

表面液晶-垂直腔面发射激光器阵列的热特性*

王志鹏 张峰 杨嘉炜 李鹏涛 关宝璐†

(北京工业大学信息学部, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

(2019年11月25日收到; 2019年12月24日收到修改稿)

液晶与垂直腔面发射半导体激光器 (VCSELs) 阵列结合可实现波长可调谐、偏振精确控制等, 同时液晶的引入也会改变垂直腔面发射半导体激光器阵列的热特性, 本文设计了表面液晶-垂直腔面发射激光器阵列结构, 并开展了阵列的热特性实验研究. 对比分析了向列相液晶层对 VCSEL 阵列热特性的影响, 实验结果表明, 1×1 , 2×2 , 3×3 三种表面液晶-VCSEL 阵列的阈值电流温度变化率最高可降低 23.6%, 热阻降低 26.75%; 同时, 激光器阵列各发光单元之间的温度均匀性显著提高, 出光孔与周围温差小于 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. 综上所述, VCSEL 阵列中液晶层的引入不仅大大加速激光器阵列单元热量扩散, 而且降低了有源区结温, 提高了 VCSELs 激光器阵列热特性, 为实现高光束质量的单偏振波长可控 VCSEL 激光器阵列打下了良好的理论和实验基础.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 阵列, 液晶, 热特性**PACS:** 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja**DOI:** 10.7498/aps.69.20191793

1 引言

随着信息化时代科学技术的高速发展, 高性能垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 阵列已成为面向高速高密度集成的光互联核心器件, 其具有自身独特的圆形对称光斑、小体积、低功耗和高密度阵列集成^[1-3]等特点, 因此, 易制成大功率阵列激光器件^[4], 并具有重要的商业和军事价值并被广泛地应用到固体激光器抽运、激光引信、高速脉冲测距、红外照明及倍频激光光源^[5-8]等领域中. 然而, 随着科学技术的不断发展, 对激光器阵列光源光束质量提出了越来越高的要求, 例如在多光束可控光源、矢量图像处理、光学相控阵及空间光调制传感等高新技术领域应用中, 往往需要 VCSEL 阵列光束具有高功率、窄线宽的同时, 还要实现波长可调谐、波数控制、偏振精确控制等^[9], 因此, 在实现更高光

束质量控制中, 液晶-VCSEL 受到人们越来越多的关注. Castany 等^[10]通过将液晶置于谐振腔内, 制备了 1550 nm 腔内液晶波长可调谐器件, 实现了调谐电压小于 3 V 时的波长调谐范围大于 30 nm 的偏振光输出; Pan 等^[11]提出了一种将相干耦合 VCSEL 阵列与液晶光学相控阵直接集成的电控光束控制芯片; Frasunkiewicz 等^[12]仿真模拟了波长调谐范围 68.5 nm 的液晶可调谐器件; Panajotov 等^[13,14]将 VCSEL 芯片置于胆甾相液晶盒内, 在理论上研究了光谱、阈值以及偏振特性, 并证明了在一定的温度控制下, 能实现圆偏振光输出, 同时还 将 VCSEL 芯片置于液晶盒内制备外腔液晶可调谐激光器, 实现了激射波长、偏振态和激射阈值的可变性^[15]. 本实验室前期开展了一系列表面液晶-VCSEL 研究工作, 实验发现表面液晶层的引入, 有效扩大了 VCSEL 的正交线偏振态稳定范围和光功率差, 增加了线偏振光的各向异性^[16]. 虽然液

* 国家自然科学基金 (批准号: 60908012, 61575008, 61775007)、北京市自然科学基金 (批准号: 4172011) 和北京市教育委员会 (批准号: 040000546319525, 040000546618006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gbl@bjut.edu.cn

晶与 VCSEL 阵列结合可以实现波长可调谐、波数控制、偏振精确控制等,但对于 VCSEL 阵列而言,其具有高密度阵列集成的特点,会有十分明显的热集聚效应^[17],因此,本文在前期工作基础上,针对表面液晶-VCSEL 阵列器件,详细研究了液晶的引入对 VCSEL 阵列的热特性造成的影响,研究发现液晶层的引入不仅大大改善了液晶 VCSEL 阵列的热特性,降低了由于集成阵列单元而引起的阈值-温度系数,而且提高了热饱和输出功率,使得激光器阵列表面温度均匀性小于 0.5 °C,为实现高光束质量的单偏振波长可控 VCSEL 激光器阵列打下了良好的理论和实验基础.

2 器件结构与制备

图 1 为表面液晶-VCSEL 阵列的结构示意图,本实验所用器件结构采用金属有机物化学气相沉积技术在 n 型 GaAs 衬底上外延生长而成.从 GaAs 衬底自下而上依次生长 n 型分布布拉格反射镜 (DBR)、有源区、氧化限制层、p 型 DBR 和欧姆接触层.其中 n 型 (Si 掺杂) DBR 由 34.5 对 $\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 组成,有源区由 3 对 6 nm 厚的 GaAs 量子阱和 8 nm 厚的 $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 势垒构成,其中心波长为 850 nm, p 型 (C 掺杂) 掺杂 DBR 由 21 对 $\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 组成.而位于有源区和 p 型 DBR 之间的氧化限制层 ($\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$) 厚 30 nm,经过湿氮氧化工艺后形成 Al_2O_3 层,从而形成电流和光场的分布限制.

在 VCSEL 阵列的制备过程中,首先通过光刻技术在外延片上表面获得圆柱形台面的光刻图形,然后使用 DBR 腐蚀液 (体积比为甲醇:磷酸:双氧水 = 3:1:1) 通过湿法腐蚀得到圆柱形台面,腐蚀深度 2.7 μm ,暴露出氧化限制层侧壁.采用湿氮氧

化法在 400 °C 高温下对 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.12}\text{As}$ 层横向氧化,得到直径 20 μm 的氧化限制孔.再通过等离子增强化学气相沉积在外延片上淀积生长一层 300 nm 厚的 SiO_2 作为电绝缘层,再次光刻腐蚀,去掉出光孔上方的 SiO_2 .第三次光刻并溅射 Ti/Au 150 Å/3000 Å,剥离工艺获得出光孔和注入电极,减薄衬底至 150 μm 后,溅射 AuGeNi/Au 500 Å/3000 Å,作为背面电极,并在 270 °C 条件下进行 35 s 退火处理,使电极与半导体材料形成良好的欧姆接触.最后利用光刻型聚酰亚胺 (PI) 在注入电极上制作 5 μm 深凹槽,涂布液晶.

3 实验结果和分析

在制备完成表面液晶-VCSELs 阵列的基础上,通过测量引入液晶前后 1×1 , 2×2 , 3×3 三种阵列的特征温度、单管阈值电流温漂率、斜率效率、饱和光功率、热阻、热串扰和温度分布等参数,对比分析液晶的引入对 VCSEL 阵列热特性的影响.

半导体激光器的特征温度 T_0 是表征半导体激光器温度稳定性的一个重要参数,它与激光器所使用的材料与结构有关^[18]. T_0 越高,激光器的温度稳定性越好,即温度对激光器特性的影响越小.可以通过 I_{th} 随 T 的变化关系 $I_{\text{th}}(T_r + \Delta T) = I_{\text{th}}(T_r) \exp[(T - T_r)/T_0]$ 计算出器件的特征温度 T_0 ^[19],其中 T_r 为室内温度, $I_{\text{th}}(T_r)$ 为室温下的阈值电流,阈值电流 I_{th} 可通过 P - I 曲线二次微分法确定, $\ln I_{\text{th}}$ 随温度 T 的变化如图 2 内图例插图所示,经计算引入液晶前后不同温度下各阵列的特征温度及阈值电流温漂率如图 2 所示,其特征温度分别由无液晶时的 187, 292 和 346 K 提高到 288, 396 和 438 K,增幅可达 54%, 40.43% 和 26.59%,由此可见,液晶的引入增大了激光器阵列的特征温度.

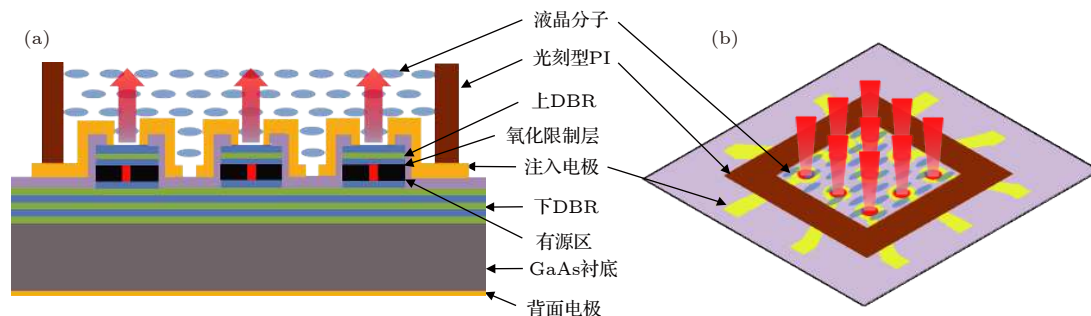


图 1 表面液晶-VCSEL 阵列结构示意图 (a) 横截面图; (b) 俯视图

Fig. 1. Structure of independent addressable surface liquid crystal VCSEL array: (a) Cross section; (b) top view.

这是由于液晶取代空气成为激光器阵列各发光单元之间的导热介质,同时,液晶分子平行于激光器阵列表面分布(液晶的平行热导率 $\kappa_{//}$ 为 $0.22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[20], $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时空气的热导率 $\kappa_{\text{air}, 25 \text{ }^\circ\text{C}}$ 为 $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). 液晶通过较大的热导率加速了有源区热量扩散,减少有源区内部的非辐射复合,使激光器阵列获得了较大的特征温度. 当阵列的温度从 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,激光器内部损耗与有源区热载流子泄漏随之增加,导致阈值电流变大,而引入液晶能显著地降低阵列中单管的阈值电流温漂率,正如图 2 所示,当热损耗功率不变时,在液晶的作用下使得有源区热量扩散增快,减缓结温的增长,因此,液晶 VCSEL 阵列阈值电流温漂率显著降低.

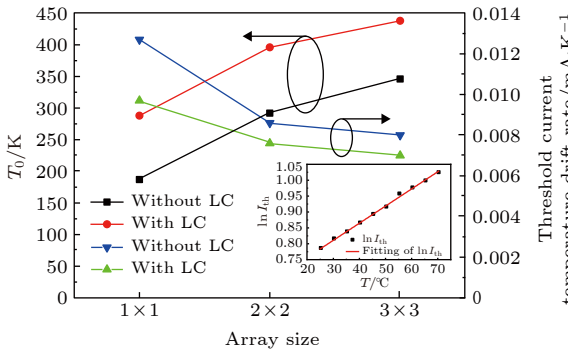


图 2 引入液晶前后各阵列的特征温度和阈值电流温度漂移率
Fig. 2. Characteristic temperature and threshold current temperature drift rate of each array before and after introducing liquid crystal (LC).

研究表明,液晶温度可达到清亮点以上 360 K ^[21],并且随着温度的升高,液晶将进一步改善 VCSEL 光束输出双稳态特性. 图 3 为不同温度下表面液晶 VCSEL 阵列斜率效率变化曲线. 从图 3(a) 可知,对于无液晶的 1×1 , 2×2 , 3×3 VCSEL 阵列,从 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$,其斜率效率随温度的升高显著降低,其中对于 3×3 阵列的斜率效率减幅多达 26.86% ,由此可见温度对斜率效率的影响随着阵列数目的增大而加剧. 而对于液晶 VCSEL 阵列,如图 3(b) 所示,三种阵列随温度的升高斜率效率降低,但其与未引入液晶的三种阵列相比,三种阵列的斜率效率均有所提升,且斜率效率的下降速率明显变缓,其中对于 3×3 阵列改善最为明显,斜率效率的减幅由原来无液晶时的 26.86% 降低至 15.16% ,VCSEL 阵列由于其内部热量积聚增

多,引起结温升高,内部损耗增大,故而造成斜率效率的下降,液晶层的引入显著降低了阵列温度对斜率效率的影响,进而改善管芯散热环境,降低工作温度从而提高功率转换效率^[22].

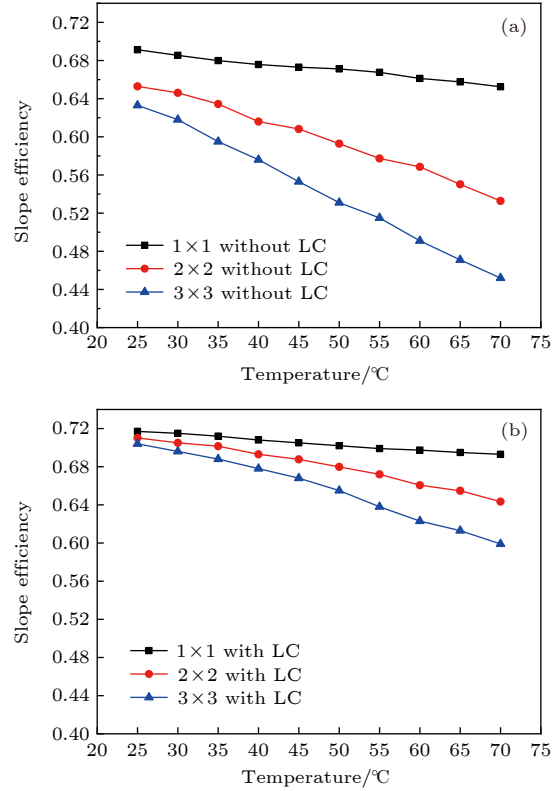


图 3 不同温度下各阵列斜率效率 (a) 无液晶; (b) 有液晶
Fig. 3. Slope efficiency of each array at different temperatures: (a) Without liquid crystal; (b) with liquid crystal.

图 4 为引入液晶前后不同温度下液晶 VCSEL 阵列的电流 P - I 特性曲线及饱和光功率光谱图. 与 1×1 单管 VCSEL 相比,液晶 VCSEL 饱和光功率分别提升了约 4% ,对于 2×2 阵列在 25 , 45 和 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 这三种温度下,引入液晶前的饱和光功率分别为 36.51 , 33.68 , 31.19 mW ,引入液晶后饱和光功率分别提升了 4.8% , 4.3% , 4.2% ,波长变化 $\Delta\lambda < 0.6 \text{ nm}$; 3×3 阵列在 25 , 45 和 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 这三种温度下,引入液晶前的饱和光功率分别为 47.24 , 42.94 , 40.54 mW ,引入液晶前后的饱和光功率分别提升了 4.6% , 3.7% , 3.2% ,波长变化 $\Delta\lambda < 0.6 \text{ nm}$;通过对比上述数据可知,液晶 VCSEL 激光器阵列的饱和光功率均得到有效提升,这是因为随着环境温度的升高,有源区内部损耗增加,内外量子效率降低,导致输出光功率下降,而液晶层的引入有效地降低了有源区的温度,使其内部损耗和热载流子的泄漏减少,因此,在输入电功率相等时可获得更

大的光功率和稳定的波长输出, 液晶-VCSEL 阵列热阻对比如图 5 所示。

由图 5 可知, 对于无液晶的 $1 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3$

VCSEL 阵列, 其热阻值随阵列数目的增多而增加, 而引入液晶后的三种阵列, 其热阻值与三种无液晶阵列相比分别下降了 26.75%, 22.09%, 14.70%。

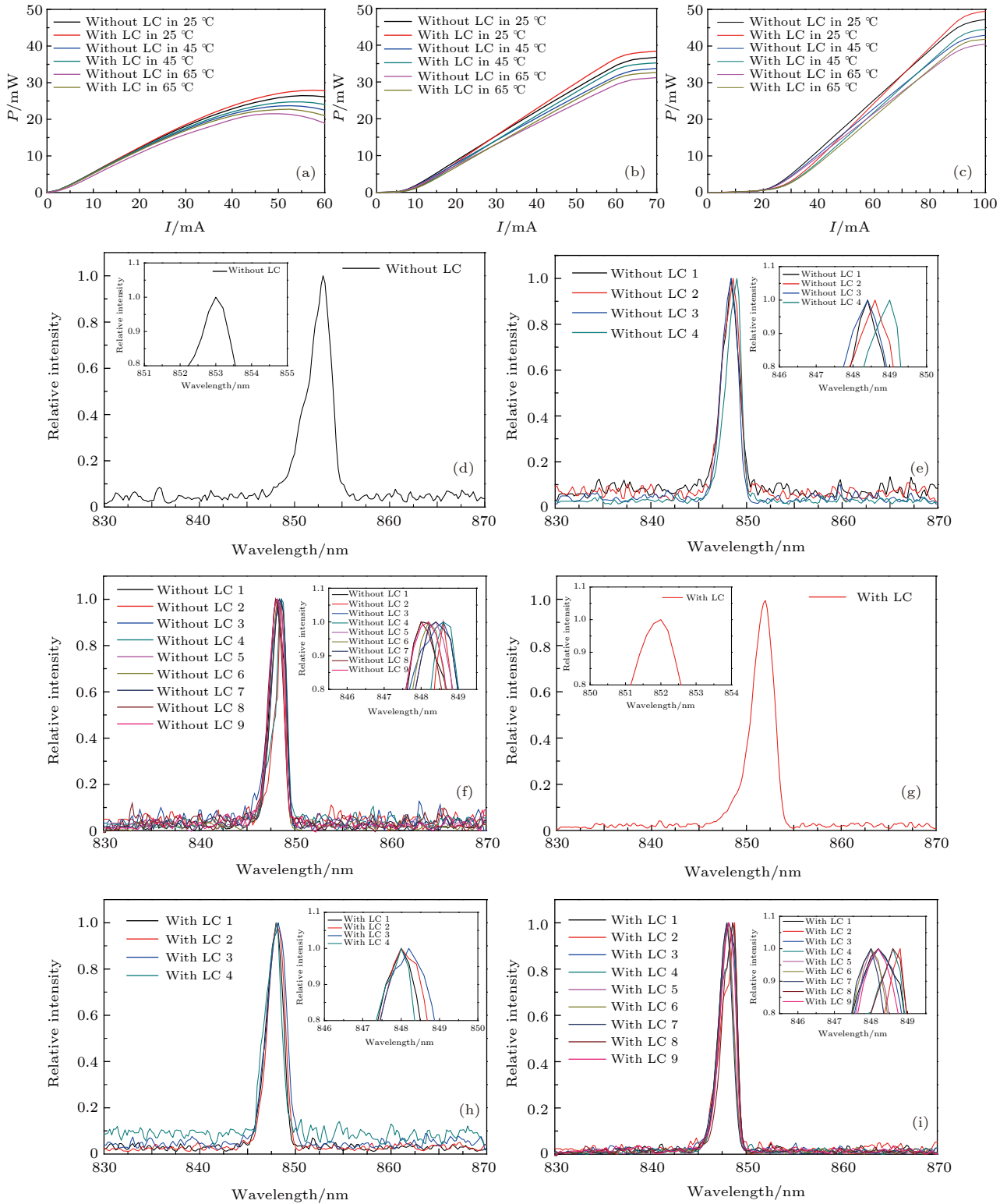


图 4 引入液晶前后不同温度下三种阵列的脉冲电流 P - I 曲线及室温时饱和光功率光谱图 (a), (d), (g) 1×1 ; (b), (e), (h) 2×2 ; (c), (f), (i) 3×3

Fig. 4. The P - I curves of each array at different temperatures before and after coating with LC and spectra at saturated optical power at room temperature (a), (d), (g) 1×1 ; (b), (e), (h) 2×2 ; (c), (f), (i) 3×3 .

液晶-VCSEL 阵列表面温度分布如图 6 所示, 在无液晶情况下, 激光器出光孔与其四周的温差较大, 在 2.3—2.6 °C 之间, 而引入液晶后, 其温差缩小至 0.5 °C 以下. 这是因为液晶层能有效地将阵列有源区的热量导引至器件表面, 进而增加热量的横向传导, 减小出光孔与台面之间的温差, 使得热量

在出光孔与台面之间微小的距离内传导时间极短, 更有利于激光器阵列温度均匀分布.

4 结 论

本文通过对比分析了表面液晶 VCSEL 激光器阵列热特性的变化与影响, 研究发现激光器阵列表面引入液晶后, 1 × 1, 2 × 2, 3 × 3 三种阵列的特征温度分别增大了 54%, 40.43% 和 26.59%; 从 25 °C 到 70 °C, 三种表面液晶 VCSEL 激光器阵列的阈值电流温度变化率最高可降低 23.6%, 热阻降低 26.75%, 激光器阵列各发光单元之间的温度均匀性显著提高, 出光孔与周围温差由原来的 2.6 °C 下降至 0.5 °C 以下, 阵列表面温度分布更均匀, 大大提高了表面液晶 VCSEL 激光器热特性. 综上所述, 在 VCSEL 阵列中引入液晶层, 可以加速激光器阵列单元热量扩散, 降低有源区结温, 可以实现更高的热稳定性和更优器件性能.

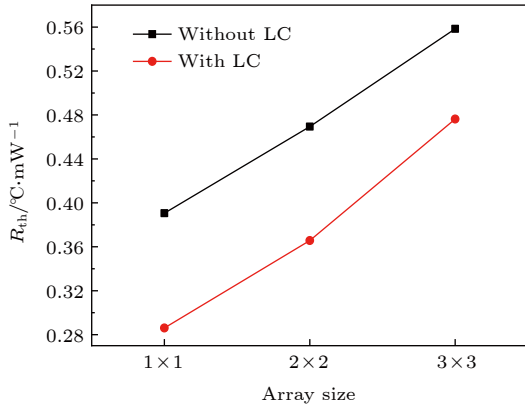


图 5 引入液晶前后各阵列热阻比较

Fig. 5. Thermal resistance of each array before and after coating with LC.

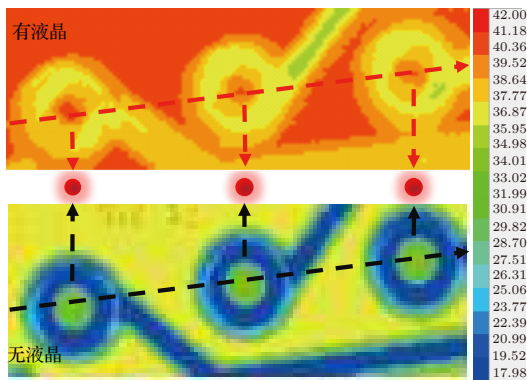
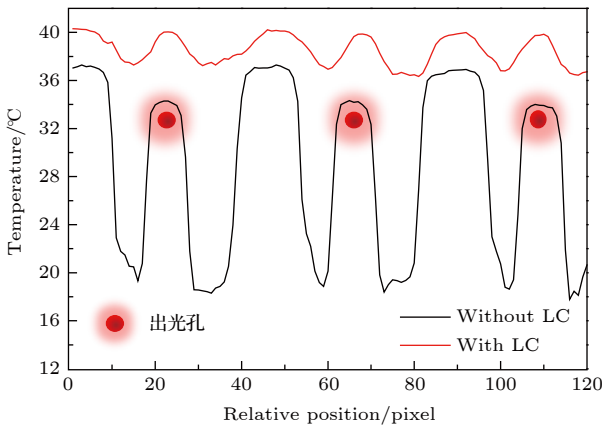


图 6 激光器阵列出光孔与周围温差

Fig. 6. Temperature difference between the optical hole of laser array and its surroundings.

参考文献

- [1] Larsson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum* **17** 1552
- [2] Soda H, Iga K, Kitahara C, Sueematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329
- [3] Iga K, Kinoshita S, Koyama F 1987 *Electron. Lett.* **23** 134
- [4] Moench H, Kolb J S, Engelhardt A P, Gerlach P, Jaeger R, Pollmann-Retsch J, Weichmann U, Witzigmann B 2014 *Conference on Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVIII*, San Francisco, CA, USA, February 5–6, 2014 p9001
- [5] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 070303
- [6] Zhang L S, Ning Y Q, Zeng Y G, Qin L, Liu Y, Zhang X, Liu D, Xu H W, Zhang J S, Wang L J 2011 *Appl. Phys. Express* **4** 052102
- [7] van Leeuwen R, Xiong Y H, Watkins L S, Seurin J F, Xu G Y, Wang Q, Ghosh C 2011 *Conference on Solid State Lasers XX-Technology and Devices*, San Francisco, CA, U.S.A. February 15, 2011 p79120Z
- [8] Steegmuller U, Kuhnelt M, Unold H, Schwarz T, Schulz R, Illek S, Pietzonka I, Lindberg H, Schmitt M, Strauss U 2008 *Conference on Solid State Lasers XVII*, San Jose, CA, USA, February 14, 2008 p687117
- [9] Fan L, Wu M C, Lee H C, Grodziński P 1994 *Electron. Lett.* **30** 1409
- [10] Castany O, Dupont L, Shuaib A, Gauthier J P, Levallois C, Paranthoën C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 161105
- [11] Pan G Z, Xu C, Xie Y Y, Dong Y B, Wang Q H, Deng J, Sun J, Chen H D 2019 *Opt. Express* **27** 13910
- [12] Frasnkievicz L, Czyszanowski T, Thienpont H, Panajotov K 2018 *Opt. Commun.* **427** 271
- [13] Panajotov K, Xie Y, Dems M 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 105003
- [14] Panajotov K, Dems M, Belmonte C 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 20

- [15] Yi X, Jeroen B, Krassimir P, Panaiotoy K, Neyts K 2014 *Opt. Lett.* **39** 6494
- [16] Wang Q, Guan B L, Liu K, Shi G Z, Liu X, Cui B F, Han J, Li J J, Xu C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 234602 (in Chinese) [王强, 关宝璐, 刘克, 史国柱, 刘欣, 崔碧峰, 韩军, 李建军, 徐晨 2013 物理学报 **62** 234602]
- [17] Lott J A, Schneider R P, Choquette K D, Kilcoyne S P, Figiel J J 1993 *Electron. Lett.* **29** 1693
- [18] Liu C L 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun University of Technology) (in Chinese) [刘春玲 2004 博士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [19] Zhang Y M, Zhong J C, Lu G G, Qin L, Zhao Y J, Hao Y Q, Jiang X G 2006 *Acta Photon Sin.* **35** 9 (in Chinese) [张永明, 钟景昌, 路国光, 秦莉, 赵英杰, 郝永芹, 姜晓光 2006 光子学报 **35** 9]
- [20] Ahlers G, Camell D S, Berge L I, Sakurai S 1994 *Phys. Rev. E* **49** 545
- [21] Ma K M, Liu X X, Liu P Y, Li J, Wu C, Guan B O 2019 *Laser Optoelect. Prog.* **56** 170621 (in Chinese) [马宽明, 刘梓轩, 刘培元, 李杰, 武创, 关柏鸣 2019 激光与光电子学进展 **56** 170621]
- [22] Jang J P 2000 *Semiconductor Laser* (Beijing: Electronic Industry Press) p86 (in Chinese) [江剑平 2000 半导体激光器 (北京: 电子工业出版社) 第86页]

Thermal characteristics of surface liquid crystal vertical cavity surface emitting laser arrays*

Wang Zhi-Peng Zhang Feng Yang Jia-Wei Li Peng-Tao Guan Bao-Lu[†]

(Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 25 November 2019; revised manuscript received 24 December 2019)

Abstract

In recent years, with the increase of information processing capacity of optical networks and the continuous improvement of high-density optical communication technology, the requirements for the performance of light sources are also increased. High-quality VCSEL with beam polarization stability control plays an increasingly important role in the above fields. The combination of liquid crystal and vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array can realize wavelength tunability and precise polarization control. At the same time, the introduction of liquid crystal will also change the thermal characteristics of VCSEL array. In this paper, the structure of VCSEL array is designed and the experimental research on the thermal characteristics of VCSEL array is carried out. The effects of nematic liquid crystal layer on the thermal characteristics of VCSEL array are compared and analyzed. The experimental results show that the threshold current temperature change rate of 1×1 , 2×2 and 3×3 surface liquid crystal VCSEL array can be reduced by 23.6% and the thermal resistance can be reduced by 26.75%. Moreover, the saturated optical power of VCSEL array can be improved to a different degree. Meanwhile, the liquid crystal layer can effectively increase the heat transverse conduction and reduce the optical hole. The temperature difference between the light outlet and the table makes the heat conduction time very short at a small distance between the light outlet and the table, which is more conducive to the uniform temperature distribution of the laser array. The experimental results show that the temperature difference between the light outlet and the surrounding is less than 0.5 °C. To sum up, the introduction of liquid crystal layer into VCSEL array not only greatly accelerates the thermal diffusion of laser array unit, but also reduces the junction temperature of active region, improves the thermal characteristics of VCSELs laser array, and lays a good theoretical and experimental foundation for realizing the high beam quality single polarization wavelength controllable VCSEL laser array.

Keywords: vertical cavity surface emitting laser, array, liquid crystal, thermal characteristics

PACS: 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.69.20191793

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60908012, 61575008, 61775007), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4172011), and the Education Commission of Beijing, China (Grant Nos. 040000546319525, 040000546618006).

[†] Corresponding author. E-mail: gbl@bjut.edu.cn