实验测试系统为偏振测量配置)

3 测试结果与分析

3.1 VCSEL 激光器非偏振测试结果

首先利用图 1 中框 I 内所示的装置测试 VCSEL 激光器的输出总功率随驱动电流的变化趋势以及 $V-I$ 曲线。图 2 中所示为 VCSEL 激光器输出总功率随驱动电流的变化趋势, 由测量结果可以看出, 当注入电流从 0 mA 开始逐渐增加时, VCSEL 激光器的输出光在开始时并无法观测到; 当注入电流增加到约 0.5 mA 后, 输出光总功率急剧增加, 这个电流称为阈值电流, 用 I_{th} 表示; 在驱动电流继续增大时, 输出光总功率增速将会放缓。图 3 中所示为 VCSEL 激光器的工作电压与驱动电流之间的变化关系, 结果显示 VCSEL 激光器的端电压 V 随注入电流 I 的增加而迅速上升, 然后趋于缓和和平稳。

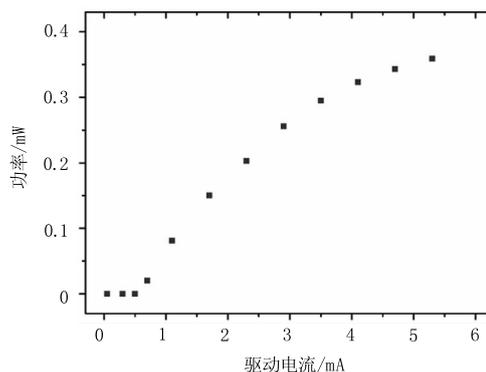


图2 VCSEL激光器输出总功率随驱动电流的变化趋势

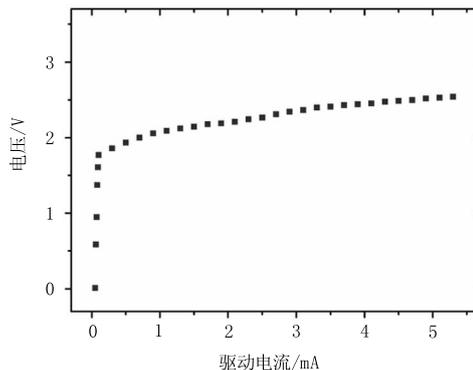


图3 VCSEL激光器的工作电压随驱动电流的变化趋势

3.2 VCSEL 激光器偏振测试及比较分析

采用图 1 中框 II 内所示装置对 VCSEL 激光器进行偏振测试,并结合非偏振测试结果比较分析 S 和 P 偏振分量的工作特性。两个偏振分量的输出光功率随驱动电流的变化趋势如图 4 所示。可以看出,VCSEL 激光器的输出光随着驱动电流的增大将会出现 P 偏振分量和 S 偏振分量两种相互正交的偏振光,并且具有不同的工作阈值。随着驱动电流的增加,P 偏振分量首先达到阈值点,阈值约为 0.5 mA,当超过阈值点后,其光输出功率随电流的增长而快速上升,随后慢慢趋于平稳;当驱动电流达到约 1.7 mA 时,S 偏振分量达到阈值,超过阈值点后光输出功率迅速增大,随后趋于平稳。虽然 P 偏振分量与 S 偏振分量的输出功率随驱动电流的变化趋势很类似,但是其工作阈值点具有明显差异。通过图 2 中曲线可以知道 VCSEL 激光器整体输出光的工作阈值为 0.5 mA,与 P 偏振分量的阈值基本一致。这个现象说明,图 1 中所示的阈值点实际上体现的是 P 偏振分量的阈值点,当驱动电流加大到该点后首先出现的是 P 偏振光而并无 S 偏振分量,必须在更大的电流激励下 S 偏振分量才会出现。通过比较还可以发现,如果不采取图 1 中框 II 所示的偏振测量方式,而仅通过框 I 所示的非偏振测量系统得到的变化趋势图将很难观测到 S 偏振光的阈值行为特点和相应的功率随驱动电流的变化趋势。

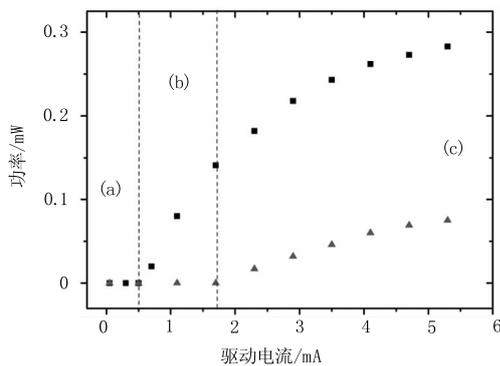


图 4 P 与 S 偏振分量的输出功率随驱动电流的变化趋势
(■ - P 偏振分量; ▲ - S 偏振分量)

根据偏振测量得到的 VCSEL 激光器的阈值行为特性,可以进一步针对 VCSEL 激光器工作电流在实际使用中的选择进行分析。为了后续讨论的清晰明确,我们将图 4 中所示的测试结果以 P 偏振分量和 S 偏振分量的阈值点 $I_{th}(P)$ 和阈值点 $I_{th}(S)$ 为参考点,把整个变化趋势图按照驱动电流由弱至强的变化依次划分为 (a)、(b)、(c) 三个工作区域。其中,工作区域 (a) 指的是 0 mA ~ $I_{th}(P)$ 之间的部分,

在该工作区域内,虽然 VCSEL 激光器的端电压将会随着驱动电流有所变化,但是任何一种偏振形式的光都无法产生,VCSEL 激光器处于不工作的状态。(b) 区域为 $I_{th}(P) \sim I_{th}(S)$ 之间的区域,在该区域内,P 偏振光达到工作阈值电流,进入工作状态,而 S 偏振光尚未开启,此时 VCSEL 激光器的出射光为线偏振光。在实际使用过程中,在需要提供质量较好的线偏振光时,则必须使 VCSEL 激光器工作于 (b) 工作区域。(c) 区域为 $I_{th}(S)$ 以上的区域,在进入该区域后,由于 VCSEL 激光器的两种相互正交的偏振光同时处于开启的状态,所以使得整体输出光慢慢偏离线偏振态,并且两个正交分量之比随着工作电流改变,线偏度随工作电流的增大而减小。但是,在另一方面,VCSEL 激光器在该工作区域内具有比其他区域更强的输出功率,可以为光电系统提供更高的输出光强度。因此,对于光通信、新型原子频标、光电集成等对偏振度及光输出功率有明显依赖的研究领域,必须在研制测试和使用中根据偏振测量得到的 VCSEL 激光器阈值行为特性选择合适的工作区域,达到优化设计和提升光电系统性能指标的目的。

4 总结

设计构建了 VCSEL 激光器偏振测试系统,并利用该测试系统研究了 VCSEL 激光器的工作特性和不同偏振模式的阈值行为。VCSEL 激光器的输出光随着驱动电流的增大将会出现 S 偏振和 P 偏振两种相互正交的偏振分量,并且两者具有不同的工作阈值 $I_{th}(P)$ 和 $I_{th}(S)$,分别约为 0.5 mA 和 1.7 mA。根据阈值点 $I_{th}(P)$ 和 $I_{th}(S)$ 可以将 VCSEL 激光器分为三个工作区域,对测试结果进行比较分析可以得到:VCSEL 激光器的非偏振测量中得到的工作阈值点 I_{th} 实际体现的是 P 偏振分量的阈值点 $I_{th}(P)$;对比分析 VCSEL 激光器的偏振与非偏振测量,结果表明非偏振测量无法明显观测到 S 偏振分量的阈值,必须通过偏振测量才能明显观测到其阈值行为;此外,P 偏振与 S 偏振分量阈值电流之间的工作区域具有最好的线偏振度,因此,需要根据实际应用需求选择最适合的驱动电流。本文的研究内容可以应用在 VCSEL 激光器的研发测试以及光通信、新型原子频标、空间技术、光互联和光电集成等需要使用 VCSEL 激光器,并对其光偏振依赖性很强的研究领域,为 VCSEL 激光器未来的研制测试工作和的更好应用夯实了基础。

参考文献:

- [1] Chow W W, Choquette K D, Crawford M H, et al. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity-surface-emitting lasers [J]. IEEE J. Quant. Electr., 1997, 33(10): 1810 - 1824.
- [2] Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its Conception and Evolution [J]. Japan. J. Appl. Phys., 2008, 47(1): 1 - 10.
- [3] ZHAO Yingjie, HAO Yongqin, LI Guangjun, et al. Fabrication of new structure vertical-cavity surface-emitting laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 1946 - 1950. (in Chinese)
赵英杰, 郝永芹, 李广军, 等. 新型结构垂直腔面发射激光器的研制 [J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1946 - 1950.
- [4] ZHANG Yan, NING Yongqiang, WANG Ye, et al. High power and high beam quality 980nm bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting laser [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2010, 29(5): 329 - 332. (in Chinese)
张岩, 宁永强, 王烨, 等. 高功率高光束质量 980nm 垂直腔底面发射激光器 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(5): 329 - 332.
- [5] Panajotov K, Thienpont H. Vertical-cavity surface-emitting laser with liquid crystal overlay [J]. Opt. Express, 2011, 19(18): 16749 - 16759.
- [6] Sarza R P. Designing strategy to enhance mode selectivity of higher-output oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Appl. Phys. A, 2005, 81(2): 275 - 283.
- [7] CAO Bin, HAN Liying, ZHANG Cunshan, et al. Spectrum properties of vertical cavity surface emitting lasers [J]. Photon Technology, 2006, 11: 1 - 4. (in Chinese)
曹彬, 韩力英, 张存善, 等. 垂直腔面发射激光器光谱特性的实验研究 [J]. 光子技术, 2006, 11: 1 - 4.
- [8] LIU Lei, ZHAO Zhimin, ZHANG Cunshan, et al. Research on characteristic testing system of VCSEL and its application [J]. Applied Laser, 2007, 27(5): 390 - 392. (in Chinese)
刘磊, 赵志敏, 张存善. 垂直腔面发射激光器特性测试系统与应用研究 [J]. 应用激光, 2007, 27(5): 390 - 392.
- [9] Czyszanowski T, Nakwaski W. Comparison of exactness of scalar and vectorial optical methods used to model a VCSEL operation [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 2007, 43(5): 399 - 406.
- [10] Czyszanowski T, Dems M, Panajotov K. Impact of the hole depth on the modal behaviour of long wavelength photonic crystal VCSELs [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, 40(9): 2732 - 2735.
- [11] ZHAO Jun, QIN Li, YAN Shubin, et al. Design of VCSEL laser control system based on CPT atomic clock [J]. Electronic Design Engineering, 2009, 17(8): 118 - 119. (in Chinese)
赵军, 秦丽, 闫树斌, 等. 基于 CPT 原子钟的 VCSEL 激光器控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2009, 17(8): 118 - 119.
- [12] LIU Yunyan, PAN Jiaoqing, CHENG Chuanfu, et al. Application and key technologies of semiconductor laser in the detection of oxygen [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 501 - 505. (in Chinese)
刘云燕, 潘教青, 程传福, 等. 半导体激光器在氧气探测中的应用及关键技术 [J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 501 - 505.
- [13] Pham T T, Gibbon T B, Monroy I T. VCSEL-based gigabit IR-UWB link for converged communication and sensing applications in optical metro-access networks [J]. Optics Communications, 2012, 285: 5068 - 5072.