物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

内腔亚波长光栅液晶可调谐垂直腔面发射激光器

王志鹏　关宝璐　张峰　杨嘉炜

Liquid crystal tunable vertical cavity surface emission laser with inner cavity sub-wavelength grating

Wang Zhi-Peng　Guan Bao-Lu　Zhang Feng　Yang Jia-Wei

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 224208 (2021)　DOI: 10.7498/aps.70.20210957
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20210957
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

表面液晶-垂直腔面发射激光器阵列的热特性
Thermal characteristics of surface liquid crystal vertical cavity surface emitting laser arrays
物理学报. 2020, 69(6): 064203　https://doi.org/10.7498/aps.69.20191793

基于单向注入垂直腔面发射激光器系统的密钥分发
Key distribution based on unidirectional injection of vertical cavity surface emitting laser system
物理学报. 2018, 67(20): 204202　https://doi.org/10.7498/aps.67.20181038

高速850 nm垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长
Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers
物理学报. 2018, 67(10): 104205　https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备
Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers
物理学报. 2019, 68(6): 064207　https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822

基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究
Acousto-optic tunable flat top filter based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals
物理学报. 2021, 70(5): 054208　https://doi.org/10.7498/aps.70.20201461

混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性
Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection
物理学报. 2017, 66(24): 244206　https://doi.org/10.7498/aps.66.244206

内腔亚波长光栅液晶可调谐垂直腔面发射激光器*

王志鹏 关宝璐† 张峰 杨嘉炜

(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)

(2021 年 5 月 20 日收到; 2021 年 6 月 8 日收到修改稿)

随着信息技术的快速发展, 可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 逐渐成为密集波分复用通信技术 (DWDM) 中的重要光源. 通过利用液晶 (LC) 的双折射特性所实现的液晶可调谐 VCSEL 具有偏振稳定、可靠性高、连续波长调谐等优点. 本文设计了一种基于内腔亚波长光栅的液晶可调谐 VCSEL 结构, 并对液晶层和亚波长光栅对 VCSEL 波长调谐特性的影响进行了详细分析与研究. 结果表明, 可调谐 VCSEL 结构中液晶层厚度不仅影响波长调谐范围, 同时决定了 VCSEL 激光器调谐过程中模式跳变. 此外, 通过对亚波长光栅结构设计, 形成了有效的折射率减反层, 优化液晶层与半导体层界面折射率差, 进一步的提高波长调谐范围和调谐效率. 当中心波长为 980 nm 时, 调谐范围提升了 42%, 达到 41 nm, 波长调谐效率提升 41%. 为实现高光束质量、连续稳定波长调谐的 VCSEL 激光器提供了一种新的设计方法.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 液晶, 可调谐

PACS: 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja **DOI:** 10.7498/aps.70.20210957

1 引 言

可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有圆形对称光斑, 易于二维集成, 波长调谐范围宽和高速调制等优点[1−4], 因此被广泛用于光通信、生物传感、医学成像扫描等领域[5−8]. 前期研究表明, VCSEL 激光器可以通过微机械的方式来实现波长可调谐, 包括电热调谐[9]、静电调谐[10]、压电调谐[11]等, 但这种微机械结构在调谐过程中易受到温度、共振等外界因素的影响, 性能不稳定且成本高昂. 相比机械调谐方式, 利用液晶双折射效应不仅实现波长调谐, 更具有机械性能稳定、可靠性高等优点, 因此越来越受到人们的关注[12−14]. 例如, Levallois 等[15] 通过将液晶置于 VCSEL 谐振腔内, 制备得到激射波长为 1.55 μm 的光泵浦内腔液晶 VCSEL, 并在 0—170 V 调谐电压范围内实现了 10 nm 的波长调谐. 法国国立高等电信布列塔尼学院的 Castany 等[16] 制备了 1550 nm 液晶波长可调谐器件, 实现了波长调谐范围大于 30 nm 的偏振光输出. Frasunkiewicz[17] 通过一维传输矩阵光学计算, 辅以热、电和光学现象的全矢量三维自洽模型设计了中心波长为 1550 nm, 调谐范围为 68.5 nm 的液晶可调谐器件. 本文在前期研究基础上[18], 进一步开展内腔液晶微腔波长调谐特性的研究与分析, 获得最佳液晶层厚度设计, 并通过内腔亚波长光栅 (SWG) 结构设计, 实现减反射层进一步降低液晶层与半导体界面的高反射率, 使局限在半导体腔内的光场能量更多耦合到液晶层中, 提升了液晶可调谐 VCSEL 的波长调谐范围和调谐效率, 为实现高光束质量、连续稳定波长调谐的 VCSEL 激光器打下了良好的理论基础.

* 国家自然科学基金 (批准号: 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

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

2 器件结构设计

本文所设计的具有亚波长光栅层的液晶可调谐 VCSEL 结构如图 1 所示, 其主要由三部分组成, 分别是 Half-VCSEL、液晶微腔和亚波长光栅层. 其中, Half-VCSEL 从下到上依次为底部电极、GaAs 衬底、下 DBR、有源区、氧化限制层、P 型注入电极. 其中下 DBR 由 26 对 GaAs/$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 组成, 有源区由三对 GaAs/$In_{0.2}Ga_{0.8}As$ 量子阱组成, 其中心波长为 980 nm, 氧化限制层由层厚为 60 nm 的 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 所组成, 用于限制有源区电流和光场的分布. 液晶微腔由间隔层、液晶层和 19.5 对上 DBR 以及超薄偶氮染料取向层所构成. 利用光刻技术对 SiO_2 层进行刻蚀得到环绕 Half-VCSEL 的凹槽型结构, 形成液晶间隔层. 同时, 凹槽的深度可用于控制液晶层的厚度, 并通过微量移液器滴涂液晶形成液晶层. 进一步利用双面键合技术, 实现液晶微腔与 Half-VCSEL 的集成, 最终获得具有亚波长光栅层的液晶可调谐 VCSEL 器件.

亚波长光栅是一种周期尺寸与入射波长相当或者更小的光栅, 也被称为“零级光栅”. 通过改变光栅的结构参数, 亚波长光栅可以使 VCSEL 光波相互垂直的两个偏振方向上的等效折射率存在各向异性, 即亚波长光栅的“形式双折射”效应[19], 进一步实现可调谐 VCSEL 的单偏振输出. 除此之外, 亚波长光栅还可以将光栅等效为一定范围内任意折射率的介质薄膜, 使光学元件表面的反射损耗近乎为零[20], 进而实现减反作用[21]. 通过 COMSOL Multiphysics 软件, 我们模拟得到了图 2 引入亚波长光栅前后液晶可调谐 VCSEL 光场能量分布图.

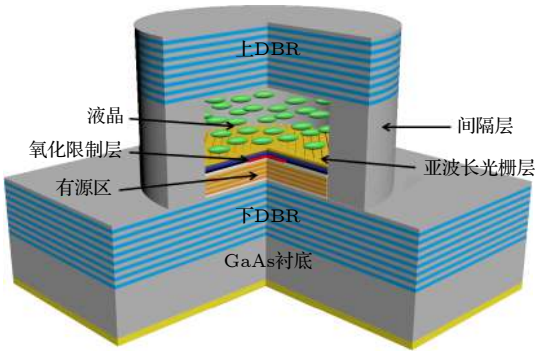

图 1 具有亚波长光栅层的液晶波长可调谐 VCSEL 的结构示意图

Fig. 1. Structure of liquid crystal wavelength tunable VCSEL with sub-wavelength grating layer.

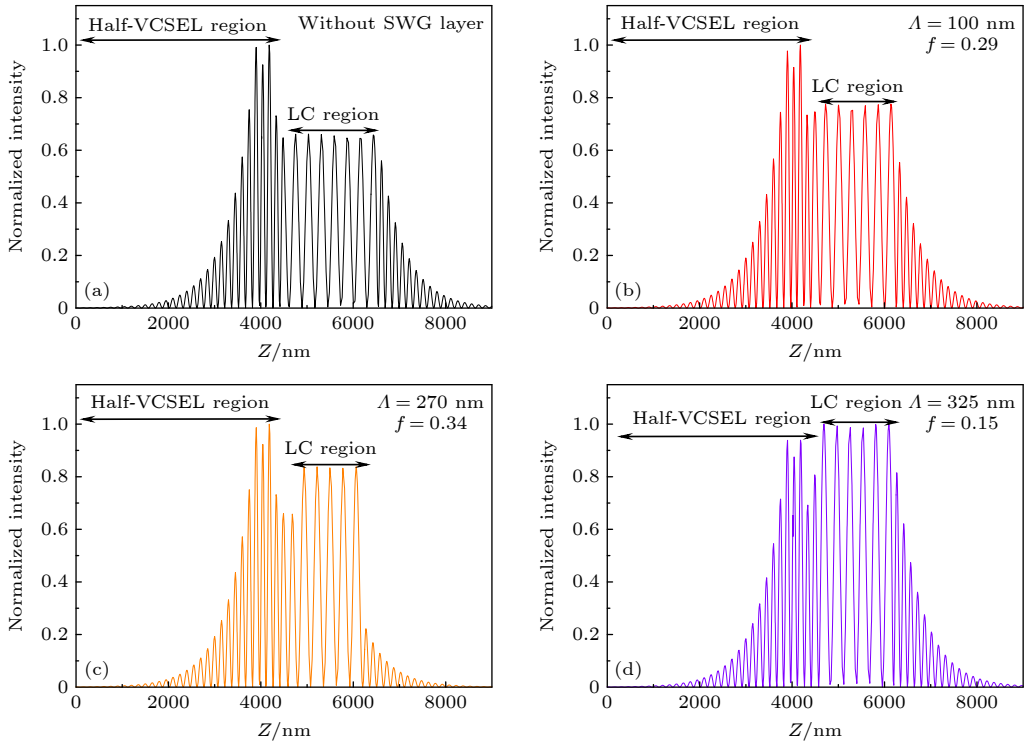

图 2 液晶可调谐 VCSEL 光场能量分布 (a) 无亚波长光栅的情况; (b)—(d) 为亚波长光栅不同周期、占空比的情况

Fig. 2. Liquid crystal tunable VCSEL field energy distribution: (a) Without sub wavelength grating; (b)–(d) Sub wavelength gratings with different cycles and duty cycles.

根据图中数据, 可以分析出向液晶可调谐 VCSEL 中引入亚波长光栅, 可以调控半导体腔与液晶微腔之间的光场能量分布. 这是因为亚波长光栅层的引入, 降低了半导体/LC 界面反射, 使得主要局限在半导体腔内的光场能量渗入到液晶层中, 有效地增强了有源区与液晶微腔耦合. 也意味着存在一个最佳周期、占空比使得半导体腔与液晶微腔之间的耦合最佳, 此时器件的波长调谐能力最强. 在这一过程中, 我们发现虽然液晶微腔中的光场能量越强, 有源区与液晶微腔之间的耦合效果越好, 但会使得器件的阈值增大, 进而影响器件的性能. 例如, 在占空比 f 为 0.15、周期 Λ 为 325 nm 情况下, 光场能量几乎全部集中在液晶层中, 使得有源区光场能量与液晶微腔中的光场能量失衡, 光子在有源区内的能量减弱, 限制因子下降, 进而造成器件的激射阈值增大. 因此在设计过程中为了增强半导体腔与液晶腔之间的耦合, 不仅要提升液晶微腔中的光场能量, 还应注意其对整体 VCSEL 光场能量分布的影响. 最终我们模拟得到在亚波长光栅占空比 f 为 0.34、周期 Λ 为 270 nm, 深度 D 为 $\lambda/4$ 时器件具有最佳能量场分布, 此时有源区与液晶微腔耦合效果最佳, 液晶层中的光场能量提升近 25%.

3 基本调谐原理

我们研究的液晶可调谐 VCSEL 所选用的液晶为向列相型液晶, 其在电场的作用下, 液晶分子在 y-z 平面内发生旋转. 当施加电压为 0 V 时, 液晶分子平行于液晶分子 x-z 平面 ($\theta = 0$), 随着施加电压的增加, 液晶分子沿电场方向旋转, 最终与 x-z 平面垂直 ($\theta = \pi/2$)[22]. 如图 3 为液晶分子倾角随着电压变化示意图, 其中 n 为液晶分子的指向矢.

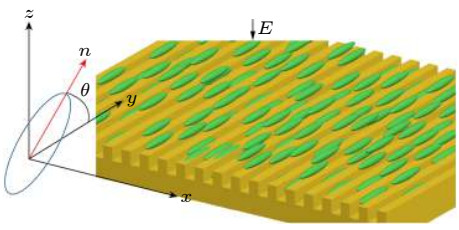

图 3 液晶分子倾角随调谐电压变化示意图

Fig. 3. Diagram of liquid crystal molecule inclination varying with tuning voltage.

各向异性液晶折射率由 3 个正交分量组成 n_x, n_y 和 n_z, 其取决于液晶分子的排列方向, 对于单轴向列相液晶. 当光束沿 z 轴传输时, 平行于液晶长轴的 y 方向光 (即 e 光) 的折射率分量为 $n_{//}$, 而沿液晶短轴的 x 方向光 (即 o 光) 的折射率分量的折射率分量为 $n_\perp$, 即 $n_y = n_{//}$, $n_x = n_z = n_\perp$. 通过折射率椭球公式, 计算出液晶分子在 x 轴等效折射率 $n_{\rm o}$ 和 y 轴等效折射率 $n_{\rm e}$ 分别为[23]:

$$n_{\rm o} = n_\perp, \tag{1}$$

$$n_{\rm e} = \frac{n_{//} n_\perp}{\sqrt{n_\perp^2 \cos^2\theta + n_{//}^2 \sin^2\theta}}. \tag{2}$$

由此我们可以分析出, 在外加电场作用下, 随着液晶分子排列扭曲和倾斜程度的不同, 液晶折射率也会随之发生变化. 根据该理论我们模拟分析了液晶分子 x 极化方向与 y 极化方向的液晶电控双折射率与电压的变化关系, 如图 4 所示. 由图中数据可知, 随施加电压的增加, 起初 x 极化方向与 y 极化方向液晶双折射率保持不变, 这是因为液晶还未达到偏转阈值, 当达到偏转阈值后, 根据 (1) 式与 (2) 式可知, y 极化方向折射率 $n_{\rm e}$ 随液晶分子的偏转逐渐下降, 随着电压的进一步增加, 液晶双折射率不再发生变化, 这是由于液晶分子的旋转力矩与电场方向平衡, 进而使得液晶双折射率不再变化, 由于 x 极化方向折射率不随液晶分子偏转, 故而其折射率 $n_{\rm o}$ 一直保持不变.

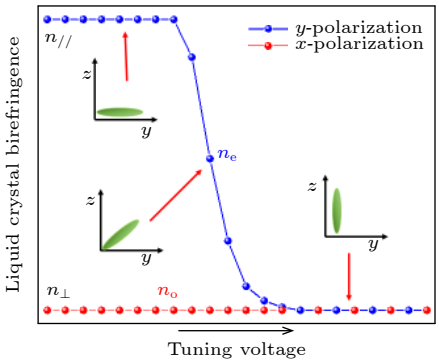

图 4 液晶电控双折射率与电压的变化关系

Fig. 4. Relationship between electronic controlled birefringence and voltage of liquid crystal.

根据液晶折射率与电压的关系, 我们着手分析液晶在可调谐 VCSEL 中的作用. 首先 VCSEL 的谐振腔可以简化为一个 Fabry-Pérot 腔, 在谐振腔内会产生多种光波, 只有满足驻波条件的光波才能在谐振腔内有效振荡, 实现相干叠加, 出射激光, 即光子在谐振腔中往返的相位差为 2π 的整数倍[24]:

$$\phi_{\rm rt} = \frac{2wn'L_{\rm eff}}{c} = 2q\pi, \tag{3}$$

式中, $\phi_{\rm rt}$ 为往返相位差, w 为光子能量, n' 为有源区的折射率, $L_{\rm eff}$ 为激光器有效腔长, c 为真空中光速, q 为整数. 进一步的由 (3) 式可得到:

$$n'L_{\rm eff} = q\frac{\lambda}{2}, \tag{4}$$

式中, λ 为激光器的激射波长. 通过 (4) 式可知, 激光器激射波长由激光器的有效腔长或有源区的折射率决定. 而对于可调谐器件而言, 通常是通过改变激光器的谐振腔长来实现激射波长的变化, 进一步的可以得到激射波长的变化范围 (5) 式:

$$n'\Delta L_{\rm eff} = q\frac{\Delta\lambda}{2}. \tag{5}$$

再将 (5) 式回带至 (4) 式简化后得到:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\rm o}} = \frac{\Delta L_{\rm eff}}{L_{\rm eff}}, \tag{6}$$

式中, $\Delta\lambda$为波长变化范围, $\Delta L_{\rm eff}$ 为谐振腔有效腔长变化量, $\lambda_{\rm o}$ 为谐振波长. 对于液晶可调谐 VCSEL, 当在液晶盒两侧施加电压时, 电场改变了液晶分子的排列方向. 液晶的折射率随之减小, 从而改变了液晶层的有效腔长, 使得 VCSEL 的有效腔长 L 减小, 即对于液晶可调谐 VCSEL 而言, 其有效腔长变化量由液晶层所决定, 由此可以推出液晶可调谐器件的基本公式:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\rm o}} = \frac{l_{\rm LC}\Delta n_{\rm LC}}{L_{\rm eff}}, \tag{7}$$

其中, $\Delta n_{\rm LC}$表示为液晶双折射变化率, $l_{\rm LC}$表示液晶层有效厚度. 综上, 通过 (7) 式, 可以得到液晶可调谐 VCSEL 的波长调谐能力, 取决于液晶层厚度和液晶双折射变化率.

4 结果和分析

在构建完成内腔亚波长光栅的液晶可调谐 VCSEL 器件的基础上, 分析了影响液晶可调谐器件调谐范围的因素, 并对比分析了液晶可调谐 VCSEL 引入亚波长光栅结构前后, 对波长调谐范围、调谐效率、阈值增益等的影响.

图 5 表示液晶层厚度和旋转角度与调谐波长之间的关系. 从图中纵向来看, 随着液晶分子旋转角度的增大, VCSEL 的激射波长逐渐蓝移. 这是因为, VCSEL 的激射方向沿 z 轴方向, 根据液晶分子等效折射率公式, 对于沿 z 轴传输的光, 随着液晶分子旋转角度的增大, 其 y 偏振方向有效折射率也在减小, 使得器件的有效腔长逐渐较小, 故而激射波长发生蓝移.

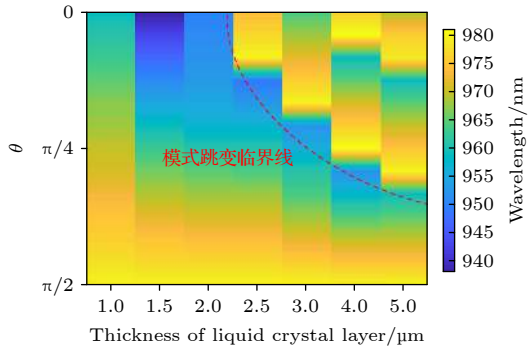

图 5 液晶层厚度和旋转角度与调谐波长之间的关系图

Fig. 5. The relationship between the thickness and rotation angle of the liquid crystal layer and the tuning wavelength.

从图中横向来看, 液晶层厚度从 1 μm 增加至 2 μm, 随着液晶层厚度的增加, 波长蓝移范围逐渐增加, 这是因为在液晶材料确定的情况下, 其对应的折射率变化量 Δn 是固定的. 此时液晶层厚度的增加, 可以使得可调谐 VCSEL 有效腔长变化程度增大, 进一步的使得波长蓝移程度的增加, 波长调谐范围得到提升.

然而随着液晶层厚度的进一步增大, 逐渐进入模式跳变区, 波长调谐范围呈现下滑趋势. 这是由于 VCSEL 的纵模间距与有效腔长成反比, 当液晶层厚度较小时, 激光器纵模间距较大, 在连续调谐过程始终保持单纵模工作, 而随着液晶层厚度一直增大, VCSEL 的纵模间距逐渐减小, 使得器件在连续调谐过程更易出现模式之间的竞争, 进而影响波长调谐范围. 例如图中液晶层厚度为 5 m 时, 激光器波长可调谐范围约 21 nm, 此时因为液晶层厚度过大, 造成纵模间距过短, 在连续调谐过程出现了模式之间的竞争, 发生了两次模式跳变, 影响了波长调谐范围. 综上所述, 虽然液晶层的厚度增加可以一定程度提升可调谐 VCSEL 的调谐范围, 但其厚度的增加也存在一定限制, 因为过多的增大液晶层厚度会降低纵向模式之间光谱距离, 增加模式之间的竞争, 进而造成波长调谐范围的减小. 故而可以确定存在着最佳的液晶层厚度, 使得可调谐 VCSEL 具有最大调谐范围, 由模拟结果图可知, 在液晶层厚度为 1.5 μm 时, 器件最大调谐范围为 41 nm.

通过在液晶层与半导体腔之间引入一层亚波长光栅层作为减反层 (AR), 可以有效地降低半导体/LC 界面的高反射率, 同时改善半导体腔与液晶腔的耦合, 提升波长调谐范围, 经计算得到引入亚波长光栅层前后对液晶可调谐 VCSEL 波长调谐范围影响, 如图 6 所示, 在液晶厚度为 1.5 μm 的情况下, 具有亚波长光栅的液晶可调谐 VCSEL 的最大调谐范围为 41 nm, 其调谐比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 为 4.2%, 而无亚波长光栅的液晶可调谐 VCSEL 的最大调谐范围为 24 nm, 其调谐比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 为 2.5%, 由此可见, 内腔亚波长光栅的引入有效地提高可调谐 VCSEL 的波长调谐范围和调谐效率, 使得液晶可调谐 VCSEL 的波长调谐范围提升了 42%, 波长调谐比提升 41%.

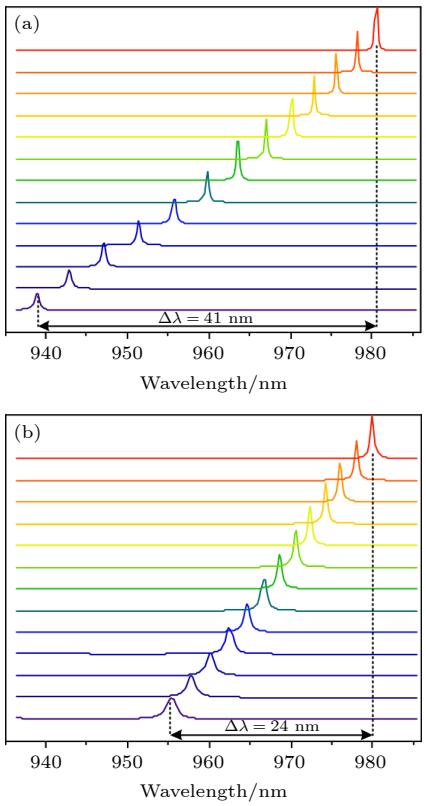

图 6 (a) 具有亚波长光栅可调谐 VCSEL 调谐范围; (b) 无亚波长光栅可调谐 VCSEL 调谐范围

Fig. 6. (a) Tunable VCSEL tuning range with sub wavelength grating; (b) tunable VCSEL tuning range without sub wavelength grating.

限制因子表示增益区与激射模式之间的交叠程度, 是决定有源区为激射模式提供增益有效性的重要因素. 可表示为: $\Gamma = \Gamma_x \cdot \Gamma_y \cdot \Gamma_z$, 其中 Γ_x, Γ_y 代表横向限制因子, Γ_z 代表纵向限制因子. 在垂直腔面发射激光器中纵向限制因子是影响阈值增益的重要因素, 纵向限制因子的定义为 [25]

$$\Gamma_z = \frac{\int_{L_a} n_a^2 |E(z)|^2 \mathrm{d}z}{\int_L n^2 |E(z)|^2 \mathrm{d}z}, \tag{8}$$

式中, L_a 表示有源区有效腔长, L 为可调谐 VCSEL 腔长, n_a 为有源区等效折射率, n 为可调谐 VCSEL 等效折射率. 在得到纵向限制因子 Γ_z 后, 根据 VCSEL 的阈值增益 G_{th} 公式 [26] 为

$$G_{th} = \frac{1}{\Gamma}\left(\alpha + \frac{1}{L}\ln\frac{1}{\sqrt{R_1 \times R_2}}\right), \tag{9}$$

式中: α 为损耗因子; R_1, R_2 为上下 DBR 的反射率. 通过计算得到液晶可调谐 VCSEL 引入亚波长光栅前后, 液晶分子角与限制因子和阈值增益的系, 如图 7 所示.

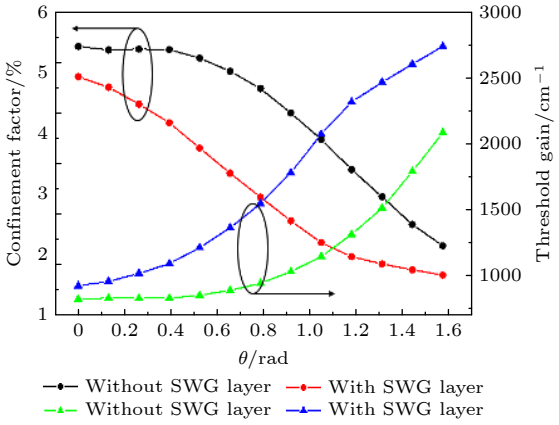

图 7 液晶可调谐 VCSEL 引入亚波长光栅前后, 液晶分子角与限制因子和阈值增益的关系

Fig. 7. The relationship between liquid crystal molecular angle and confinement factor and threshold gain before and after introducing subwavelength grating in liquid crystal tunable VCSEL.

由液晶分子角与限制因子和阈值增益的关系变化曲线, 可以分析出在波长调谐过程中, 随着液晶分子角度的变化, 波长逐渐蓝移, 当共振偏离中心波长和材料增益峰值时, 阈值载流子密度增大, 这会导致载流子泄漏和俄歇复合增加, 从量子阱中获得的增益减小, 造成限制因子的下降, 由 (8) 式可知, VCSEL 的阈值增益 G_{th} 与纵向限制因子 Γ_z 成反比, 故而阈值逐渐增益增大, 与此同时具有亚波长光栅层设计的可调谐 VCSEL 其阈值增益大于无亚波长光栅层的可调谐 VCSEL, 这是由于亚波长光栅层的存在使得液晶中耦合的光场能量增强, 造成器件纵向限制因子的减小, 阈值增益增加

约 24%, 因此在液晶可调谐 VCSEL 中引入亚波长光栅设计, 虽然该设计在一定程度上使得阈值电流有所增加, 但其与传统可调谐器件相比, 在波长调谐范围和调谐效率等关键参数上, 具有明显优势.

5 结 论

本文首先对液晶可调谐 VCSEL 调谐原理进行了分析, 并根据液晶分子旋转角度变化与液晶分子等效折射率的关系式和 Fabry-Pérot 腔的谐振条件等, 得到了液晶可调谐 VCSEL 波长调谐范围表达式, 并构建了内腔亚波长光栅液晶可调谐 VCSEL, 通过 Comsol 模拟了液晶层厚度对器件调谐范围的影响, 计算出最佳的液晶层厚度, 使得器件具有最大调谐范围. 于此同时, 分析了亚波长光栅层的引入对液晶可调谐 VCSEL 带来的影响, 将亚波长光栅层置于液晶层与半导体腔之间, 可以有效地降低半导体/LC 界面的高反射率, 改善半导体腔与液晶腔的耦合, 使得主要局限在半导体腔内的光场能量渗入到液晶层中, 提升了波长调谐范围和调谐比. 此外, 因为液晶层中的光场能量的增加, 使得器件的纵向限制因子下降, 从而使得器件阈值增益提升. 综合考虑, 内腔亚波长光栅对液晶可调谐 VCSEL 器件性能的提升十分的显著, 对应用于光通信及光互联等领域需求的宽范围调谐和高调谐效率的 VCSEL 器件提供了一种新的设计方案.

参考文献

[1] Larsson A 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 1552

[2] Soda H, Iga K, Kitahara C, Suematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329

[3] Iga K, Kinoshita S, Koyama F 1987 *Electron. Lett.* **23** 134

[4] Li Y J, Zong N, Peng Q J 2018 *Laser & Optoelectronics Progress* **55** 050006 (in Chinese) [李玉娇, 宗楠, 彭钦军 2018 激光与光电子学进展 **55** 050006]

[5] Chang-Hasnain C J, Yang W J 2012 *Adv. Opt. Photon.* **4** 379

[6] Lackner M, Schwarzott M, Winter F, Kögel B, Jatta S, Halbritter H, Meissner P 2006 *Opt. Lett.* **31** 3170

[7] Lewander M, Fried A, Weibring P, Richter D, Spuler S, Rippe L 2011 *Appl. Phys. B* **104** 715

[8] John D D, Burgner C B, Potsaid B, Robertson M E, Lee B K, Choi W J, Cable A E, Fujimoto J G, Jayaraman V 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 3461

[9] Nakahama M, Sano H, Nakata N, Matsutani A, Koyama F 2012 *IEICE Electron. Expr.* **9** 416

[10] Jayaraman V, Cole G D, Robertson M, Uddin A, Cable A 2012 *Electron. Lett.* **48** 867

[11] Huang M C Y, Cheng K B, Zhou Y, Pesala B, Chang-Hasnain C J, Pisano A P 2006 *IEEE Photonic Tech. L.* **18** 1197

[12] Xie Y, Beeckman J, Panajotov K, Neyts K 2014 *Opt. Lett.* **39** 6494

[13] Wang Q 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [王强 2014 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]

[14] Li B Z, Zou Y G, Wang X L, Pei L N, Shi L L, Li P T, Guan B L 2018 *Chinese Journal of Luminescence* **39** 1621 (in Chinese) [李保志, 邹永刚, 王小龙, 裴丽娜, 石琳琳, 李鹏涛, 关宝璐 2018 发光学报 **39** 1621]

[15] Levallois C, Verbrugge V, Dupont L, De Bougrenet de la Tocnaye J-L, Caillaud B, Le Corre A, Dehaese O, Folliot H, Loualiche S 2006 *Appl. Opt.* **45** 8484

[16] Castany O, Dupont L, Shuaib A, Gauthier J P, Levallois C, Paranthoën C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 161105

[17] Frasunkiewicz L, Czyszanowski T, Thienpont H, Panajotov K 2018 *Opt. Commun.* **427** 271

[18] Wang Z P, Zhang F, Yang J W, Li P T, Guan B L 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 064203 (in Chinese) [王志鹏, 张峰, 杨嘉炜, 李鹏涛, 关宝璐 2020 物理学报 **69** 064203]

[19] Jiang X W 2016 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [江孝伟 2016 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]

[20] Xia H M 2013 *M. S. Thesis* (Hefei: Anhui University) (in Chinese) [夏慧敏 2013 硕士学位论文 (合肥: 安徽大学)]

[21] Kanamori Y, Roy E, Chen Y 2005 *Microelectron Eng.* **78** 287

[22] Li P T 2018 *M. S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [李鹏涛 2018 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]

[23] Panajotov K, Thienpont H 2011 *Opt. Express* **19** 16749

[24] Pei L N 2019 *M. S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Technology) (in Chinese) [裴丽娜 2019 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]

[25] Debernardi P, Tibaldi A, Orta R 2019 *IEEE J. Quantum Elect.* **55** 2400108

[26] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, Yan R H, Coldren L A 1989 *IEEE J. Quantum Elect.* **25** 1513

Liquid crystal tunable vertical cavity surface emission laser with inner cavity sub-wavelength grating*

Wang Zhi-Peng Guan Bao-Lu † Zhang Feng Yang Jia-Wei

(*Laboratory of Opto-electronics Technology, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*)

(Received 20 May 2021; revised manuscript received 8 June 2021)

Abstract

With the rapid development of information technology, a wavelength-tunable vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) is urgently needed as an optical signal source in dense wavelength division multiplexing (DWDM). Liquid crystal tunable VCSEL realized by utilizing the birefringence characteristics of liquid crystal has the advantages of stable polarization, high reliability, continuous wavelength tuning. In this paper, a liquid crystal tunable VCSEL structure based on intracavity sub wavelength grating is designed, and the influence of liquid crystal layer and sub wavelength grating on the wavelength tuning characteristics of VCSEL are analyzed and studied in depth. The results show that the thickness of the liquid crystal layer in the tunable VCSEL structure not only affects the wavelength tuning range, but also determines the mode hopping in the tuning process. In addition, an effective refractive index antireflection layer is formed by designing the subwavelength grating structure, and the refractive index difference between the liquid crystal layer and the semiconductor layer is optimized to further improve the wavelength tuning range and tuning efficiency. When the center wavelength is 980 nm, the tuning range is increased by 42%, reaching 41 nm, and the wavelength tuning efficiency is increased by 41%. It provides a new method of designing the VCSEL laser with high beam quality and continuous wavelength tuning.

Keywords: vertical cavity surface emitting laser, liquid crystal, tunable

PACS: 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja **DOI:** 10.7498/aps.70.20210957

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

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