



宽范围、偏振稳定的850 nm液晶可调谐垂直腔面发射激光器特性

王小龙, 邹永刚, 郝永芹, 马晓辉, 刘国军

引用本文:

王小龙, 邹永刚, 郝永芹, 等. 宽范围、偏振稳定的850 nm液晶可调谐垂直腔面发射激光器特性[J]. *发光学报*, 2020, 41(10): 1287–1293.

WANG Xiao-long, ZOU Yong-gang, HAO Yong-qin, et al. Characteristics of 850 nm Liquid Crystal Tunable VCSEL with Polarization Stability and Wide Tuning Range[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1287–1293.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200175>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究

Design and Research of Wide Range Tunable Intracavity Liquid Crystal Vertical Cavity Surface Emitting Laser
发光学报. 2018, 39(11): 1621–1626 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183911.1621>

一维增透亚波长光栅的研究

Research of 1D Sub-wavelength Grating Anti-reflection
发光学报. 2017, 38(2): 177–181 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173802.0177>

基于亚波长光栅的VCSEL偏振控制研究

Polarization Research of VCSEL Based on Sub-wavelength Grating
发光学报. 2017, 38(6): 729–734 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173806.0729>

级联光栅结合Sagnac环的可调谐光纤激光器

Tunable Fiber Laser Based on Cascaded Grating Combining with Sagnac Loop
发光学报. 2019, 40(3): 357–365 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194003.0357>

氧化光栅型垂直腔面发射激光器的研究

Study of Oxide-grating Vertical-cavity Surface-emitting Lasers
发光学报. 2013, 34(11): 1517–1520 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133411.1517>

文章编号: 1000-7032(2020)10-1287-07

宽范围、偏振稳定的 850 nm 液晶可调谐 垂直腔面发射激光器特性

王小龙, 邹永刚*, 郝永芹, 马晓辉, 刘国军*

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 设计了一种具有内腔耦合层的 850 nm 液晶可调谐垂直腔面发射激光器(VCSEL)结构,从而获得了更宽的波长调谐范围以及稳定的偏振模式输出。通过分析在不同液晶层厚度下,两种偏振模式的共振波长以及对应的阈值增益的变化关系,研究了液晶厚度影响可调谐 VCSEL 偏振模式和波长调谐的机理。此外,通过优化半导体腔和液晶腔之间的耦合层结构,使得基于液晶的可调谐 VCSEL 结构在实现稳定偏振模式输出的基础上具有更宽的波长调谐范围。结果表明,耦合层结构的加入可以有效地增大液晶可调谐 VCSEL 的调谐范围,最大达到 41.1 nm。同时,在连续的波长调谐过程中,由于 o 光偏振模式始终处于受抑制状态,因此液晶可调谐 VCSEL 可实现稳定的单偏振模式输出。

关键词: 偏振稳定; 液晶; 垂直腔面发射激光器(VCSEL); 波长调谐

中图分类号: TN302 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200175

Characteristics of 850 nm Liquid Crystal Tunable VCSEL with Polarization Stability and Wide Tuning Range

WANG Xiao-long, ZOU Yong-gang*, HAO Yong-qin, MA Xiao-hui, LIU Guo-jun*

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zouyg@cust.edu.cn; gliu626@126.com

Abstract: In this paper, we designed an 850 nm liquid crystal tunable vertical-cavity surface-emitting laser(VCSEL) structure with internal coupling layer to optimize the wavelength tuning range and polarization stability of the device. The resonance wavelength and the corresponding threshold gain of the two polarization modes are analyzed under different liquid crystal layer thicknesses, and the effect of liquid crystal thickness on the tunable VCSEL polarization mode and wavelength tuning is studied. In addition, we add a coupling layer structure between the semiconductor cavity and the liquid crystal cavity, which can make the liquid crystal tunable VCSEL structure realize stable polarization mode and wider wavelength tuning range. The results show that the coupling layer structure can effectively increase the tuning range of liquid crystal tunable VCSEL to 41.1 nm. At the same time, because the polarization mode of o-beam is always suppressed, the liquid crystal tunable VCSEL can achieve stable single polarization mode output in the continuous wavelength tuning process.

Key words: polarization stability; liquid crystal; vertical-cavity surface-emitting laser(VCSEL); wavelength tuning

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-07-25

基金项目: 吉林省科技发展计划(20180519018JH,20190302052GX); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190543KJ); 国家自然科学基金(11474038); 装备预研基金重点项目(61404140103)资助

Supported by Jilin Science and Technology Development Plan(20180519018JH,20190302052GX); Jilin Education Department “135” Science and Technology(JJKH20190543KJ); National Natural Science Foundation of China(11474038); Key Project of Equipment Pre-research Fund(61404140103)

1 引 言

可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有低阈值电流、单纵模、连续的波长调谐特性、圆形对称的光斑以及易于 2D 阵列等特点,在光通信、光储存、光谱学以及医疗等领域具有广阔的应用前景。特别地,在高速数据通信以及各种电信应用(尤其是光网络)中具有宽波长调谐范围的 VCSEL 已经成为最具竞争力的激光光源^[1]。但是,传统的 VCSEL 由于其对称的波导结构使得偏振模式间的各向异性很弱,很难实现稳定的单偏振模式输出,在器件的工作温度和注入电流改变时,VCSEL 会出现偏振模式间的切换现象^[2-3],一定程度上影响器件的工作性能。因此,面向实际应用的具有偏振稳定、宽波长调谐范围的 VCSEL 器件,一直以来都是研究领域的热点。目前,实现 VCSEL 偏振稳定常用的技术包括:非对称电流注入^[4]、非对称氧化孔径^[5]、表面浮雕^[6]、选择性外延生长^[7]、单层高对比度光栅结构^[8]、内腔液晶^[9]等。其中集成单层高对比度光栅 (HCG) 结构的 VCSEL 具有较优良的单偏振输出特性。HCG 可完全替代传统 VCSEL 的上 DBR 反射镜结构,同时对两个正交偏振态光波之间引入较大反射率差,从而输出稳定的单偏振模式。Chang-Hasnain 课题组报道的 HCG-VCSEL 结构具有稳定的单偏振模式能力,并且引入 MEMS 结构控制 HCG 产生位移,在一定范围内使 VCSEL 的输出波长可以连续调谐,该结构已经分别在 850, 1 060, 1 550 nm 等 VCSEL 的常用波段先后得到了证实^[10-12]。2006 年,Levalloisa 等首次提出了通过腔内嵌入液晶层结构来实现对 VCSEL 输出偏振模式的调控^[13],利用液晶的双折射特性来增大腔内偏振模式间的阈值增益差,该方法同样可以使 VCSEL 具有稳定的单偏振模式输出特性。同时,液晶作为一种电光折射率调制材料,在外加电压的作用下通过改变 e 光的等效折射率可以使 VCSEL 的输出波长连续调谐^[14]。该方法不仅拓展了 VCSEL 的功能性,同时由于放弃了 MEMS 的调谐方式,使得其制作工艺更加简单,可靠性高。因此,结合内腔液晶结构的可调谐 VCSEL 受到了广泛关注,成为研究热点之一。

本文设计了一种基于内腔液晶的宽调谐范围、偏振稳定的 850 nm 可调谐 VCSEL 结构。

通过传输矩阵法研究了液晶厚度影响可调谐 VCSEL 偏振模式和波长调谐的机理。同时,通过优化半导体腔和液晶腔之间的耦合层结构,使得基于液晶的可调谐 VCSEL 结构在实现稳定偏振模式输出的基础上具有更宽的波长调谐范围。

2 液晶 VCSEL 结构设计

设计的基于向列相液晶的 VCSEL 器件结构如图 1 所示。该 VCSEL 由以下几部分组成,分别是半 VCSEL 结构、耦合层、液晶层和顶部 DBR 结构。其中,半 VCSEL 结构沿外延生长方向主要包括背面电极、GaAs 衬底、底部 n-DBR、有源区以及激光器注入电极等;液晶层包括间隔层和向列相型液晶;顶部 DBR 区包括顶部多层 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质膜 DBR、玻璃基底、电极等。液晶垂直腔面发射激光器采用多片集成技术制备,即 VCSEL 阵列的半 VCSEL 区、液晶层区和顶部 DBR 区 3 个部分分别制备,在半 VCSEL 区制备完成后在其上面制作间隔层形成液晶单元,通过旋涂法填充液晶,最后将上 DBR 部分覆盖在液晶之上并密封,最终获得结构完整的液晶 VCSEL。

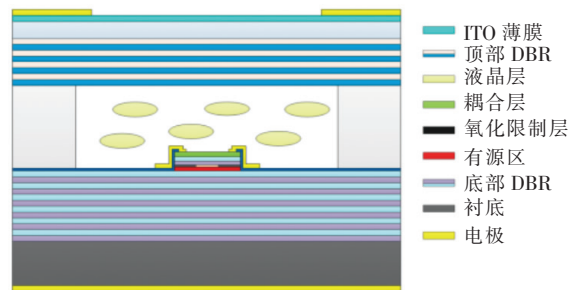


图 1 液晶垂直腔面发射激光器阵列结构

Fig. 1 Structure of liquid crystal vertical cavity surface emitting laser array

增大偏振模式间的损耗差或增益差是使 VCSEL 实现偏振稳定的关键因素。本文利用液晶所具有的双折射(具有两种不同的折射率 n_o 和 n_e)特性使不同偏振模式的共振波长发生分离,从而增大偏振模式间的增益差,进而实现 VCSEL 稳定的偏振模式输出。其中,影响液晶可调谐 VCSEL 偏振特性的参数主要包括液晶层的厚度以及 n_e 和 n_o 的折射率差等。因此,对液晶参数的确定是设计过程中的关键因素。为了计算液晶折射率随波长的变化,采用与实验结果拟合较好的柯西方程来计算,如公式(1)所示:

$$n_{e,o} \cong A_{e,o} + \frac{B_{e,o}}{\lambda^2} + \frac{C_{e,o}}{\lambda^4}, \quad (1)$$

其中, $A_{e,o}$ 、 $B_{e,o}$ 和 $C_{e,o}$ 分别为液晶 o 光和 e 光的柯西系数。通过查阅文献[15], 在 25 °C 时, 液晶 E7 的柯西系数取值分别为: $A_e = 1.693\ 3$, $B_e = 0.007\ 8$, $C_e = 0.002\ 8$, $A_o = 1.499\ 4$, $B_o = 0.007$, $C_o = 0.000\ 4$ 。由公式(1)计算得到液晶折射率分别为 $n_o = 1.503\ 6$ 和 $n_e = 1.689\ 9$ 。

3 模拟结果

3.1 偏振特性优化

在 LC-VCSEL 结构的优化过程中, 液晶层的厚度是影响器件输出偏振态的主要因素。因此, 有必要进一步地分析液晶厚度对偏振模式间的共振波长以及阈值增益差的影响。VCSEL 的共振波长由腔模位置决定, 可以通过光学传输矩阵法^[16]计算 VCSEL 多层结构的反射谱来获得, 其传输矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos(\delta_j) & \frac{i}{n_j} \sin(\delta_j) \\ i n_j \sin(\delta_j) & \cos(\delta_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 为矩阵单元, n_j 和 δ_j 分别是第 j 层膜的折射率以及通过第 j 层膜后的相位差, 其表达式为:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi} \right) d_j, \quad (3)$$

其中 α_j 、 n_j 和 d_j 分别是吸收系数、折射率和物理厚度。膜系的反射率可由公式(4)计算得到:

$$R = \frac{(n_0 \mathbf{B} - \mathbf{C})(n_0 \mathbf{B} - \mathbf{C})^*}{(n_0 \mathbf{B} + \mathbf{C})(n_0 \mathbf{B} + \mathbf{C})^*}, \quad (4)$$

通过计算不同波长对应的反射率可得到膜系整体的反射谱, 谱线中的缺陷位置对应的波长即为 VCSEL 的共振波长。本文使用 Rsoft 软件对液晶可调谐 VCSEL 结构进行建模, 通过计算不同液晶厚度时多层膜系的反射谱和腔膜位置, 即可获得液晶厚度与 VCSEL 共振波长的变化关系。图 2 为液晶厚度等于 0.5 μm 时的膜系反射谱, 其中谱线缺陷位置对应的波长即为 VCSEL 在液晶厚度为 0.5 μm 时的共振波长。通过求解、整合不同液晶厚度时对应的腔膜位置即可得到液晶厚度与共振波长的关联。

公式(5)用来计算两种偏振模式的阈值增益

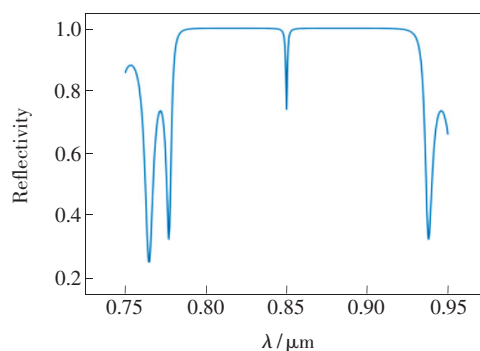


图 2 液晶厚度为 0.5 μm 时, LC-VCSEL 的反射谱。

Fig. 2 LC-VESEL reflection spectrum at the thickness 0.5 μm of LC

随液晶厚度的变化关系:

$$G_{\text{th}} = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right), \quad (5)$$

其中 L 为液晶 VCSEL 的等效腔长, Γ 为光限制因子, R_1 和 R_2 分别为上下 DBR 反射率, α 为腔内吸收系数。共振波长和阈值增益的计算结果如图 3 所示。其中图 3(a) 为 25 °C 时, 不同液晶厚度与腔内共振波长的关系, 其中红色曲线为寻常光(n_o), 黑色曲线为非寻常光(n_e)。从图中可以发现, 液晶的“双折射”特性使得腔内两种偏振模式的共振波长存在分离。偏振模式间

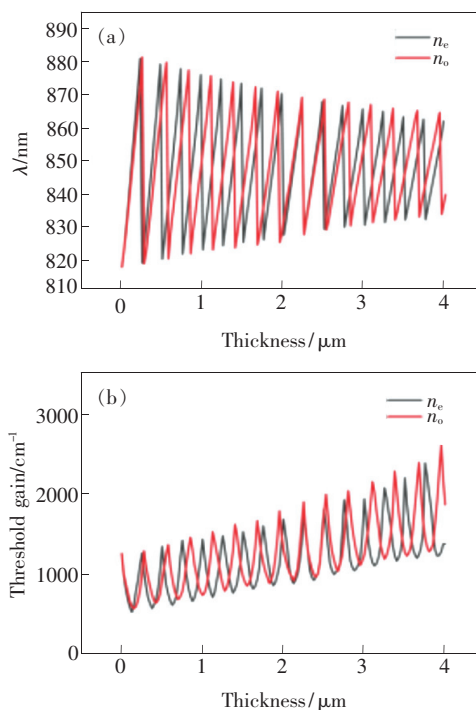


图 3 不同的液晶厚度与共振波长(a)和阈值增益(b)的关系

Fig. 3 Relationship between different liquid crystal thickness and resonance wavelength(a) and threshold gain(b)

的波长差异呈现周期性变化,例如当液晶厚度为 $2.2 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 时,两种偏振模式的共振波长曲线存在几乎重合的情况。当继续增大液晶厚度时,模式间差异重新变得明显。随着液晶厚度的增大,两种偏振模式的自由光谱范围均呈现减小的趋势。两种偏振模式的阈值增益随液晶厚度变化的关系如图 3(b) 所示。由于共振波长的分离,使得偏振模式间的阈值增益也同样存在明显的差异。通过设置合适的液晶厚度,可以使得 n_e 模式相比于 n_o 模式始终具有更小的阈值增益,从而使得器件始终输出稳定的单偏振模式。随着液晶厚度的增大,由于更多的光场将存在于液晶层内,这会使得器件整体的光场限制因子减小,从而导致阈值增益的增大。因此,一味地增大液晶厚度对于器件的波长调谐范围和阈值都是不利的。

为了更清晰地观察液晶厚度对偏振模式间的共振波长和阈值增益的影响,分别将图 3(a)、(b) 中的两条曲线相减 ($n_e - n_o$), 得到了在不同液晶层厚度时两种偏振模式的波长差和阈值增益差,如图 4 所示。

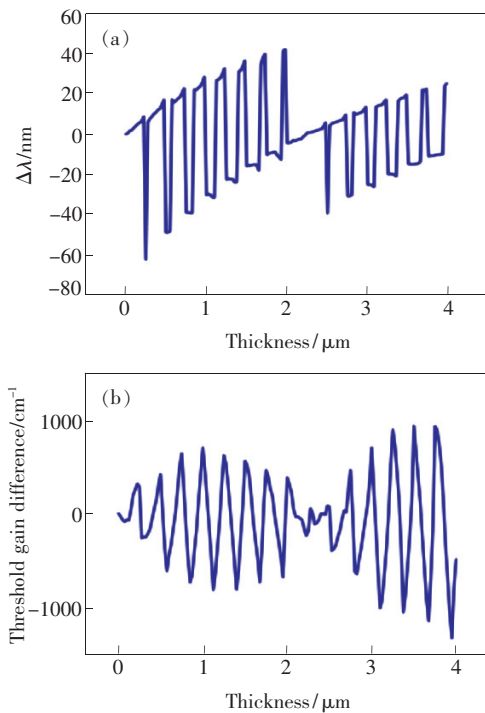


图 4 不同液晶厚度时,两种偏振模式的共振波长差(a)和阈值增益差(b)。

Fig. 4 Resonance wavelength difference (a) and threshold gain difference (b) of the two polarization modes with different liquid crystal thickness

根据图 4 的结果可以更容易地确定液晶层的初始厚度,使得两种偏振模式间的共振波长满足图 5 所示的调谐过程。其中,红线和蓝线分别代表 e 光和 o 光的腔纵模位置,黑线代表材料增益曲线。由于 o 光的折射率不随液晶倾角的改变而发生变化,因此当确定液晶厚度后,o 光的共振波长也随之确定。相比于 o 光,e 光在波长连续调谐的过程中(由 E 处移动到 E' 处时)始终更靠近材料的增益峰,使得 o 光在模式竞争中一直处于受抑制的状态,从而器件在调谐过程中将始终具有稳定的单偏振模式。例如,在液晶厚度为 $1.75 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 时,两种偏振模式具有较大的波长分离值,同时 e 光具有更低的阈值增益。

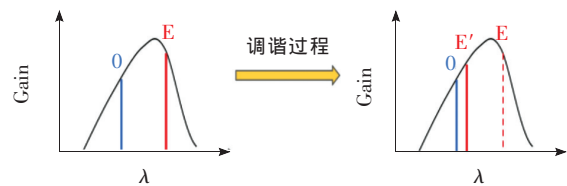


图 5 偏振稳定的 LC-VCSEL 波长调谐过程

Fig. 5 Wavelength tuning process of LC-VCSEL with polarization stability

3.2 波长调谐范围优化

在传统的液晶可调谐 VCSEL 结构中,液晶微腔与半导体腔之间常采用 $1 \sim 2$ 对的中间 DBR 结构相连。由于在两个微腔界面存在较大的折射率差,使得大部分的光场被限制在半导体腔内,这直接影响了器件的最大波长调谐范围^[17]。本文设计了一种具有内腔耦合层的液晶可调谐 VCSEL 结构,将原有的中间 DBR 与液晶微腔接触的表面由原来的 $\lambda/4n$ 光学厚度变为 $\lambda/2n$ 。改变了原有的相位分布,使更多的光场进入到液晶微腔中,从而增大器件的波长调谐范围。建立了如图 6 所示的两种液晶 VCSEL 结构模型,通过对比方式来说

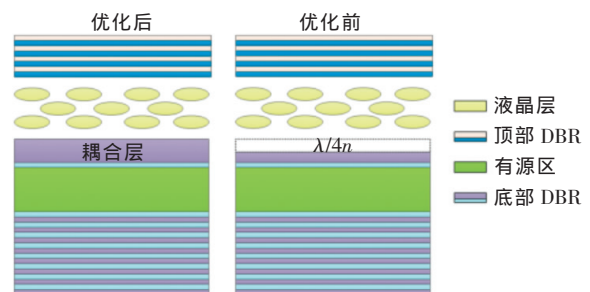


图 6 液晶可调谐 VCSEL 结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of liquid crystal tunable VCSEL

明耦合层的加入对器件波长调谐范围的提升。除耦合层设置不同外,其他组成部分均使用相同的结构参数,包括: λ 厚度有源区、32 对 GaAs/Al-GaAs 底部 DBR、1.9 μm 液晶层、1 对 GaAs/Al-GaAs 中间 DBR 以及 10 对 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 顶部 DBR。

在实际的波长调谐过程中,通过外加调谐电压的方式控制液晶分子的旋转,从而连续地改变液晶分子的等效折射率,实现输出波长的连续调谐。等效折射率与液晶分子倾角的关系满足下列公式:

$$n_x = n_o, \quad (6)$$

$$n_y = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}},$$

θ 的变化范围为 $0 \sim \pi/2$ 。当 $\theta = 0$ 时,液晶非寻常光折射率 $n_e = 1.6899$,寻常光折射率 $n_o = 1.5036$ 。当 θ 逐渐增大时,o 光的折射率不会发生改变,而 e 光的折射率逐渐减小,直至与 o 光相等。本文通过连续地改变 e 光等效折射率的方法来模拟液晶可调谐 VCSEL 的波长调谐过程。

图 7(a) 为液晶可调谐 VCSEL 在有无耦合层前后的输出波长随 e 光折射率变化的曲线。在未加入耦合层前,由于受到界面处较大反射率的影响,液晶可调谐 VCSEL 的最大自由光谱范围为 27.4 nm。当加入耦合层设计后,重新优化了器件内部的光场分布,使得更多的光进入到液晶层中,极大地提升了器件的自由光谱范围。结果表明,具有内腔耦合层的液晶可调谐 VCSEL 的最大波长调谐范围提升到 41.1 nm,有效地增大了器件的波长调谐范围和调谐效率。图 7(b) 为两种偏振模式输出随 e 光折射率变化曲线,随着 e 光偏振模式折射率的改变,输出波长蓝移。在 41.1 nm 的波长移动范围内,e 光共振波长始终具有更低的阈值增益,并且更靠近材料增益峰位置。因此,e 光偏振模式始终具有更高的量子阱增益,更容易激射。相反,o 光偏振模式在竞争中一直处于受抑制状态。结果表明,本文设计的具有内腔耦合的液晶可调谐 VCSEL 结构具有 41.1 nm 的连续波长调谐范围,并且可实现稳定的偏振模式输出。

图 8 是在腔内共振波长都为 850 nm 时,有无耦合层的腔内纵向光场分布。可以明显发现,通过改变半导体腔和液晶腔之间的耦合方式后,有效地增大了光场在液晶层中的分布。同时我们

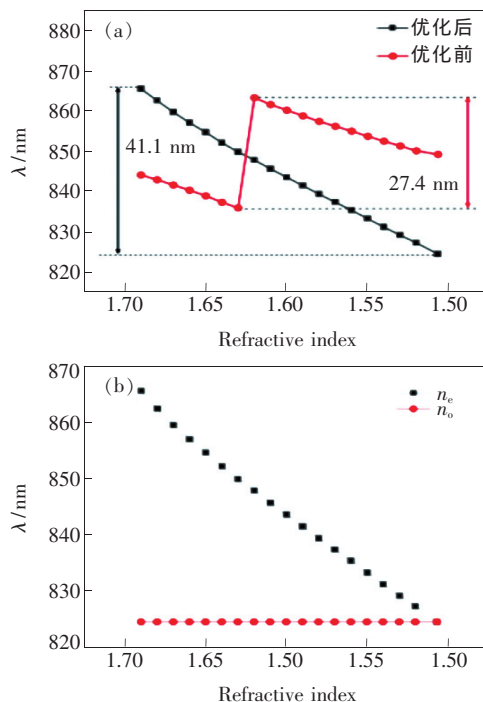


图 7 (a) 优化前后波长调谐范围曲线;(b) o 光和 e 光的波长调谐曲线。

Fig. 7 (a) Wavelength tuning range curve before and after optimization. (b) Wavelength tuning curve of o and e beam.

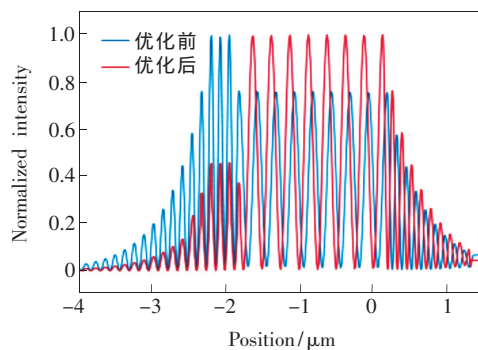


图 8 腔内纵向光场分布

Fig. 8 Distribution of longitudinal light field in the cavity

也对优化前后光场限制因子的变化进行了计算。结果表明,在加入耦合层设计后,光场限制因子由原来的 2.62% 降低到 1.57%。虽然光限制因子的降低会使得器件的工作阈值增大,但由于 VCSEL 本身具有低阈值的特点,优化后的波长调谐范围相比之前具有明显的提升。

4 结 论

本文设计了一种具有宽调谐范围、偏振稳定的 850 nm 液晶可调谐 VCSEL 结构。通过传输矩

阵法研究了在不同液晶层厚度下,两种偏振模式的共振波长以及对应的阈值增益的变化关系,分析了液晶层厚度对器件输出偏振模式的控制机理。此外,为进一步提升液晶可调谐 VCSEL 的波长调谐范围,在半导体微腔与液晶微腔之间增加了一个耦合层设计。通过对比的方式表明耦合层

的加入极大地提升了液晶可调谐 VCSEL 的最大波长调谐范围。结果显示,本文设计的具有内腔耦合的液晶可调谐 VCSEL 结构最大波长调谐范围 41.1 nm,相比于传统液晶 VCSEL 结构提升明显。同时,液晶可调谐 VCSEL 可保持稳定的单偏振模式输出。

参 考 文 献:

- [1] KAPON E, SIRBU A. Long-wavelength VCSELs: power-efficient answer [J]. *Nat. Photonics*, 2009, 3(1):27-29.
- [2] GIACOMELLI G, MARIN F, GABRYSCH M, *et al.*. Polarization competition and noise properties of VCSELs [J]. *Opt. Commun.*, 1998, 146(1-6):136-140.
- [3] CHOQUETTE K D, SCHNEIDER R P, LEAR K L, *et al.*. Gain-dependent polarization properties of vertical-cavity lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, 1(2):661-666.
- [4] CHEN J J, WU Z M, TANG X, *et al.*. Generation of polarization-resolved wideband unpredictability-enhanced chaotic signals based on vertical-cavity surface-emitting lasers subject to chaotic optical injection [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(6):7173-7183.
- [5] PANAJOTOV K, GATARE I, VALLE A, *et al.*. Polarization- and transverse-mode dynamics in optically injected and gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, 45(11):1473-1481.
- [6] PANAJOTOV K, KOTYNSKI R, CAMARENA M, *et al.*. Modeling of the polarization behavior of elliptical surface-relief VCSELs [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2005, 37(1-3):241-252.
- [7] LIU T, KATAYAMA T, KAWAGUCHI H. High-frequency self-modulation in short-external-cavity VCSEL with concave mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, 27(3):280-283.
- [8] HUANG M C Y, ZHOU Y, CHANG-HASNAIN C J. A nanoelectromechanical tunable laser [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(3):180-184.
- [9] PANAJOTOV K, THIENPONT H. Vertical-cavity surface-emitting laser with liquid crystal overlay [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(18):16749-16759.
- [10] QIAO P F, COOK K T, LI K, *et al.*. Wavelength-swept VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23(6):1700516.
- [11] RAO Y, YANG W J, CHASE C, *et al.*. Long-wavelength VCSEL using high-contrast grating [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2013, 19(4):1701311-1-11.
- [12] LI K, CHASE C, QIAO P F, *et al.*. Widely tunable 1 060-nm VCSEL with high-contrast grating mirror [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(10):11844-11854.
- [13] LEVALLOIS C, CAILLAUD B, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE J L, *et al.*. Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser using an electro-optic index modulator with 10 nm tuning range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(1):011102-1-13.
- [14] BELMONTE C, FRASUNKIEWICZ L, CZYSZANOWSKI T, *et al.*. Optimization of electrically tunable VCSEL with intracavity nematic liquid crystal [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(12):15706-15715.
- [15] LI J, WU S T, BRUGIONI S, *et al.*. Infrared refractive indices of liquid crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(7):073501-1-5.
- [16] LI Z Y, LIN L L. Photonic band structures solved by a plane-wave-based transfer-matrix method [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 67(4):046607.
- [17] JOHN D D, BURGNER C B, POTSAID B, *et al.*. Wideband electrically pumped 1 050-nm MEMS-tunable VCSEL for ophthalmic imaging [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2015, 33(16):3461-3468.



王小龙(1989 -), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 2015 年于长春理工大学获得硕士学位, 主要从事光电子技术及应用等方面的研究。

E-mail: 935926031@163.com



刘国军(1963 -), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 1990 年于清华大学获得博士学位, 主要从事光电子技术与应用方面的研究。

E-mail: gjliu626@126.com



邹永刚(1982 -), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 2009 年于吉林大学获得博士学位, 主要从事光电子技术与应用、光电子器件等方面的研究。

E-mail: zouyg@cust.edu.cn