

## 表面液晶-垂直腔面发射激光器温度特性的研究\*

王强 关宝璐<sup>†</sup> 刘克 史国柱 刘欣 崔碧峰 韩军 李建军 徐晨

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京光电子技术实验室, 北京 100124)

(2013年7月22日收到; 2013年8月31日收到修改稿)

本文利用向列相液晶层作为激光偏振调控单元, 涂覆于垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 表面, 测量并分析了不同温度下 VCSEL 正交线偏振光的阈值电流、峰值光功率和  $I$ - $P$  特性. 实验结果表明: 温度为 293 K 时, 涂覆液晶后激光偏振第一跳变点和第二跳变点之间的电流值  $\Delta I$  增大了 2.2 mA, 比无液晶时增大 1 倍. 温度为 313 K、注入电流为 3 mA 时, 两种正交线偏振光的光功率差  $\Delta P$  由 133.6  $\mu$ W 增大到 248.8  $\mu$ W, 进一步增加了线偏振光的各向异性. 表面液晶层的引入有效地扩大了 VCSEL 的正交线偏振态稳定范围和光功率差, 为实现液晶 VCSEL 高温单偏振稳定的设计和器件制备提供了理论和实验基础.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器, 向列相液晶, 偏振态**PACS:** 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja**DOI:** 10.7498/aps.62.234206

## 1 引言

近年来, 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, 对光源性能的要求也越来越高, 特别是在高温情况下, 具有光束偏振稳定控制的高质量 VCSEL 在上述领域中扮演着越来越重要的角色. 然而, 与边发射激光器不同, 对于传统 VCSEL, 沿 GaAs 或 InP 衬底 (100) 面外延生长得到的 VCSEL 激光器输出光束具有沿 [110] 和 [1 $\bar{1}$ 0] 两个方向垂直的线偏振基态 (TE $\perp$ TM), 由于 VCSEL 对称的几何结构和有源区增益的弱各向异性, 偏振状态会随着温度、注入电流以及波长的改变, 在上述两个正交方向间进行随机转换<sup>[1]</sup>; 另一方面, 由于传统 VCSEL 腔长较短, 本质上提供了单纵模输出, 但其横向尺寸远大于纵向波导尺寸, 相差达几十微米, 且横向波导呈对称同质结构, 使得 VCSEL 处于多横模的多空间模式分布状态. 模式间竞争强烈, 大大影响了 VCSEL 光源的模分噪声和光波偏振态等<sup>[2]</sup>. 例如, 在光通信系统中, VCSEL 的偏振不稳定输出会降低信噪比, 增大误码率, 进而影响通信质量<sup>[3]</sup>. 在光谱应用中, 器件偏振不稳

定则会影响正交偏振光的光功率比, 导致光谱测量误差增大<sup>[4]</sup>. 在气体探测中, VCSEL 的偏振跳变会导致激射波长改变, 进而影响探测精度<sup>[5]</sup>. 目前, 已研究的控制 VCSEL 光波偏振状态的方法主要有“非对称电流注入法”、“非对称氧化孔径法”、“选择性外延法”、“高对比度光栅法”和“弯曲薄膜反射镜法”<sup>[6-9]</sup>. 然而, 这些技术和结构仅依赖于偏振增益各向异性, 且对温度比较敏感, 实际研究发现上述方法往往导致非常苛刻的外延生长条件和工作温度参数. 由于向列相液晶具有良好的电控双折射特性, Castany 等人设计制备了中心波长为 1.5  $\mu$ m 的液晶可调谐 VCSEL, 实现液晶层调谐电压小于 3 V 时, 波长调谐范围大于 30 nm 的偏振态稳定输出<sup>[10]</sup>. Krassimir 等人理论上研究了带有外腔反射镜的液晶-VCSEL 的光谱特性、偏振特性和阈值特性, 并证明了液晶层厚度对 VCSEL 的偏振模式的影响<sup>[11]</sup>. Yi 等人将整体 VCSEL 芯片置于液晶盒内<sup>[12]</sup>, 实现了 1.6 mA 注入电流下偏振转换输出, 并研究了调谐电压和入射角度对激射光透射率的影响. 然而, 在 VCSEL 的实际应用中, 尤其是工作在极端温度或大电流条件下, 温度变化会改变液晶的折射率, 进而影响 VCSEL 的偏振状态, 因此

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 60908012) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: gbl@bjut.edu.cn

对于表面液晶 -VCSEL 温度特性的研究就显得尤为重要。

本文提出采用液晶光波偏振控制 VCSEL 结构, 即通过液晶层各向异性双折射效应, 将具有光波偏振控制功能的表面液晶涂覆层与 DBR 共同组成光控单元, 并对其偏振温度特性进行研究. 计算结果表明, 表面液晶 -VCSEL 的总体双折射系数增大, 偏振跳变点处归一化注入电流值由 1.458 减小到 1.338, 正交偏振光的偏振稳定范围增大. 通过实验测量器件的偏振相关  $I$ - $P$  特性发现, 温度为 293 K 时, 表面涂覆液晶后的 VCSEL 第一跳变点和第二跳变点之间的电流差增大了 2.2 mA, 比无液晶时的电流差增大 1 倍, 有效扩大了 VCSEL 的偏振态稳定范围. 而且当温度为 313 K、注入电流为 3 mA 时, 正交偏振光光功率差由 133.6  $\mu$ W 增大到 248.8  $\mu$ W, 扩大了两种正交偏振光的光功率差. 温度为 303 K 时, 涂覆液晶后器件峰值光功率为 1.61 mW 比无液晶时的 VCSEL 增大 0.07 mW. 所设计的基于液晶结构的 VCSEL 具有结构简单、集成度高及高温偏振控制等特点. 为实现高功率, 特别是高温偏振稳定激光输出的下一代高质量 VCSEL 光源提供很好的实验和理论基础.

## 2 液晶 VCSEL 结构设计

图 1(a) 为表面液晶 -VCSEL 的横截面示意图, 设计中心波长为 850 nm, 其主要结构为: 利用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 方法在 n 型掺杂的 GaAs 衬底上外延生长 34 对  $\lambda/4$  厚度的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$  作为底部 DBR. 然后是三对由 7.2 nm 厚的 GaAs 量子阱和 8 nm 厚的  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  势垒组成的有源区结构, 其中量子阱光致发光谱峰值波长为 835 nm. 最上面的部分是 20 对  $\lambda/4$  厚度的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$  作为顶部 DBR. 另外, 在有源区和顶部 DBR 之间有一层氧化限制层 ( $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ ), 经过湿氮氧化工艺后, 可用于电流和光场限制.

在 VCSEL 的工艺制备过程中, 首先利用光刻技术在外延片上得到圆柱形台面的光刻胶图形, 然后用 DBR 腐蚀液 (体积比, 甲醇: 磷酸: 双氧水: 去离子水 = 1:3:1:5) 湿法刻蚀出圆柱形台面, 选择刻蚀深度略大于 2700 nm, 以便将氧化限制层侧壁暴露. 然后在 673 K、湿氮环境下氧化  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层获得 8  $\mu\text{m}$  的氧化孔径. 通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 淀积一层 400 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  作为

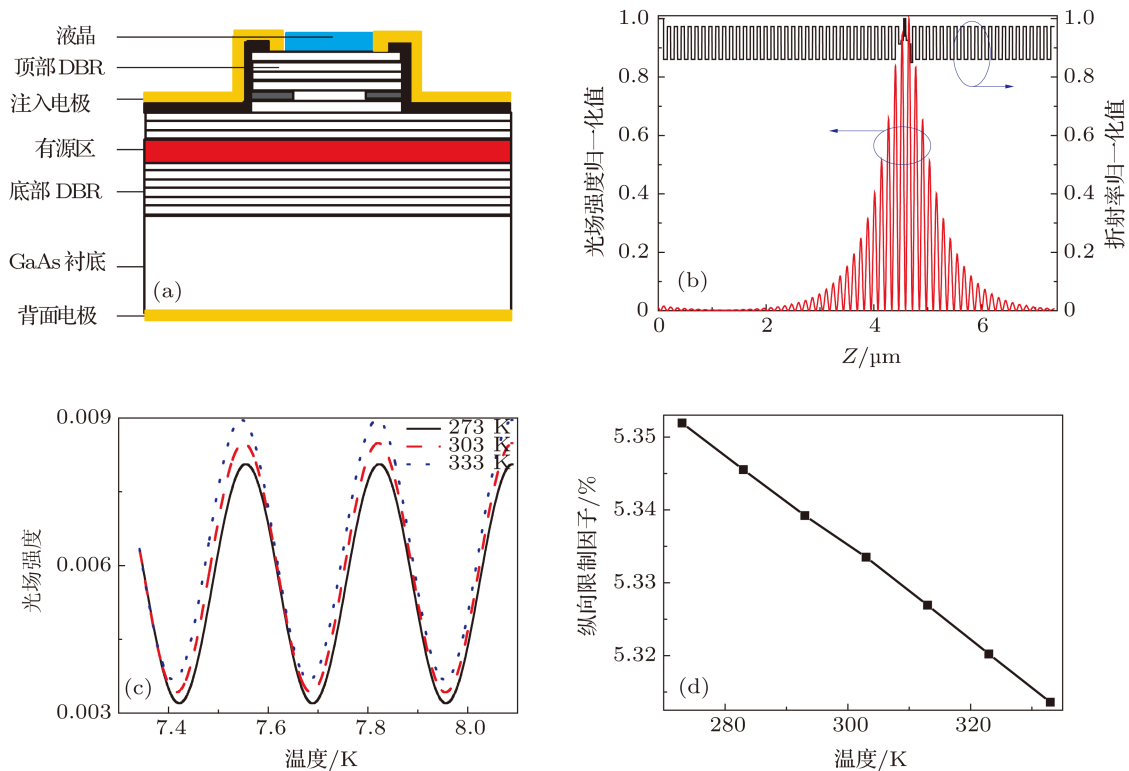


图 1 (a) 表面液晶 -VCSEL 结构示意图; (b) 无液晶时 VCSEL 的纵向光场分布; (c) 涂覆液晶后, 不同温度下液晶层内的纵向光场分布; (d) 温度对表面液晶 -VCSEL 纵向限制因子的影响 ( $Z$  表示以衬底为参考零点沿激光传播方向的距离)

钝化层,并溅射 Ti-Au 注入电极和 Au-Ge-Ni-Au 背面电极.最后将出光孔上方的 Ti-Au 腐蚀掉,同时,在 VCSEL 表面留下深度为 750 nm 的圆槽以便于液晶的填充和涂覆.

图 1(b) 为无液晶时 VCSEL 的纵向光场分布.在 VCSEL 表面涂覆液晶后,液晶层中的纵向光场分布如图 1(c) 所示,从图中可以看到,当温度从 273 K 增加到 333 K 时,光子在激光器谐振腔内始终保持稳定驻波分布,而液晶层内纵向光场强度逐渐增加.因此,纵向限制因子会随之降低.图 1(d) 为温度对表面液晶-VCSEL 的纵向限制因子的影响,无液晶时 VCSEL 的纵向限制因子为 5.467%,涂覆液晶后,温度为 273K 时纵向限制因子减小为 5.352%,当温度升高到 333 K 时纵向限制因子减小至 5.314%.

### 3 实验结果和分析

图 2 为 VCSEL 的 *I-P* 特性测试系统示意图,主要由激光器驱动系统、半导体帕尔帖温度控制系统 (Peltier temperature controller, PTC) 和 PIN 光电探测器系统三部分组成.通过激光测试探针台,在外加电流驱动后,激光器发出的激光经过分光棱镜 (polarization beam splitter, PBS) 被分离为两束光路不同且偏振方向相互垂直的线性偏振光.这里定义沿 GaAs 衬底 [110] 晶向偏振的线性偏振光为 *X* 偏振光,而沿

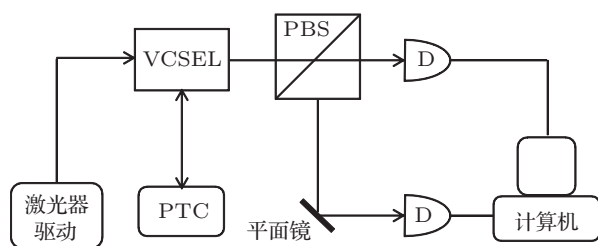


图 2 VCSEL 的 *I-P* 特性测试系统示意图

[110]晶向偏振的线性偏振光为 *Y* 偏振光.最后, *X/Y* 偏振光分别被 PIN 光电探测器 D (photodetectors) 收集,并在计算机上分别显示得到两种偏振光的 *I-P* 特性曲线.通过 PTC 可以较好地控制和改变热沉的温度,从而实现在不同温度情况下研究表面液晶-VCSEL 的输出特性.

当工作温度变化时,液晶层内电场强度会相应变化,同时对激光器 DBR 反射率也会产生影响.由于向列相液晶的分子只在长轴方向上保持平行或

近似平行,其平均折射率  $\langle n \rangle$  随温度变化关系可以用线性表达式  $\langle n \rangle = A - BT^{[13]}$  表示,这里  $A = 1.705$  和  $B = 4.31 \times 10^{-4}/K$  是液晶材料的温度参数.当温度增加时,液晶层折射率以  $4.31 \times 10^{-4}/K$  的速度线性减小,从而导致顶部 DBR 的反射率随之变化.为了简化模型,我们假设半导体材料的折射率不随温度变化,通过传输矩阵法可以计算得到温度对表面液晶层 DBR 反射率的影响.图 3 为 298 K 时顶部 DBR 的反射谱,其中,下三角表示无液晶 VCSEL 的顶部 DBR 反射谱,上三角表示涂覆液晶后 VCSEL 的顶部 DBR 反射谱.在温度从 273 K 增加到 333 K (液晶清亮点) 的变化范围内,无液晶 VCSEL 的顶部 DBR 反射率始终为 99.23%,而涂覆液晶后的顶部 DBR 平均反射率则始终小于 99.04%而且以  $1.767 \times 10^{-5}/K$  的速度线性减小,如图 3 内插图所示.

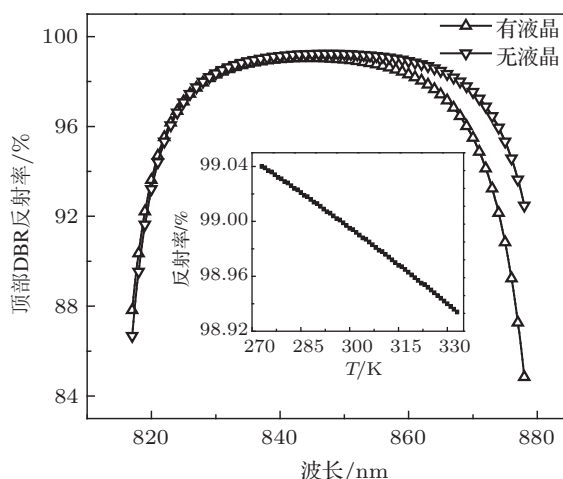


图 3 温度为 298 K 时,涂覆液晶前后的顶部 DBR 的反射谱 (插图为表面涂覆液晶后顶部 DBR 的反射率随温度变化关系)

由于 VCSEL 具有横向圆对称结构,因此激光偏振态为正交线性偏振输出,但是由于激光器有源区存在偏振各向异性增益和激光器结构材料双折射效应,激光偏振态在激射过程中会发生单偏振输出、正交偏振态转换以及双稳态<sup>[14]</sup>.而当偏振各向异性增益差较小时,半导体材料的双折射特性是引起 VCSEL 偏振跳变的关键因素之一.利用四能级模型可以分别得到 *X/Y* 偏振光的归一化注入电流  $u_X/u_Y$  与相位各向异性因子  $r_p$  的关系<sup>[14]</sup>:

$$u_X = 1 + \frac{r_s r_p}{r(k\alpha + r_p)}, \quad (1)$$

$$u_Y = 1 - \frac{r_s}{r} + 2\alpha \frac{r_p}{r}, \quad (2)$$

其中,  $r$  为载流子衰减因子,  $r_s$  为自旋反转载流子衰减因子,  $r_p$  为由材料双折射决定的相位各向异性因

子,  $\alpha$  为饱和散射系数,  $k$  为衰减速率. 令  $u = u_x$ , 通过 (1) 式可以得到图 4 中的实曲线, 当  $u < u_x$  时 (即实曲线以下的区域),  $X$  偏振光稳定. 令  $u_y = 0$ , 通过 (2) 式可以得到图 4 中的实直线 ( $r_p/r = 8.17$ ), 当  $u < u_y$  时 (即实直线左侧的区域),  $Y$  偏振光稳定. 直线和曲线将  $X/Y$  偏振稳定区域分割为四个部分, 其中, I 区中  $X/Y$  偏振光都处于偏振稳定状态; II 区中  $X/Y$  偏振光都处于偏振不稳定状态; III 区中仅有  $X$  处于偏振稳定状态; IV 区中仅有  $Y$  处于偏振稳定状态.

当在 VCSEL 器件表面涂覆一层具有高双折射特性的液晶后, 由双折射材料相位延迟 ( $\delta = \Delta n d 2\pi/\lambda$ , 其中  $\Delta n = 0.20$ ,  $d = 750 \text{ nm}$ ) 可知, 相位各向异性因子  $r_p$  (即  $\delta$ ) 增大 1.11, 则图 4 中由  $X$  偏振光稳定条件决定的实曲线右移至虚曲线处, 由  $Y$  偏振光稳定条件决定的实直线左移至虚直线处, 曲线和直线相交点对应的归一化注入电流值由 1.458 变小到 1.338. 因此, 当注入电流增加, 器件输出光功率由  $X$  偏振光跳变到  $Y$  偏振光处 (即第一跳变点) 的注入电流值就会随之变小. 图 5 给出了涂覆液晶前后 VCSEL 的偏振相关  $I-P$  特性曲线, 图 5(a)—(f) 分别表示涂覆液晶前后, 热沉温度为 273 K, 293 K 和 313 K 时 VCSEL 的  $I-P$  特性测试结果, 实线为  $X$  偏振光的  $I-P$  特性曲线, 虚线为  $Y$  偏振光的  $I-P$  特性曲线. 对比图 5(a) 和 (d), 涂覆液

晶后 VCSEL 的正交偏振态第一跳变点处的注入电流值为 1.72 mA, 比无液晶 VCSEL 的第一跳变点处的注入电流值减小 0.48 mA.

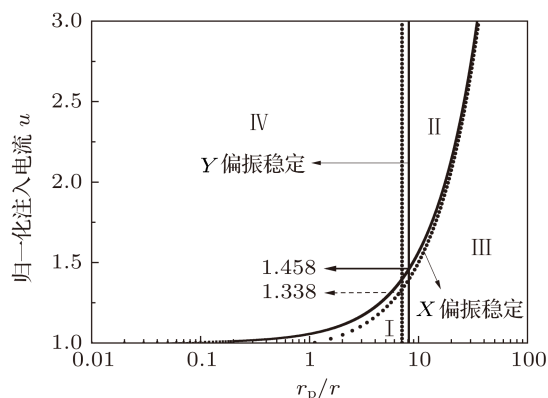


图 4 器件材料双折射对偏振特性的影响 ( $r = 1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $r_s = 50 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\alpha = 3$ ,  $k = 300 \text{ ns}^{-1}$ )

图 5(d), (e), (f) 为表面涂覆液晶层后测得的偏振相关  $I-P$  特性曲线. 从图中可以看出, 当温度为 273 K 时, 在第一个偏振跳变点和第二个偏振跳变点之间的电流值  $\Delta I$  增大为 3.6 mA (如图 5(d) 所示), 比无液晶时 VCSEL 的  $\Delta I$  增大了 1.25 倍; 当温度为 293 K 时,  $\Delta I$  增大为 4.4 mA, 比无液晶时 VCSEL 的  $\Delta I = 2.2 \text{ mA}$  增大了 1 倍, 且第一跳变点向小电流方向移动, 如图 5(b) 与 (e) 所示; 当温度继续升高至 313 K 时 (如图 5(c), (f) 所示), 已经不能观察到明显的第一跳变点, 但是在第二跳变点前双稳态下的两线偏振光的光功率差  $\Delta P$  明显变大, 例如 3 mA 时,

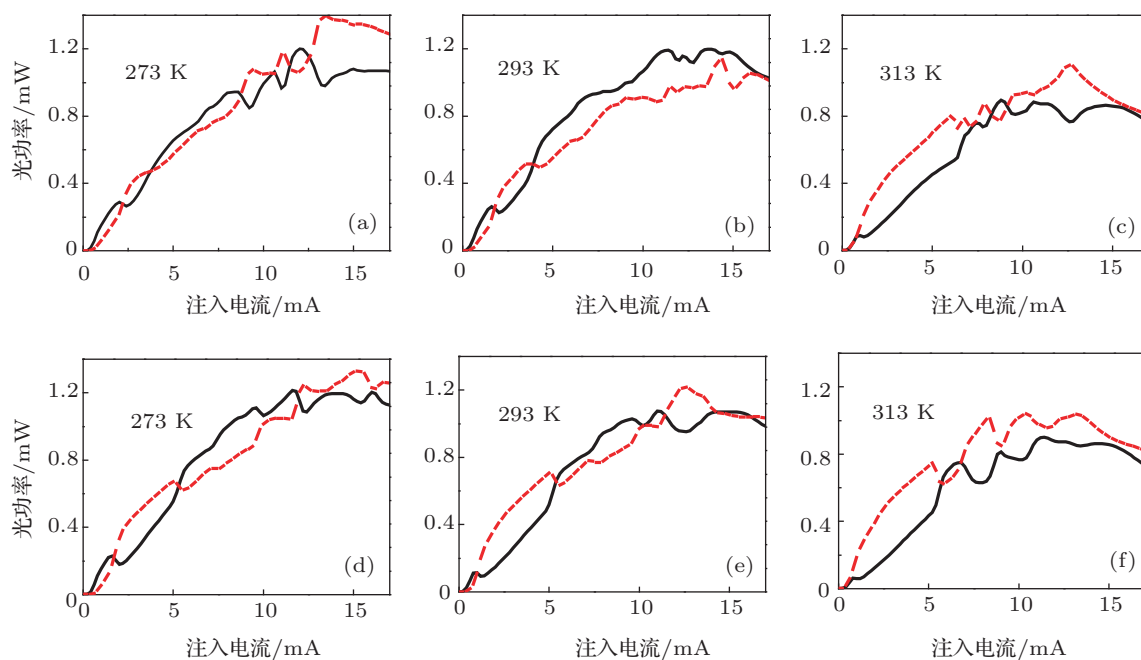


图 5 不同温度下偏振相关  $I-P$  特性曲线 (a), (d) 273 K; (b), (e) 293 K; (c), (f) 313 K



光功率差由 133.6  $\mu\text{W}$  增加到了 248.8  $\mu\text{W}$ . 这是由于当在 VCSEL 器件表面涂覆一层具有高双折射特性的液晶后,  $X/Y$  偏振光在液晶层折射率差变大, 且随温度升高, 半导体材料双折射也会增大 [15], 两种因素都会引起器件总的相位各向异性因子  $r_p$  变大, 图 4 中  $X$  偏振曲线 (实曲线) 右移,  $Y$  偏振曲线 (实直线) 左移, 进而导致第一跳变点处注入电流值变小,  $X/Y$  偏振光正交偏振态稳定范围扩大.

除了液晶层和半导体材料的双折射特性外, 激光器量子阱增益也会影响器件偏振特性. 当激光器注入电流大于第一跳变点后继续增加时, 由于偏振态各向异性增益不同, 激光以正交偏振双稳态形式输出, 并发生交叠和跳变. 同时在不同温度下, VCSEL 正交偏振态交叠和跳变所对应的注入电流值也随之发生变化. 对比图 5(a)—(c) 可以发现, 随着温度的增加, 第一跳变点从 273 K 时的 2.17 mA 减小到 313 K 时的 0.85 mA. 这是由于随着注入电流增加, VCSEL 自发热导致量子阱温度升高, 量子阱增益谱发生红移. 在第一跳变点前后  $X$ 、 $Y$  偏振光会因获得的量子阱增益不同而产生模式竞争. 当衬底温度增加, 只需要较小的注入电流就会引起偏振相关增益跳变, 即随温度增加, 正交偏振态第一跳变点变小. 因此, 结合实验结果和理论分析可以看出, 表面液晶层的双折射效应有效地扩大了激光器第一偏振跳变点和第二跳变点的偏振稳定范围, 并使得双稳态偏振光的光功率差进一步增大, 这为利用液晶实现 VCSEL 单偏振稳定的设计和器件制备提供了理论和实验基础.

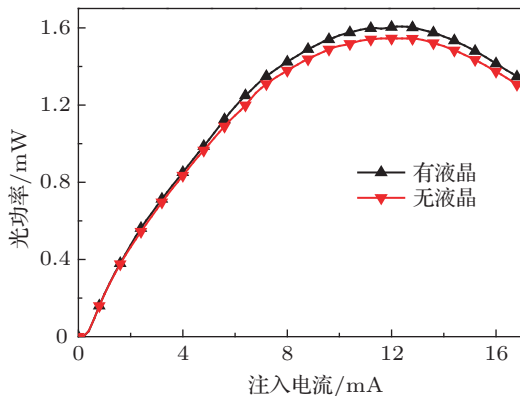


图 6 温度为 303 K 时, 涂覆液晶前后 VCSEL 总的  $I-P$  特性曲线

由 VCSEL 阈值增益与 DBR 反射率关系,  $g_{\text{th}} = \frac{1}{\Gamma} \left( \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right)$ , 可知顶部 DBR 的反射率  $R_1$  的变化会影响 VCSEL 的阈值增益. 当表面涂覆液晶后, 顶部 DBR 的反射率  $R_1$  变小, 器件的

阈值增益则随之变大. 通过测量器件的阈值电流可以得到表面液晶层对阈值增益的影响, 图 6 给出了温度为 303 K 时, 涂覆液晶前后 VCSEL 总的  $I-P$  特性曲线. 可以看出, 当 VCSEL 表面涂覆液晶后, 器件光功率峰值为 1.61 mW, 比无液晶时 VCSEL 的光功率增大 0.07 mW. 图 7 为不同温度时, 表面液晶-VCSEL 的阈值电流及峰值光功率随温度变化关系. 从图中可以看出, 随着温度增加, 无液晶 VCSEL 的阈值电流先从 288 K 时的 0.79 mA 减小到 308 K 时的 0.67 mA, 然后增大到 323 K 时的 0.73 mA. 而涂覆液晶后 VCSEL 的阈值电流则先从 288 K 时的 0.96 mA 减小到 308 K 时的 0.79 mA, 然后增大到 323 K 时的 0.82 mA. 涂覆液晶后器件的阈值电流大于无液晶时器件的阈值电流, 但是二者阈值电流差始终保持在 0.18 mA 以下. 随着温度增加, 器件的阈值电流先减小后变大主要是因为 VCSEL 量子阱光致发光谱峰值波长设计为 835 nm 小于谐振腔模式中心波长 850 nm, 当温度增加时, 量子阱增益谱和谐振腔模式同时红移且前者速度大于后者 [16], 模式失配逐渐变小, 阈值电流降低; 当温度升高到 308 K 时, 二者模式相匹配, 器件的阈值电流最低; 当温度继续升高, 二者的失配越来越严重, 器件的阈值电流开始变大 [17]. 图 7 同时给出了涂覆液晶前

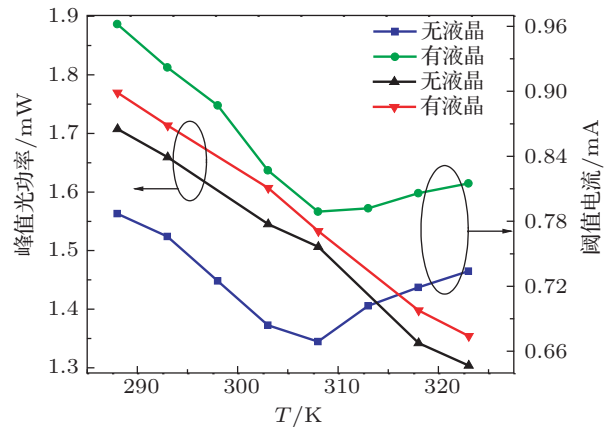


图 7 涂覆液晶前后 VCSEL 峰值光功率及阈值电流随温度变化关系

后 VCSEL 峰值光功率随温度变化关系, 当温度增加时, 无液晶 VCSEL 的峰值光功率从 288 K 时的 1.708 mW 减小到 323 K 时的 1.304 mW, 而涂覆液晶后 VCSEL 的峰值光功率从 288 K 时的 1.769 mW 减小到 323 K 时的 1.354 mW. 涂覆液晶后 VCSEL 的峰值光功率始终大于无液晶时的峰值光功率. VCSEL 峰值光功率随温度增加而减小是因为随着温度增加, VCSEL 量子阱内载流子泄漏和损耗因

率增大, 而总的输入功率不变, 因此器件的输出光功率减小<sup>[18]</sup>.

## 4 结论

本文将具有双折射特性和温度效应的向列相液晶与 VCSEL 半导体激光器相结合, 制备了 850 nm 表面液晶 -VCSEL. 通过 *I-P* 特性测试系统测量了不同温度下表面液晶 -VCSEL 的线偏振特性, 研究发现: 温度为 293 K 时, 表面液晶 -VCSEL 第一、二跳变点之间的电流差增大了 2.2 mA, 比

无液晶时的电流差增大 1 倍, 有效扩大了 VCSEL 的偏振态稳定范围. 且温度为 313 K、注入电流为 3 mA 时, 正交偏振光的光功率差由 133.6  $\mu\text{W}$  增大到 248.8  $\mu\text{W}$ , 正交偏振光的光功率差也大幅变大. 基于四能级模型研究发现, 当表面涂覆液晶后, 器件总的双折射增大, 偏振跳变点处相对注入电流值减小, 因此高温偏振态稳定范围随之增大. 且在温度变化范围内, 表面液晶 -VCSEL 的阈值电流与普通 VCSEL 差小于 0.18 mA. 同时, 温度为 303 K 时, 器件输出光功率比无液晶时增大 0.07 mW, 达到 1.61 mW.

- [1] Kaiser J, Degen C, Elsässer W 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 672
- [2] Law J Y, Agrawal G P 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 437
- [3] Tayahi M B, Lanka S, Wang J, Catsten J, Hofmann L, Sukanta S 2006 *Proc. of SPIE* **6132** 61320B
- [4] Vogel P, Ebert V 2001 *Appl. Phys. B* **72** 127
- [5] Ostermann J M, Rinaldi F, Debernardi P, Michalzik, R 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2256
- [6] Yan Z, Lin C H, Coldren L A 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 305
- [7] Li S, Guan B L, Shi G Z, Guo X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 18 (in Chinese) [李硕, 关宝璐, 史国柱, 郭霞 2012 物理学报 **61** 184208]
- [8] Boutami S, Benbakir B, Leclercq J L, Viktorovitch P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 071105
- [9] Ostermann J M, Debernardi P, Jalics C, Kroner A, Riedl M C, Michalzik R 2005 *Opt. Commun.* **246** 511
- [10] Castany O, Dupont L, Shuaib A, Gauthier J P, Levallois C, Paranthoën 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 161105
- [11] Krassimir P, Hugo T 2011 *Opt. Express* **19** 16749
- [12] Yi X, Jeroen B, Wouter W, Krassimir P, Kristiaan N 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1509
- [13] Li J, Wu S, Brugioni S, Meucci R, Faetti S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 073501
- [14] Martin-Regalado J, Prati F, Miguel S M, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [15] Sirenko A A, Etchegoin P, Fainstein A, Eberl K, Cardona M 1999 *Phys. Rev. B* **60** 8253
- [16] Chen C, Paul O L, Andrew A A, Kent M G, Kent D C 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 1078
- [17] Balle S, Tolkachova E, Miguel M S, Tredicce J, Martin-Regalado J, Gahl A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1121
- [18] Shi G Z, Guan B L, Li S, Wang Q, Shen G D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014206

# Temperature characteristics of VCSEL with liquid crystal overlay\*

Wang Qiang Guan Bao-Lu<sup>†</sup> Liu Ke Shi Guo-Zhu Liu Xin Cui Bi-Feng  
Han Jun Li Jian-Jun Xu Chen

(Laboratory of Opto-electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 22 July 2013; revised manuscript received 31 August 2013)

## Abstract

The 850-nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with liquid crystal overlay is presented utilizing the birefringence of nematic liquid crystal. Threshold current, peak of optical power and  $I$ - $P$  characteristics at different temperatures were studied. At 293 K, the current between the first polarization hop and the second one has an increase of 2.2 mA after overlaying the liquid crystal. At 313 K and 3 mA, the optical power difference between the two orthogonally polarized lights increases from 133.6 to 248.8  $\mu$ W. The experimental results show that the nematic liquid crystal enlarges the stable range and the discrete of optical power of orthogonally polarized state. Our research could provide insight into the design and fabrication of VCSEL with stable polarization at high temperatures.

**Keywords:** VCSEL, nematic liquid crystal, polarization

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.234206

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908012).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: gbl@bjut.edu.cn