

# 液晶可调谐 VCSEL 中高对比光栅结构的设计

郑舟<sup>1</sup>, 邹永刚<sup>1</sup>, 石琳琳<sup>1</sup>, 房俊宇<sup>1</sup>, 王海珠<sup>1</sup>, 范杰<sup>1</sup>, 崔超<sup>2</sup>, 徐莉<sup>1\*</sup>, 马晓辉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>陆军驻长春地区第一军事代表室, 吉林 长春 130022

**摘要** 基于严格耦合波理论设计了一种以液晶为低折射率材料的 Si-SiO<sub>2</sub> 复合高对比光栅, 该光栅适合用于实现液晶可调谐功能的垂直腔面发射半导体激光器件。当 940 nm 的 TM 偏振光入射时, 通过优化参数可得到宽带 ( $\Delta\lambda = 256$  nm) 高反射率 ( $R > 99\%$ ) 且具有偏振稳定性的光栅结构, 满足垂直腔面发射半导体激光器顶部腔面反射镜要求。液晶折射率的改变不会影响光栅的性能, 未来有望将高对比光栅或混合光栅与液晶可调谐垂直腔面发射半导体激光器相结合, 实现可调谐半导体激光器。

**关键词** 激光器; 可调谐垂直腔面发射半导体激光器; 高对比光栅; 液晶; 高反射率; 耦合波理论

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011402

## High-Contrast Grating Structure Design for Liquid Crystal Tunable Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Zheng Zhou<sup>1</sup>, Zou Yonggang<sup>1</sup>, Shi Linlin<sup>1</sup>, Fang Junyu<sup>1</sup>, Wang Haizhu<sup>1</sup>, Fan Jie<sup>1</sup>,  
Cui Chao<sup>2</sup>, Xu Li<sup>1\*</sup>, Ma Xiaohui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>The First Military Command Office of the Army in Changchun, Changchun, Jilin 130022, China;

**Abstract** In this paper, the rigorous coupled-wave analysis theory is used to simulate a hybrid Si/SiO<sub>2</sub> high-contrast grating using a liquid crystal as a low refractive index material, which is suitable for liquid crystal tunable vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL). Using 940-nm TM polarized incident light, the parameters of the grating structure can be optimized to obtain broadband ( $\Delta\lambda = 256$  nm), high reflectivity ( $R > 99\%$ ), and polarization-stabilized characteristics that satisfy the VCSEL top mirror requirements. Changes in the refractive index of the liquid crystal do not affect the quality of the grating. Liquid crystal tunable VCSELs are expected to be combined with different high-contrast gratings and hybrid gratings in the future.

**Key words** lasers; tunable vertical-cavity surface-emitting lasers; high contrast grating; liquid crystal; high reflectivity; coupled-wave analysis

**OCIS codes** 050.1950; 140.7260; 160.3710

## 1 引言

近年来, 可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 被广泛应用于光通信波分复用 (WDM) 系统<sup>[1]</sup> 中, 在原子钟<sup>[2]</sup>、环境监测<sup>[3]</sup>、生物医疗<sup>[4]</sup> 以及高分辨率

OCT 成像<sup>[5]</sup> 等领域具有广阔的应用前景。VCSEL 在保留 VCSEL 优势的同时, 还具有波长可调、系统稳定以及偏振控制等特点, 可以替代固定激光波长激光器<sup>[6-7]</sup>, 从而引起了人们的极大关注。可调谐 VCSEL 通过调谐方法来改变谐振腔的光学长度, 可

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-06-29; 录用日期: 2019-07-03

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JJKH20190543KJ)、吉林省科技发展计划项目 (20180519018JH, 20190302052GX)、长春理工大学校青年基金 (XQNJJ-2018-19)

\* E-mail: 361394566@qq.com

以在不同的波长激射条件下实现波长可调。

目前,最常用的可调谐 VCSEL 结构采用微机电系统(MEMS),该系统可在静电力、电热或压电力的作用下改变 VCSEL 的有效腔长,比如可移动顶镜与半腔之间的空气隙长度<sup>[8]</sup>。1995年,Chang-Hasnain 研究组首次实现了以分布式布拉格反射镜(DBR)为顶部反射镜的具有悬臂梁结构的微机械可调谐 VCSEL<sup>[9]</sup>,通过电压调节空气层的厚度实现调谐。此后,MEMS 调谐方式成为可调谐 VCSEL 的主要调谐方法,然而机械振动的弛豫性能使得 MEMS 调谐 VCSEL 具有输出光偏振不稳定、调谐速率较低以及制作工艺复杂等缺点。MEMS 对外部环境比较敏感,温度或压力的任何变化都可能对器件造成破坏性的影响,而且 MEMS 需要复杂的悬臂释放工艺,易产生噪声,甚至还会存在布朗运动引起的机械波动<sup>[10]</sup>。近年来,液晶电控驱动协调方式的可调谐 VCSEL 逐渐进入人们的视野,利用液晶的电控双折射效应改变液晶层的折射率,等效于改变谐振腔的光学长度,进而可以实现对输出波长的调节。液晶可调谐 VCSEL 可分为外腔<sup>[11-13]</sup>和内腔<sup>[14-15]</sup>两种,前者是指 VCSEL 在具有外部反射镜的液晶盒中,后者是指将液晶层耦合到 VCSEL 结构内部,通过微加工技术将液晶嵌入到距离有源区内部不足 500 nm 的谐振腔内作为电光调谐材料。液晶具有各向异性的双折射效应,在外加电场调谐下可以改变折射光的传输方向,从而改变谐振腔内部的振荡路径,达到改变腔长的目的。向列相液晶具有长程有序性,其折射率与介电常数随着取向的转变而改变,而取向随着平行和垂直方向的分电压的不同而转变。与近晶相液晶相比,向列相液晶的黏滞系数较小,液晶分子易沿长轴方向运动,流动性强,对外界作用敏感,适合用于电控调节。

本文选用 E7 型向列相液晶(对 o 光的折射率  $n_o = 1.5$ ,对于 e 光的折射率  $n_e = 1.75$ )进行实验,该型号液晶具有电控双折射性,同时具有温度稳定性。与 5CB 型相比,E7 型向列相液晶的相变温度范围更大,在  $-10 \sim 60$  °C 范围内都可正常工作。在电场作用下,液晶分子的取向会发生改变,从而可以改变液晶中光的传播路径,进而改变液晶区域光的有效传播长度<sup>[16]</sup>。相比于 MEMS 调谐改变实际腔长,液晶改变的是等效腔长,使得输出更稳定。此外,由于内部偏振增益的各向异性,TE (transverse electric wave)/TM(transverse magnetic wave)偏振对应的波长位置可以有效分离,进而可

以实现光波偏振的稳定控制。因此,液晶可调谐 VCSEL 具有较大的调谐范围、快速响应和无模式跳变连续工作等优点,在电控可调谐领域具有广阔的应用前景。

高对比光栅(HCG)因具有可以代替 VCSEL 中的上反射镜 DBR 结构而引起了研究人员的极大关注<sup>[7]</sup>。DBR 和 HCG 均可满足 VCSEL 谐振腔形成的激射条件,实现超宽带高反射率(反射率  $R > 95\%$ )。DBR 依靠 20 对或者 40 对  $1/4$  波长厚度的高、低折射率材料相间构成的分布式布拉格反射镜实现腔面间反射,但膜层数较多,组分厚度要求较为严格,会对实际器件的制备及稳定性带来一定困难。HCG 是一种高折射率材料被低折射率绝缘电介质(如氧化物或空气)完全包围的亚波长光栅。使用 HCG 作为上反射镜,其厚度约为 DBR 的几十分之一,可以减少外延厚度,降低材料生长的难度,同时提供光学反馈和控制发射光的偏振<sup>[17-19]</sup>。相比于 DBR, HCG 更易于液晶电光调谐材料的嵌入,简化了器件的制备难度,是液晶可调谐 VCSEL 中反射镜的理想结构。目前,针对高反射率光栅与 VCSEL 结合的研究倾向于改变光栅结构,例如使用偏振无关二维光栅充当 VCSEL 顶镜<sup>[20]</sup>,或在 VCSEL 内部刻蚀亚波长光栅,增强光场在低折射率区域的能量分布,扩大 VCSEL 可调谐波长的调谐范围<sup>[21]</sup>,但这些结构仍需利用微机械电激励技术实现调谐。液晶材料的制备技术比较成熟,其将高对比光栅与液晶结合,既可以保留光栅的优势,又可以节约成本,减小体积,增强稳定性,因此,将液晶与高对比光栅相结合具有一定的研究意义和创新性,具有一定的工业应用价值。

本文提出了一种将液晶作为 HCG 低折射率材料的光栅结构,将其作为上反射镜与 VCSEL 结合可以减少外延厚度,且具有衍射效率高、带宽大、偏振稳定等优点。本文通过理论建模对光栅结构的反射和偏振特性进行分析,发现它不仅对 TE、TM 光具有高的反射率,还具有偏振选择性。该结构不受材料和 VCSEL 半腔的限制,可以推广到各个波长范围。利用液晶与金属 HCG 或 Si 基混合光栅相结合<sup>[22-23]</sup>,未来可进一步丰富可调谐 VCSEL 激光器的种类。

## 2 基本原理

### 2.1 光栅设计与理论模型

HCG 是一种周期性的波导阵列结构,光栅各

材料间需要具有较大的折射率差(折射率相差 2 倍以上)。在 HCG 光栅两侧,通常由低折射率材料—高折射率材料—空气构成高折射率对比。液晶是一种各向异性的分子位置无序、取向有序的介于固体和液体之间的中间相态,液晶的流动性支持其可以填充光栅的空隙,充当低折射率材料。向列型液晶由长棒状分子组成,仅支持一维取向顺序排列,其与光栅结构的物理性相结合可以实现对液晶分子的周期性取向控制,实现宽带高反射率的衍射功能。

图 1 为基于液晶可调谐 VCSEL 中上反射镜部分的 HCG 结构示意图,该结构由  $\text{SiO}_2$  和 Si 脊构成,周围材料为 E7 型向列相液晶, Si 光栅脊的厚度

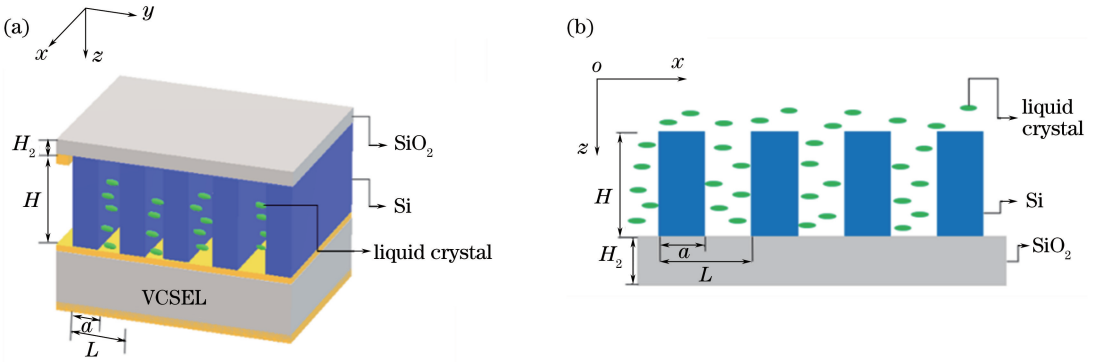


图 1 Si-SiO<sub>2</sub> HCG 结构示意图。(a) 三维结构示意图;(b) 填充液晶后光栅的截面图

Fig. 1 Structural diagram of Si-SiO<sub>2</sub> HCG. (a) Three-dimensional structural diagram; (b) cross-section of the grating filled with liquid crystal

由于光栅衍射是电磁波在非均匀介质中的传播,因此利用矢量衍射理论进行数值计算时必须结合边界条件。常用的矢量衍射理论有严格耦合波理论和时域有限差分理论等,这两种理论的区别是展开电磁波公式的方式不同,严格耦合波理论是基于频域的严格计算方法,与时域有限差分理论相比用时较短,且结果没有近似。利用 Rsoft 软件中的 Diffract MOD 模块建立图 1 所示的模型。Rsoft 是一款基于严格耦合波理论的软件<sup>[24]</sup>,主要用于处理周期性结构的衍射问题。该软件结合了模态传输线理论和麦克斯韦公式,本文使用该软件研究电磁场在周期性介质中的传播性质。

以空间谐波场的形式表示电场矢量和磁场矢量,二者均满足麦克斯韦方程,对求得的解进行边界条件匹配,得到光栅第  $i$  级反射衍射波和透射衍射波的振幅,根据振幅可求得光栅对偏振光的各级衍射效率。

光栅区的电场强度和磁场强度分别为

为  $H$ ,  $\text{SiO}_2$  的厚度为  $H_2$ , 脊宽为  $a$ , 周期为  $L$ , 占空比为  $F(F=a/L)$ 。假设入射光为 940 nm 偏振光, Si 的折射率为 3.67,  $\text{SiO}_2$  的折射率为 1.45。这种结构具有高折射率对比度、晶格常数匹配等优点,与低折射率材料液晶( $n_o=1.5, n_e=1.75$ )组合后可以实现宽带高反射率和偏振控制。VCSEL 是一种具有法布里-珀罗谐振腔的小型化激光器,腔长较短,需要具有宽带高反射率的上下端面镜提供光反馈。此外,VCSEL 谐振腔具有很弱的各向异性,两种正交线性偏振光不稳定,易发生模式跳变,通常采用注入正交偏振光或进行电流调制等形式解决这一问题,而使用液晶组成的 HCG 可以避免使用复杂的光学系统。

$$\mathbf{E} = \sum_i [S_{xi}(z)\mathbf{x} + S_{yi}(z)\mathbf{y} + S_{zi}(z)\mathbf{z}] \exp(-j\mathbf{k}_{2i} \cdot \mathbf{r}), \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_i [U_{xi}(z)\mathbf{x} + U_{yi}(z)\mathbf{y} + U_{zi}(z)\mathbf{z}] \exp(-j\mathbf{k}_{2i} \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

式中: $i$  为衍射级数; $S_{xi}(z)$ 、 $S_{yi}(z)$ 、 $S_{zi}(z)$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向电场分量的第  $i$  级次振幅; $\mathbf{k}_{2i}$  为光在光栅区域(区域 2)的波矢; $\mathbf{r}$  为单位矢量; $\epsilon_0$  为真空介电常数; $\mu_0$  为真空中磁导率; $U_{xi}(z)$  为  $x$  方向磁场分量的第  $i$  级次振幅; $U_{yi}(z)$  为  $y$  方向磁场分量的第  $i$  级次振幅; $U_{zi}(z)$  为  $z$  方向磁场分量的第  $i$  级次振幅。将电场强度和磁场强度代入麦克斯韦方程组,可得到

$$\Delta \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{H}, \quad (3)$$

$$\Delta \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0(x)\mathbf{E}, \quad (4)$$

式中: $\omega$  为入射光波角频率。从而得到

$$S_i(z) = \sum_m C_m \omega_{im} \exp(\lambda_m z), \quad (5)$$

式中: $m$  为本征矢量构成的矩阵的列数; $C_m$  为由边



界条件决定的未知常数;  $\omega_{im}$  为第  $i$  个波的本征矢量构成的矩阵中的元素;  $\lambda_m$  为矩阵对应的特征值。

结合边界条件

$$\delta_{io} + R_i = \sum_m C_m \omega_{im}, \quad (6)$$

$$T_i = \sum_m C_m \omega_{im} \exp(\lambda_m \mathbf{H}) \exp(-j \mathbf{k}_{zi} \mathbf{H}), \quad (7)$$

可以得到各级衍射效率为

$$D_{E_{1i}} = -\operatorname{Re} \left( \frac{k_{z1i}}{k_1 \cos \theta} \right) |R_i|^2;$$

$$D_{E_{3i}} = -\operatorname{Re} \left( \frac{k_{z3i}}{k_1 \cos \theta} \right) |T_i|^2 \quad (8)$$

式中:  $\delta_{io}$  为克罗内克-狄拉克函数;  $R_i$ 、 $T_i$  分别为反射光、透射光的振幅;  $\mathbf{k}_{zi}$  为第  $i$  衍射级次光在  $z$  方向的波矢量;  $D_{E_{1i}}$  和  $D_{E_{3i}}$  分别为入射区域(区域 1)和出射区域(区域 3)内第  $i$  级衍射效率;  $k_1 = k_0 \times n_1$ ,  $k_0$  为波数,  $n_1$  为入射区折射率;  $k_z$  为波矢沿  $z$  方向的分量;  $\theta$  为入射光的入射角。

液晶分子在电场中的取向行为取决于液晶材料的介电各向异性, 由  $\Delta\epsilon$  ( $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ ) 表示, 其中  $\epsilon_{\parallel}$  为平行于主轴的介电常数,  $\epsilon_{\perp}$  为垂直于主轴的介电常数。在向列相液晶分子中, 沿分子长轴的极化度大于垂直方向的极化度, 因此液晶分子沿长轴方向排列。而在电场作用下, 会引入远大于极化度的偶极矩, 使液晶分子发生倾斜、偏转, 最终旋转至沿电场方向排列。o、e 偏振光的折射率随液晶分子偏转角  $\theta$  的变化满足<sup>[25]</sup>

$$n_x = n_o, \quad (9)$$

$$n_y = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (10)$$

式中:  $n_x$  为液晶分子长轴方向的等效折射率;  $n_y$  为液晶分子短轴方向的等效折射率。

因此, 加电压后, 随着液晶分子偏转角度变化, 这两种偏振光所对应的折射率不同, 穿过厚度为  $d$  的液晶层的光将经历相位延迟 ( $\Delta nd/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,  $\Delta n$  为折射率的变化), 在激光器中对应的腔模波长分离, 因此将液晶与 Si-SiO<sub>2</sub> 光栅耦合在一定程度上有利于增强 HCG 的偏振控制效果。阈值增益较大的那一种偏振光将被抑制, 表现出有效折射率改变的现象, 即有效折射率从  $n_e$  逐渐变为  $n_o$ , 与 VCSEL 结合可实现波长的调谐。有人将液晶和光敏单体的均匀混合物置于干涉光场中, 采用光致分离法<sup>[26]</sup> 制备波长级光栅, 但制备过程中液晶分子与单体不能完全分离, 残留在聚合物层中的液晶分子随机排列, 不能通过外加电场进行调谐, 从而影响了光栅的衍射效

率。基于液晶的高对比光栅不但可以实现调谐作用, 还具有偏振稳定性, 与栅型电极构成的液晶光栅相比具有成本低、工艺简单、使用时无需外加偏振控制等优点, 适合应用于可调谐 VCSEL 中。

## 2.2 数值仿真

HCG 的宽带特性归因于光栅脊与周围介质的高折射率对比度, 局域材料折射率的突变使 HCG 在入射/出射面上产生强波导耦合现象。导模共振效应可以使光栅波导层激发的泄漏模与倏逝波衍射模完全重合, 实现零阶衍射。为了达到宽带高反射特性, 需要对光栅参数的占空比进行分析及优化, 使结构只发生零级衍射。使用 Rsoft 软件按照图 1 所示的结构进行建模, 采用控制变量法研究光栅厚度、周期及占空比对光栅反射率的影响, 分别得到 Si 脊厚  $H$ 、SiO<sub>2</sub> 厚度  $H_2$ 、周期  $L$ 、占空比  $F$  与波长对反射率分布谱线的影响, 如图 2 所示。通过分析各反射谱线的参数, 选取一组最适合的 HCG 参数。

HCG 的厚度决定了不同传播模式间的相位叠加和模式间的干涉。为了获得高的反射率, 需要选择合适的厚度使空间模式与透射波互不重叠, 在光栅一端形成相消干涉, 使能量集中于反射波。图 2(a) 中高度有序的棋盘图案说明 HCG 高反射性质同时取决于波长和厚度, 是模式间相互干涉的结果。根据严格耦合波理论, 光栅层厚度对入射电磁波有很强的调制作用, 周期性地影响入射界面对切向电场和磁场的反射。当硅脊的厚度为 0.65 ~ 0.8  $\mu\text{m}$  时, 表现出中心波长为 940 nm 的宽带高反射率特性, 在单个高反射带内, 随着厚度增大, 高反射率带红移; 当硅脊的厚度为 0.7  $\mu\text{m}$  时, 调制强度最大, 适用于激射波长在 900 ~ 1000 nm 间的调谐 VCSEL。图 2(b) 表明, SiO<sub>2</sub> 层厚度的大范围变化对带宽高反射率中心波长具有较小的周期性影响, 共振波长和线宽几乎没有变化, 大的制作容差有利于 HCG 的制作, 在光栅结构中起到便于制作和集成的功能。由图 2(c) 中不同周期对应不同高反射波段可知, HCG 周期主要影响带宽的位置。将 HCG 看作是周期性波导阵列, 其大的折射率对比度和近波长尺寸限制, 使得只有两种模式在  $z$  方向上携带振幅相等、相位相反的能量, 二者在出射面上发生相消干涉。高反射率区同时存在两个模式的双模区域, 表现为共振曲线网格化, 形成棋盘图案, 其中光栅周期决定了截止频率, 可以用来区分单模区、多模区和双模区, 因此光栅周期主要影响高反射率带宽的位置。HCG 反射率由导模的传播常数决定, 并

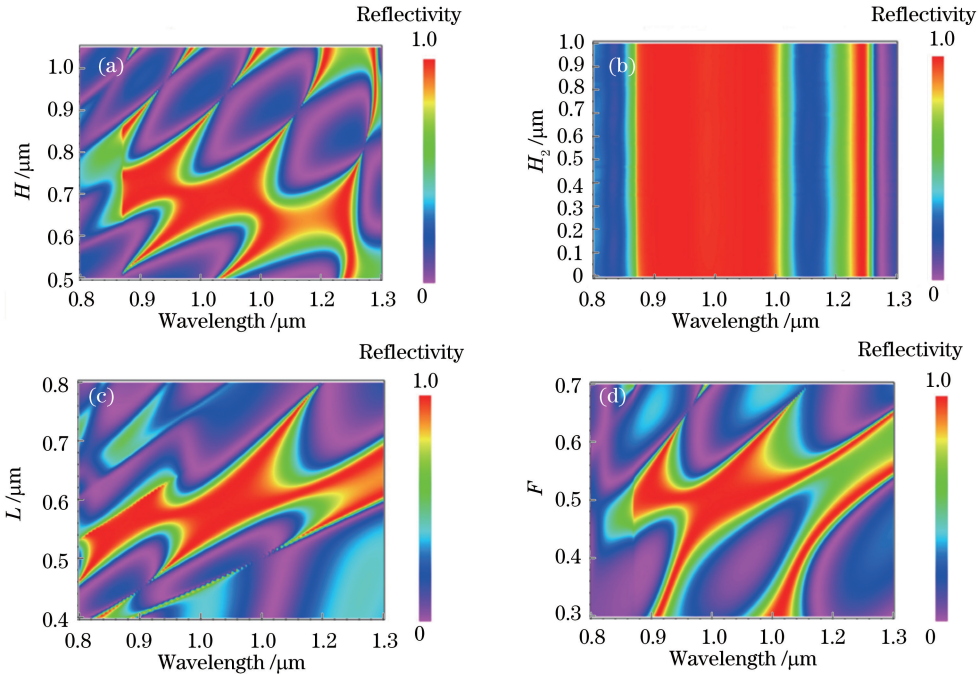


图 2 各参数与波长对反射率的影响。(a)光栅中硅脊的厚度;(b)光栅中 SiO<sub>2</sub> 的厚度;(c)周期;(d)占空比  
Fig. 2 HCG parameters and wavelength as functions of reflectivity. (a) Thickness of Si ridge in grating; (b) thickness of SiO<sub>2</sub> in grating; (c) grating period; (d) duty cycle

随着光栅脊宽的变化而变化,随着占空比改变,高反射率带宽受到强烈影响,如图 2(d)所示。综上所述,光栅周期影响反射带宽的位置,而占空比和硅脊的厚度共同影响带宽的强度和大小,HCG 的宽带高反射性是三者共同作用的结果。

图 3 所示为局部反射率最大时各参数与反射率的关系,可以看出,硅脊厚度和占空比对高反射率特性的影响较大,可以使光栅反射率达到 99% 以上,在影响带宽强度过程中占主导地位。通过优化参数可以设计反射率曲线的中心波长、最大值和带宽等

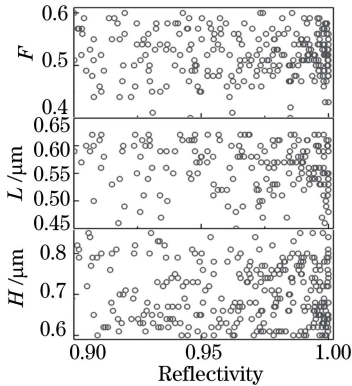


图 3 局部最大反射率最大时,占空比、周期、硅脊厚度与反射率的关系

Fig. 3 Duty cycle, period, and thickness of Si as functions of reflectivity when local reflectivity is the maximum value

特性,对后续与 VCSEL 的结合起到了积极作用。表 1 所示为 HCG 参数的优化区间,从中选择调制强度最强、衍射效果最优的光栅参数,可以得到图 4 所示的 HCG 反射率变化曲线。根据等效介质理论,当光经过亚波长光栅时,TE 和 TM 偏振光会有不同的等效折射率,表现为双折射效应。然而,在 TE 或 TM 偏振光入射情况下,都可以进行参数优化,得到大于 99% 的高反射率。

表 1 HCG 各参数的优化区间

Table 1 Optimization range of each parameter of HCG

Incident light	Parameter	Optimization range / $\mu\text{m}$
TE	Si grating thickness	0.65–0.8
TE	Grating period	0.5–0.6
TE	Duty cycle	0.45–0.55
TM	Si grating thickness	0.35–0.38
TM	Grating period	0.48–0.52
TM	Duty cycle	0.42–0.52

### 3 分析与讨论

对于 TE 偏振,最佳的高对比光栅参数如下:硅脊厚度为 0.7  $\mu\text{m}$ ,占空比为 0.51,周期为 0.58  $\mu\text{m}$ ,可以得到反射率大于 99% ( $\Delta\lambda \approx 119 \text{ nm}$ ) 的宽带高反射结构。对于 TM 偏振,最佳的高对比光栅参数如下:硅脊厚度为 0.36  $\mu\text{m}$ ,占空比为 0.49,周期为

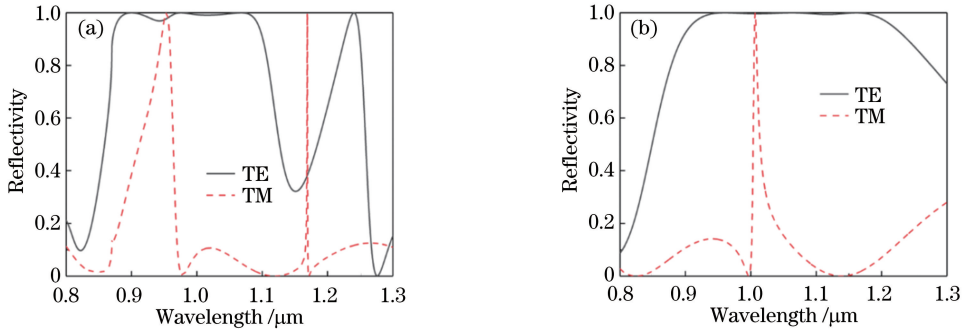


图4 入射光为 TE、TM 光时 HCG 的反射率图。(a) TE 光;(a) TM 光

Fig. 4 Reflectivity spectra of HCG with TM and TE polarized incident light. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light

0.49  $\mu\text{m}$ , 可以得到反射率大于 99% ( $\Delta\lambda \approx 256 \text{ nm}$ ) 的宽带高反射结构。大于 99% 的宽带高反射率证明该 HCG 可以替代 VCSEL 中的 DBR, 其中硅脊厚度的优化区间为 0.65~0.8  $\mu\text{m}$ , 液晶厚度灵活, 可以根据激光器的需求而改变, 整体厚度远小于 DBR 和介质膜反射镜, 从而减小了外延生长的难度。大的制造公差可以使 HCG-VCSEL 非常适合用于低成本制造和波分复用系统, 同时可以解决多层 DBR 引起的串联电阻高和吸收损耗大等问题。由图 4 可知, 当 TE、TM 偏振光入射时, 光栅具有偏振选择性, 即对一种偏振光表现为高反射率的同时抑制另一种偏振光。因此, 液晶与 VCSEL 的结合可以改善 VCSEL 偏振模式跳变等问题, 使输出光更稳定。

本文选用 E7 型液晶, 假设液晶分子的偏转角均匀分布, 施加电压后, 液晶的电光效应会导致光栅的等效折射率发生变化。以液晶的折射率变化 0.01 为步长, 模拟光栅的反射率变化, 反射率随波长、液晶折射率变化  $\Delta n$  的分布情况如图 5 所示。液晶折射率变化  $\Delta n$  对反射率的影响较小, 对液晶层施加电压过程中不影响该光栅的反射能力。

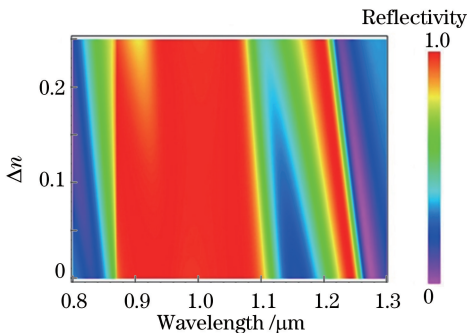


图5 反射率随 HCG 液晶折射率变化值  $\Delta n$ 、波长的变化  
Fig. 5 Reflectivity as a function of changes in reflective index of liquid crystal in HCG and wavelength

## 4 结 论

本文采用严格耦合波理论仿真了一种基于液晶可调谐 VCSEL 的 Si-SiO<sub>2</sub> 高对比光栅上的反射镜结构, 该结构具有偏振稳定性即宽带高反射率 ( $R > 99\%$ ) 的特点。当 TE 偏振光入射时, 反射率大于 99% 的带宽可达到 119 nm; 当 TM 偏振光入射时, 反射率大于 99% 的带宽可达到 256 nm。对于 TM 偏振光, 最佳的高对比光栅参数如下: 硅脊厚度为 0.36  $\mu\text{m}$ , 占空比为 0.49, 周期为 0.49  $\mu\text{m}$ , 此条件下光栅局部的最大反射率接近 1, 且光栅对一种偏振光表现高反射率的同时能抑制另一种偏振光, 即表现为偏振选择性。因此, 结合该光栅与 VCSEL 可以改善 VCSEL 偏振模式跳变等问题, 使输出光更稳定, 而且光栅厚度不超过 1  $\mu\text{m}$ , 整体厚度远小于 DBR 和介质膜反射镜, 更易与 VCSEL 单片集成, 适合应用于低成本制造和波分复用系统, 同时可以解决多层 DBR 引起的串联电阻高和吸收损耗大等问题。施加电压后的液晶折射率改变并不影响光栅的性能, 即使是低折射率材料的折射率发生变化时, 只要满足折射率之间的高对比度, 就可表现出高反射率。对液晶折射率变化  $\Delta n$  的模拟结果表明, 该光栅适用于液晶可调谐激光器, 尤其是与液晶可调谐 VCSEL 结合时, 可以替代传统的 DBR 结构, 推进了液晶可调谐 VCSEL 的实用化进程。

## 参 考 文 献

- [1] Rodes R, Jensen J B, Zibar D, et al. All-VCSEL based digital coherent detection link for multi Gbit/s WDM passive optical networks [J]. Optics Express, 2010, 18(24): 24969-24974.
- [2] Al-Samaneh A, Sanayeh M B, Renz S, et al. Polarization control and dynamic properties of VCSELs for MEMS atomic clock applications [J].

- IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1049-1051.
- [3] Hofmann W, Amann M C. Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers for high-speed applications and gas sensing [J]. IET Optoelectronics, 2008, 2(3): 134-142.
- [4] Chang-Hasnain C J, Yang W J. High-contrast gratings for integrated optoelectronics[J]. Advances in Optics and Photonics, 2012, 4(3): 379-440.
- [5] Sahoo H K, Ansbæk T, Ottaviano L, et al. Wavelength tunable MEMS VCSELs for OCT imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10552: 105520I.
- [6] Chang-Hasnain C J. Tunable VCSEL [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 978-987.
- [7] Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y, et al. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 518-520.
- [8] Paul S, Haidar M T, Cesar J, et al. Far-field, linewidth and thermal characteristics of a high-speed 1550-nm MEMS tunable VCSEL [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13142-13156.
- [9] Wu M S, Vail E C, Li G S, et al. Tunable micromachined vertical cavity surface emitting laser [J]. Electronics Letters, 1995, 31(19): 1671-1672.
- [10] Halbritter H, Sydlo C, Kogel B, et al. Impact of micromechanics on the linewidth and chirp performance of MEMS-VCSELs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(2): 367-373.
- [11] Xie Y, Beeckman J, Woestenborghs W, et al. VCSEL with photo-aligned liquid crystal overlay[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1509-1512.
- [12] Xie Y, Beeckman J, Panajotov K, et al. Vertical-cavity surface-emitting laser with a liquid crystal external cavity[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6494-6497.
- [13] Frasnukiewicz L, Czyszanowski T, Thienpont H, et al. Polarization- and modal-control in a vertical-cavity surface-emitting laser with an external-cavity formed by a liquid crystal overlay[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(23): 5437-5443.
- [14] Belmonte C, Frasnukiewicz L, Czyszanowski T, et al. Optimization of electrically tunable VCSEL with intracavity nematic liquid crystal[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15706-15715.
- [15] Frasnukiewicz L, Czyszanowski T, Thienpont H, et al. Electrically tunable VCSEL with intra-cavity liquid crystal: design, optimization, and analysis of polarization- and mode-stability [J]. Optics Communications, 2018, 427: 271-277.
- [16] Wang N, Li G H, Yun M J. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(12): 1064-1066.  
王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1064-1066.
- [17] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 119-122.
- [18] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A nanoelectromechanical tunable laser [J]. Nature Photonics, 2008, 2(3): 180-184.
- [19] Chung I S. Study on differences between high contrast grating reflectors for TM and TE polarizations and their impact on VCSEL designs[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 16730-16739.
- [20] Jiang X W. Polarization-independent wavelength-tunable vertical cavity surface emitting laser based on two-dimensional grating [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0623003.  
江孝伟. 基于二维光栅的偏振无关波长可调谐垂直腔面发射激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0623003.
- [21] Tian K, Zou Y G, Jiang X W, et al. Wavelength tuning range of inter cavity subwavelength grating MEMS VCSELs [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0701009.  
田锟, 邹永刚, 江孝伟, 等. 内腔亚波长光栅 MEMS VCSELs 的波长调谐范围[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701009.
- [22] Taghizadeh A, Park G C, Mørk J, et al. Hybrid grating reflector with high reflectivity and broad bandwidth [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21175-21184.
- [23] Czyszanowski T, Gebiski M, Dems M, et al. Subwavelength grating as both emission mirror and electrical contact for VCSELs in any material system [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40348.
- [24] Moharam M G, Gaylord T K. Coupled-wave analysis of reflection gratings[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 240-244.

- [25] Khoo I C. Liquid crystals [M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 1-12. Lasers, 2019, 46(4): 0401001.  
刘丽娟, 孔晓波, 刘彦庆, 等. 大范围可调谐液晶/
- [26] Liu L J, Kong X B, Liu Y Q, et al. Broadband tunable organic semiconductor laser based on liquid crystal/polymer grating [J]. Chinese Journal of 聚合物光栅有机半导体激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0401001.