

表面涂覆胆固醇液晶-垂直腔面发射激光器的偏振特性

王红英 成 桢 赵小侠 李院院

西安文理学院物理与机械电子工程学院, 陕西 西安 710065

摘要 利用胆固醇液晶(CLC)涂覆于垂直腔面发射激光器(VCSEL)表面,将其作为 VCSEL 输出偏振调控单元,测量并分析了 CLC-VCSEL 的 I - P 特性、不同抽运电流下的偏振输出特性以及功率输出稳定性。实验结果表明,同一工作温度下,CLC-VCSEL 的阈值电流比单独 VCSEL 的阈值电流增加了 0.35 mA。CLC-VCSEL 的偏振态对注入电流非常敏感。当注入电流为 1.4 mA 时,CLC-VCSEL 表现出优良的功率稳定性能,在 $L_{\text{CLC}}=4.62\sim 5.95\ \mu\text{m}$ 范围内,获得了有效的圆偏振光输出。

关键词 垂直腔面发射激光器;偏振特性;胆固醇液晶;半导体激光;功率稳定

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.111402

Polarization Controlling of Vertical Cavity Surface Emitting Laser with Cholesteric Liquid Crystal Overlay

Wang Hongying Cheng Zhen Zhao Xiaoxia Li Yuanyuan

School of Physics and Mechatronic Engineering, Xi'an University of Arts and Science,
Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The characteristics of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) polarization with cholesteric liquid crystal (CLC) overlay is presented. I - P characteristics, output polarization at different pump currents and output power stability are investigated. The experimental results show that threshold current is increased by 0.35 mA comparing with alone VCSEL at the same operating temperature. Polarization state of CLC-VCSEL is greatly sensitive to input current. Stable output power has been obtained at $I=1.4\ \text{mA}$, and effective circle polarization at the range of $L_{\text{CLC}}=4.62\sim 5.95\ \mu\text{m}$ is also achieved.

Key words vertical cavity surface emitting laser; polarization characteristic; cholesteric liquid crystal; semiconductor laser; power stability

OCIS codes 140.7260; 140.5960; 140.3460

1 引言

随着光网络处理信息量的不断增加和高密度光通信技术的不断提高,人们对垂直腔面发射激光器(VCSEL)光源性能的要求也逐渐提高。VCSEL的偏振特性引起了人们的广泛关注。San等^[1]利用自旋反转动力模型在量子阱有源介质中实现了线偏振模式输出。利用自旋反转动力和净增益平坦机制,通过改变注入电流和外界温度可以实现两个方向垂直的线偏振基态间的相互转换^[2]。近年来,VCSEL圆偏振研究引起了人们的重视。Ando等^[3]通过使用圆偏振光抽运 VCSEL 产生圆偏振激光输出。Kopp等^[4-7]的报道显示,在掺入染料并使用激光抽运时,胆固醇液晶(CLC)可以产生有效的可调谐圆偏振激光。2013年和2014年,Panajotov等^[8-10]将整体 VCSEL 芯片置于 CLC 盒内,在理论上研究了 CLC-VCSEL 的光谱、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。其中,文献[8]的实验研究显示了 CLC-VCSEL 偏振态的 Stokes 参数与工作温度之间的关系。文献[9]中理论模拟计算了输出光与液晶材料的厚度之间的关

收稿日期: 2014-06-05; 收到修改稿日期: 2014-06-16; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 西安市科技计划创新基金“文理专项”重点项目(CX12189WL01, CX12189WL02)与面上项目(CXY1352WL31)

作者简介: 王红英(1975—),女,博士,副教授,主要从事激光技术与应用等方面的研究。E-mail: ffwhyx@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

系。然而,上述研究采用的方法是将液晶固定于液晶盒内,尚不能灵活地、动态地改变液晶的厚度(相当于改变 VCSEL 外腔腔长),从而不能动态控制偏振特性。除此之外,2012年,Andreas 等^[11-12]通过实验和理论研究发现 VCSEL 偏振态与抽运电流密切相关。然而对于 CLC-VCSEL 的偏振研究,目前为止,尚未见有关液晶厚度动态关系及其与抽运电流之间关系的报道。

本文在上述报道的研究基础上,提出 CLC-VCSEL 圆偏振动态控制模式结构:即为了有效地、动态地改变 CLC 长度,将 CLC-VCSEL 耦合于端口涂有液晶取向聚合物的单模保偏光纤中。通过改变耦合光纤与液晶之间的粘附力作用来改变液晶长度,从而有效控制偏振态。同时,由于 CLC 特有的性质,使得 VCSEL 获得有效圆偏振输出。通过研究 CLC-VCSEL 动态偏振控制模式,最终得出偏振态与抽运电流、液晶厚度之间的关系,为利用表面涂覆 CLC 层完全替代顶部分布式布拉格反射镜(T-DBR),实现新型 VCSEL 提供实验基础;为 VCSEL 在光网络处理和高密度光通信技术方面提供偏振可控的光源。

2 CLC-VCSEL 结构与原理

CLC-VCSEL 结构以及偏振控制光路如图 1 所示。1 为 VCSEL,2 为 CLC,3 为液晶取向聚合物,4 为光纤,5 为透镜,6 为 1/4 波片,7 为偏振片,将胆固醇液晶(5CB 掺入 Merck-BDH1305 染料)涂覆于单模 VCSEL 芯片(ULM850-SingleMode-TO46)表面,输出光耦合于单模保偏光纤中。光纤输出的激光经透镜变换成平行光后,依次入射到 1/4 波片和偏振片,通过光电探测器测得输出功率。单模保偏光纤安装于精密平移台上,通过计算机软件控制 VCSEL 电流、温度、耦合光纤平移台和功率计。将与液晶接触的单模保偏光纤入射端浸入液晶取向聚合物中,烘干并冷却后,通过偏振紫外激光辐照,并与 VCSEL 偏振方向保持一致,使得液晶在与光纤耦合过程中,获得取向。光纤与液晶耦合后,由于两者之间存在很强的粘附力,在光纤移动的过程中,液晶长度在粘附力的作用下随之改变,此时 CLC-VCSEL 的外腔腔长充满了液晶分子,并随液晶长度的改变而改变。经过 Labview 软件测试获得不同外腔腔长、不同工作电流的 Stokes 参数,从而获得可控的 CLC-VCSEL 圆偏振光输出。

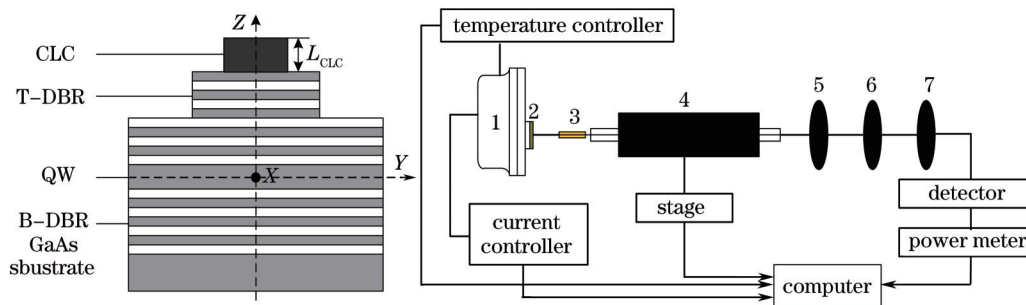


图 1 CLC-VCSEL 偏振控制光路图

Fig.1 Polarization controlling experimental setup of CLC-VCSEL

3 实验结果与分析

3.1 $I-P$ 特性

图 2 为实验测得的 VCSEL 和 CLC-VCSEL 的电流-功率($I-P$)特性曲线。工作温度为 25 °C、连续电流注入下实现受激辐射。测试表明,无液晶时,VCSEL 产生受激辐射的阈值电流为 0.4 mA(黑色曲线)。T-DBR 表面涂覆 CLC 后,测得的阈值电流比无液晶时增加了 0.35 mA(红色曲线)。VCSEL 阈值增益 g_{th} 与 T-DBR 反射率 R_1 之间的关系为^[14]

$$g_{th} = \alpha_a + \frac{1}{\Gamma_r d_a} \left[\alpha_i (L_{eff} - d_a) + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_b}} \right) \right], \quad (1)$$

式中 α_a, α_i 分别为激光器的主动和被动内部损耗, Γ_r 为增益增强因子, R_1, R_b 分别对应 T-DBR 的反射率、底部 DBR (B-DBR) 反射率, L_{eff} 为谐振腔总有效长度, d_a 为量子阱厚度。由于表面涂覆 CLC 后, T-DBR 的反

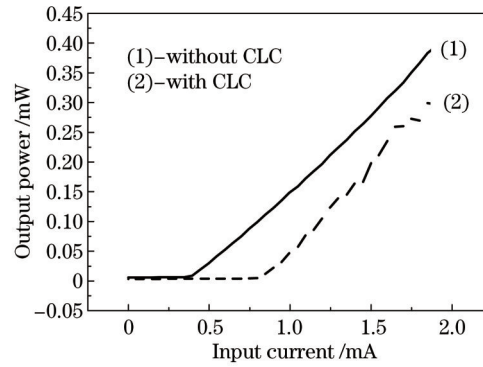


图2 VCSEL与CLC-VCSEL的P-I曲线

Fig.2 P-I measurement curve of VCSEL and CLC-VCSEL

射率 R_1 减小^[8,13],因此,CLC-VCSEL的阈值增益随之增加。

3.2 偏振特性

CLC-VCSEL结构中沿 z 轴方向(如图1所示)的偏振态是通过计算 Stokes 矢量参数获得的:

$$\begin{cases} s_1^\pm(z) = [E_x^\pm(z)E_x^{\pm*}(z) - E_y^\pm(z)E_y^{\pm*}(z)]/I^\pm(z) \\ s_2^\pm(z) = 2 \operatorname{Re}[E_y^\pm(z)E_x^{\pm*}(z)]/I^\pm(z) \\ s_3^\pm(z) = 2 \operatorname{Re}[-jE_y^\pm(z)E_x^{\pm*}(z)]/I^\pm(z) \end{cases}, \quad (2)$$

其中 z 为 CLC 长度,即激光器外腔长度。由此可见,输出偏振态为液晶长度的函数,通过传输矩阵法可以计算得到 CLC 长度变化对偏振态的影响^[9]。

实验中为测试 CLC-VCSEL 输出光偏振态,采用三个 Stokes 矢量参数($S=[S_1 S_2 S_3]$)表示^[14]。其中, S_1 和 S_2 分别代表在 0° 、 45° 两个方向上的线偏振, S_3 代表圆偏振,且满足关系:

$$\begin{cases} S_1 = \frac{P(0,0) - P(90,90)}{P(0,0) + P(90,90)} \\ S_2 = \frac{P(45,45) - P(135,135)}{P(0,0) + P(90,90)} \\ S_3 = \frac{P(0,45) - P(0,135)}{P(0,0) + P(90,90)} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, $P(\alpha,\beta)$ 为当 $1/4$ 波片透光轴与 x 方向夹角为 α 、偏振片快轴与 x 方向的夹角为 β 时的功率($\alpha, \beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)。通过测量不同角度的输出功率,可以获得器件的输出偏振态。当 $S=[0 0 1]$ 时,输出为圆偏振。

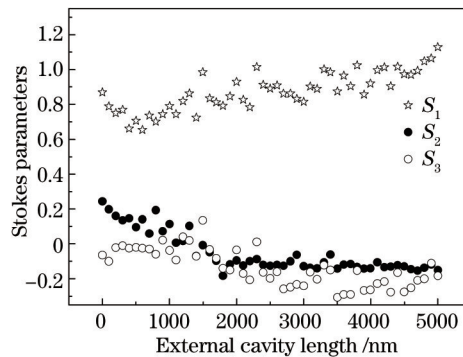


图3 VCSEL偏振输出特性

Fig.3 Polarization characteristic of VCSEL

图3为未涂覆液晶层时VCSEL的偏振特性,表现为线偏振状态,改变注入电流时,偏振态保持不变。实验中,CLC的长度和抽运电流为影响CLC-VCSEL偏振态的主要参数。选定工作温度为 25°C ,图4为工作电

流分别为 1.4 mA 和 1.6 mA 时, Stokes 参数随 CLC 长度的变化关系。从图 4(a)中可以看到,当抽运电流为 1.4 mA 时,随着 CLC 的长度变化,Stokes 参数从 $[1\ 0\ 0]$ 逐渐变化为 $[0\ 0\ 1]$,即从线偏振逐渐变化为圆偏振,与理论模拟结果比较吻合^[9]。且 Stokes 参数在一些范围内仍满足圆偏振输出,即 $[S_1\ S_2\ S_3] \approx [0\ 0\ 1]$,具体见表 1。由此可得出,当 $4.62\ \text{mm} < L_{\text{CLC}} < 5.95\ \text{mm}$ 时, $[S_1\ S_2\ S_3] \approx [0\ 0\ 1]$ 。图 4(b)中当抽运电流改变为 1.6 mA 时,CLC-VCSEL 的输出偏振变化过程不同于 $I=1.4\ \text{mA}$ 时的情况。随着 CLC 长度的增加,参数 S_1 变化起伏比较大,但满足 1 ± 0.2 的 CLC 长度范围明显增加。由此可见,CLC-VCSEL 的偏振态对抽运电流的选择非常敏感。一方面,由于 VCSEL 表面涂覆一层具有高双折射特性的 CLC 液晶后,线偏振光在不同注入电流的情况下,在液晶层中折射率发生变化,实验过程中,温度保持不变,忽略量子阱材料双折射效应的影响,此时,液晶层双折射效应引起了器件总的相位各向异性因子发生变化,因此,输出偏振特性随注入电流的不同而发生改变^[13]。另一方面,激光器量子阱增益也会影响 VCSEL 的输出偏振特性。随着注入电流的增加,VCSEL 的自发热导致量子阱温度升高,量子阱增益谱发生红移,输出光沿着 CLC-VCSEL 的 z 轴方向的光强发生变化,因此偏振态输出随之改变。

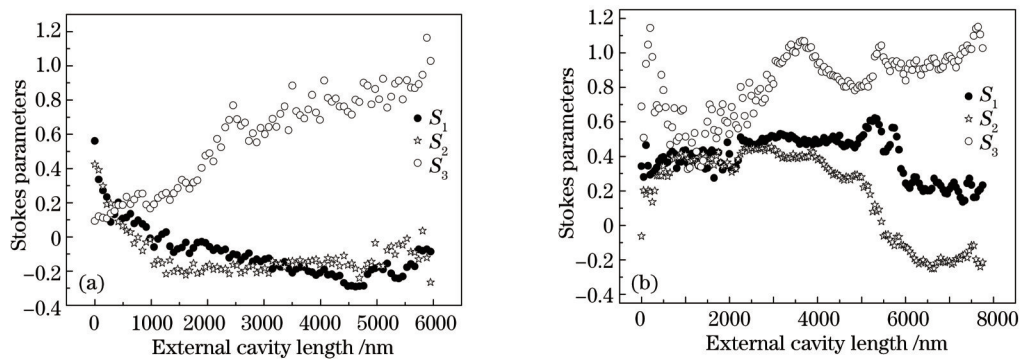


图 4 不同抽运电流下的 CLC-VCSEL 偏振输出特性。(a) $I=1.4\ \text{mA}$; (b) $I=1.6\ \text{mA}$

Fig.4 Polarization characteristic of CLC-VCSEL with different pump currents. (a) $I=1.4\ \text{mA}$; (b) $I=1.6\ \text{mA}$

表 1 不同抽运电流下 Stokes 参数随 CLC 长度的变化

Table 1 Stokes parameters with the change of CLC length with different pump currents

$L_{\text{CLC}} / \text{nm}$		S_1	S_2	S_3
$I=1.4\ \text{mA}$	$I=1.6\ \text{mA}$			
4621 ~ 5953	2699 ~ 7752			1 ± 0.2
213 ~ 5953	5150 ~ 7752		0 ± 0.2	
213 ~ 5953	6001 ~ 7752	0 ± 0.2		

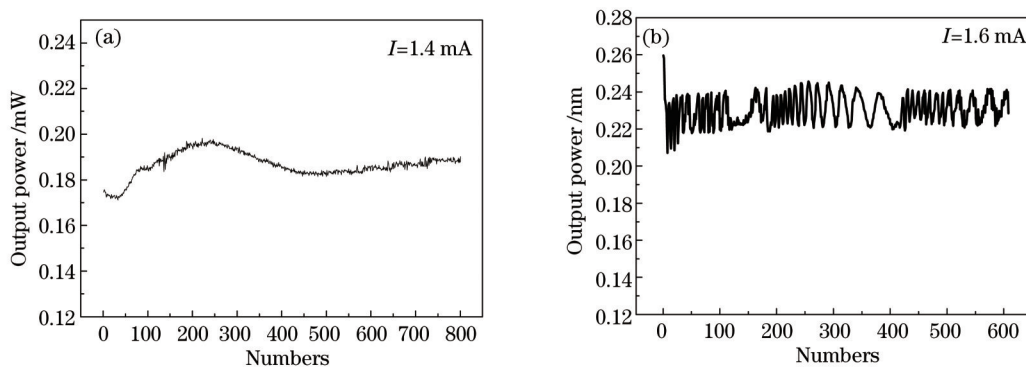


图 5 不同抽运电流下的 CLC-VCSEL 功率稳定性测量。(a) $I=1.4\ \text{mA}$; (b) $I=1.6\ \text{mA}$

Fig.5 Power stability measurement of CLC-VCSEL with different pump currents. (a) $I=1.4\ \text{mA}$; (b) $I=1.6\ \text{mA}$

为此,分别测量了在 1.4 mA 和 1.6 mA 抽运电流注入下的 CLC-VCSEL 的功率稳定性,结果如图 5 所示。测量时间为 2.2 h,当 $I=1.4\ \text{mA}$ 时,输出功率的起始变化最大幅度为 0.01 mW,随着时间增长,变化幅度缩小至 0.001 mW。当 $I=1.6\ \text{mA}$ 时,输出功率在整个测试过程中,变化幅度均在 0.03 mW 左右。器件输出光

功率的跳变,引起其量子阱增益发生改变,此时沿着 z 轴方向的光强随之变化,由此所测得的Stokes参数随着功率跳变程度不同而有所不同^[9]。

4 结 论

利用胆固醇液晶层作为偏振调控单元,涂覆于VCSEL表面,形成CLC-VCSEL复合半导体激光器结构。通过单模耦合光纤与CLC的粘附力作用,牵引CLC并改变其长度。研究发现,CLC-VCSEL的偏振输出特性与注入电流有着密切关系。测试了CLC-VCSEL的 I - P 特性曲线之后,分别选择注入电流为1.4 mA和1.6 mA,工作温度为25 °C的情况,前者获得了较理想的圆偏振输出,同时,表现出了良好的功率稳定性。

参 考 文 献

- 1 San Miguel M, Feng Q, Moloney J V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers [J]. Phys Rev A, 1995, 52(2): 1728-1739.
- 2 Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, *et al.*. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(5): 765-783.
- 3 Ando H, Sogawa T, Gotoh H. Photon-spin controlled lasing oscillation in surface-emitting lasers [J]. Appl Phys Lett, 1998, 73(5): 566-568.
- 4 Kopp V I, Fan B, Vithana H K M, *et al.*. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals [J]. Opt Lett, 1998, 23(21): 1707-1709.
- 5 Kopp V I, Zhang Z Q, Genack A Z. Lasing in chiral photonic structures [J]. Prog Quantum Electron, 2003, 27(6): 369-416.
- 6 Matsui T, Ozaki R, Funamoto K, *et al.*. Flexible mirrorless laser based on a free-standing film of photopolymerized cholesteric liquid crystal [J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(20): 3741-3743.
- 7 Blinov L M, Cipparrone G, Mazzulla A, *et al.*. Lasing in cholesteric liquid crystal cells: competition of Bragg and leaky modes [J]. J Appl Phys, 2007, 101(5): 053104.
- 8 Panajotov K, Xie Y, Dems M, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser emitting circularly polarized light [J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(10): 105003.
- 9 Panajotov K, Dems M, Belmonte C, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser with cholesteric liquid crystal overlay [J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(1): 20-26.
- 10 Xie Y, Beeckman J, Panajotov K, *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser with a chiral nematic liquid crystal overlay [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(1): 1500010.
- 11 Andreas Molitor, Sébastien Hartmann, Wolfgang Elsässer. Stokes vector characterization of the polarization behavior of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Opt Lett, 2012, 37(22): 4799-4801.
- 12 Andreas Molitor, Pierluigi Debernardi, Sébastien Hartmann, *et al.*. Spatially resolved Stokes parameters of small-area vertical-cavity surface-emitting lasers: experiment and simulation [J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4777-4780.
- 13 Wang Qiang, Guan Baolu, Liu Ke, *et al.*. Temperature characteristics of VCSEL with liquid crystal overlay [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(23): 234206.
王强, 关宝璐, 刘克, 等. 表面液晶-垂直腔面发射激光器温度特性的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(23): 234206.
- 14 Toshiki Kihara. Measurement method of Stokes parameters using a quarter-wave plate with phase difference errors [J]. Appl Opt, 2011, 50(17): 2582-2587.