

亚波长光栅对微机电系统波长可调谐垂直腔面发射激光器的影响

江孝伟^{1,2}

¹衢州职业技术学院信息工程学院, 浙江 衢州 324000

²北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124

摘要 将增透亚波长光栅分别置于微机电系统 (MEMS) 波长可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的内腔、上分立布拉格反射器 (DBR) 的上表面和下表面, 分析了其对器件波长调谐范围、驻波场和谐振腔波长的影响。通过建模计算可知, 当亚波长光栅置于 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的内腔中时, 波长调谐量最大, 可达 54 nm; 光栅置于上 DBR 的上表面和下表面时, 波长调谐量仅能达到 40 nm 和 33 nm。通过分析驻波场可以发现, 当亚波长光栅置于上 DBR 的上表面时, 有源区能量占总能量的 0.36%, 而置于上 DBR 的下表面和内腔时分别为 0.08% 和 0.02%。比较三种结构的谐振腔波长可以发现, 对于光栅在内腔和上 DBR 的下表面时, 横电 (TE) 和横磁 (TM) 偏振对应的谐振腔波长分别出现了 8.3 nm 和 10.1 nm 的分离, 而光栅放置在上 DBR 的上表面时两个偏振波长并没有偏离, 由此可知, 光栅在内腔和上 DBR 的下表面实现偏振稳定原理与光栅在上 DBR 的上表面时是不同的。

关键词 光栅; 微机电系统; 垂直腔面发射激光器; 谐振腔波长

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.120501

Influence of Sub-Wavelength Grating on Micro-Electro-Mechanical System Wavelength Tunable Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Jiang Xiaowei^{1,2}

¹ College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China

² College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The anti-reflection sub-wavelength gratings are placed at the inner cavity of the micro-electro-mechanical system (MEMS) wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), top surface and bottom surface of the top distributed Bragg reflectors (DBR), respectively. The effects of the positions on the wavelength tuning range, the standing wave field and the resonant cavity wavelength are analyzed. The simulation results demonstrate that when the sub-wavelength grating is placed in the inner cavity of the MEMS wavelength tunable VCSEL, the largest wavelength tuning range can be achieved, which can reach 54 nm, while the largest wavelength tuning ranges for the other two structures are 40 nm and 33 nm, respectively. It is known by analysis of the standing wave field that the active region energy is 0.36% of the total energy when the sub-wavelength grating is set on the top surface of the top DBR, while it is 0.08% and 0.02% when the sub-wavelength gratings are set in the inner cavity and on the bottom surface of the top DBR. In addition, the resonant cavity wavelength with the corresponding to the transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations appears the separation of 8.3 nm and 10.1 nm when the sub-wavelength gratings are put in the inner cavity and on the bottom surface of the top DBR, while it has not separation for the top surface of the top DBR. Thus, the polarization stable principles of the three structures are different.

Key words gratings; micro-electro-mechanical system; vertical cavity surface emitting lasers; resonant cavity wavelength

OCIS codes 050.2770; 050.1950; 140.7260; 140.3600

收稿日期: 2016-08-19; 收到修改稿日期: 2016-08-26; 网络出版日期: 2016-11-15

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ150998)

作者简介: 江孝伟 (1991—), 男, 硕士, 助教, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

1 引言

自 1977 年日本学者伊贺健一首次提出垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 以来, VCSEL 由于具有阈值小、易于与光纤耦合、体积小、高相干度阵列集成等特点, 受到了广泛的关注与应用^[1-5]。与传统边发射激光器相比, 其无需解理封装即可直接在片测试分析, 大大降低了制造成本。

VCSEL 具有圆柱形对称波导结构并且有源区各向异性较弱, 这会导致其偏振不稳定从而经常出现跳变, 因此, 很多学者提出通过亚波长光栅在 VCSEL 中引入各向异性来提高偏振的稳定性^[6]。Davani 等^[7]通过将亚波长光栅置于微机电系统 (MEMS) 波长可调谐 VCSEL 的上分立布拉格反射器 (DBR) 的上表面, 成功实现了 25 nm 单偏振波长的调谐, 而 Gründl 等^[8]将亚波长光栅置于 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的内腔当中, 实现了 12 nm 单偏振波长的调谐。由此可见, 利用亚波长光栅提高 VCSEL 的偏振稳定性的方法是有效的, 但是当将亚波长光栅放置于 MEMS 波长可调谐 VCSEL 中, 其对器件的波长调谐范围、驻波场、谐振腔波长等的影响却鲜有研究, 这对于实际应用中满足偏振稳定的同时还需满足其他要求的情况具有很大的参考价值。

为此, 通过物理建模, 理论分析了亚波长光栅置于 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的不同位置时对器件性能的影响, 结果表明, 不同光栅位置对器件的波长调谐范围、驻波场和谐振腔波长有显著的影响。

2 器件结构

图 1 为中心波长为 850 nm 的 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的示意图。在 GaAs 衬底交替生长 34.5 对 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, 构成下 n-DBR (n 型掺杂) 反射镜, 每层厚度为 $\lambda/4$; 光学厚度为 λ 的半导体谐振腔包括: 在 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 上下限制层中间生长三个 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱 (MQW), 其中阱层和垒层的厚度分别为 7.2 nm 和 8 nm, 上面是 30 nm 的高 Al 组分氧化限制层和 2.5 对 p-DBR (p 型掺杂), 紧接着是空气隙, 最上方的上 p-DBR 结构是在 GaAs 衬底上生长 16.5 对厚度为 $\lambda/4$ 的 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层^[9]。图 2 为亚波长光栅一维 (1D) 结构, 即假设光栅在 y 轴方向无限长, 光栅是在介质或者金属上刻蚀而成的具有周期性空间结构的光学器件, 而亚波长光栅是一种周期小于入射波长的光栅, 其特点是光波入射到光栅上时仅产生零级衍射波, 因此可以避免高级衍射的损耗^[10-11]。图 2 中区域三为光栅衬底, 材料为 GaAs; 区域二对应的光栅区域是在 GaAs 衬底上刻蚀而成的, h 为光栅厚度, Λ 为光栅周期, a 为光栅条宽, 则光栅占空比为 $\eta = a/\Lambda$; 区域一是低折射率材料, 一般是空气。

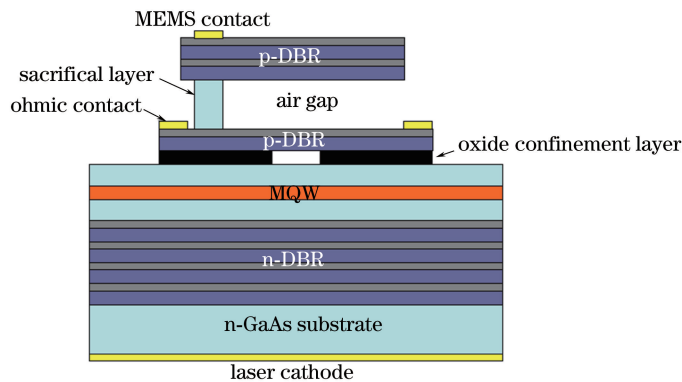


图 1 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的结构图

Fig. 1 Schematic of the MEMS wavelength tunable VCSEL

图 3 是将亚波长光栅置于三个不同位置时的 MEMS 波长可调谐 VCSEL: 第一种是将亚波长光栅置于内腔 (ISWG), 第二种是将亚波长光栅置于上 DBR 的下表面 (TIWG), 第三种是将亚波长光栅置于上 DBR 的上表面 (SSWG)。这三种结构除了亚波长光栅位置不同外, 其他结构参数都与图 1 所示的 MEMS 波长可调谐 VCSEL 相同。

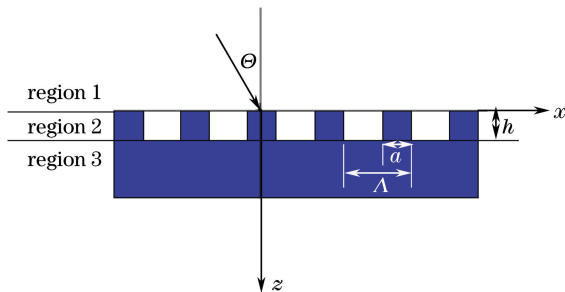


图 2 光栅 1D 结构示意图

Fig. 2 1D schematic of the grating

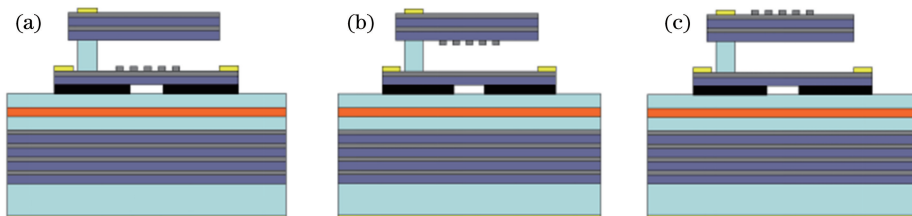


图 3 三种 MEMS 波长可调谐 VCSEL。(a)亚波长光栅置于内腔；(b)亚波长光栅置于上 DBR 的下表面；
(c)亚波长光栅置于上 DBR 的上表面

Fig. 3 Three kinds of MEMS wavelength tunable VCSELs. (a) ISWG-VCSEL; (b) TIWG-VCSEL; (c) SSWG-VCSEL

3 亚波长光栅对器件性能的影响分析

3.1 有无内腔亚波长光栅对器件波长调谐范围的影响

图 4 为将亚波长光栅置于 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的内腔[如图 3(a)所示]和普通 MEMS 波长可调谐 VCSEL(如图 1 所示)时对应的波长调谐范围,此处只针对横电(TE)偏振的情况进行了研究。选取了一组并未优化的增透亚波长光栅作为实验组,厚度为 80 nm,占空比为 0.5,周期为 200 nm。从图中可见,在相同的空气隙变化范围内,有亚波长光栅的可调谐 VCSEL 的波长调谐范围与普通可调谐 VCSEL 相比有明显的优势,在 300 nm 的空气隙变化范围内,有亚波长光栅的可调谐 VCSEL 的波长调谐范围可以达到 54 nm (TE 偏振),而普通的可调谐 VCSEL 的波长调谐范围仅为 40 nm。因此,内腔放置亚波长光栅与内腔放置增透膜的可调谐 VCSEL 一样,均可实现波长调谐范围的提高^[9]。

$$\frac{4\pi}{\lambda} \underbrace{\left(n_1 L_{\text{top}} + \sum_{i=1}^N n_i d_i + n_N L_{\text{bot}} \right)}_{D_{\text{eff}}} + \theta_{\text{top}} + \theta_{\text{bot}} = 2\pi m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

(1)式是由驻波条件 $2nL = m\lambda$ 扩展而得,其中 n 和 L 分别是 VCSEL 的等效折射率和有效腔长, m 为整数,

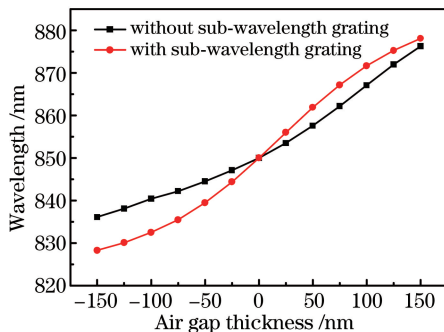


图 4 不同空气隙厚度下有无内腔亚波长光栅的可调谐 VCSEL 的波长调谐范围

Fig. 4 Wavelength tuning ranges of the tunable VCSEL with or without sub-wavelength grating at different air gap thicknesses

θ_{top} 和 θ_{bot} 分别为上下表面反射率的色散-反射相位, n_i 和 d_i 分别为谐振腔有源区每一层的折射率和厚度, L_{top} 和 L_{bot} 分别为上下 DBR 的有效腔长^[12], D_{eff} 为有效腔长。普通的 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的调谐范围小主要是因为空气隙是上反射镜的一部分。由(1)式可知, 当改变空气隙时, 其实是在改变 θ_{top} , 但 θ_{top} 变化量很小, 导致其调谐效率不高, 因此波长调谐范围被限制。

当在下面的 p-DBR 与空气隙交界处添加一层增透亚波长光栅后, 即可使可调谐 VCSEL 的空气隙变为谐振腔的一部分, 形成扩展腔, 腔方程为

$$\frac{4\pi}{\lambda} \underbrace{(n_1 L_{\text{top}} + \sum_{i=1}^N n_i d_i + n_N L_{\text{bot}} + L_{\text{airgap}})}_{D_{\text{eff}}} + \theta_{\text{top}} + \theta_{\text{bot}} = 2\pi m, \quad (2)$$

式中 L_{airgap} 为空气隙对应的腔长。改变空气隙即相当于改变了 D_{eff} , 这使得波长的变化幅度增大, 从而提高了调谐效率, 出现了图 4 的结果, 即内腔有增透亚波长光栅的 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的波长调谐范围比普通可调谐 VCSEL 的波长调谐范围更大。

3.2 不同亚波长光栅位置对器件波长调谐范围的影响

图 5 是对应图 3 所示的三种不同结构的波长可调谐 VCSEL 的调谐范围, 增透亚波长光栅的占空比为 0.5, 周期为 200 nm, 厚度为 80 nm。在三种结构都实现 850 nm 的波长输出时, 空气隙厚度的变化范围为 ± 150 nm。结果可见, 在相同的空气隙变化范围内, ISWG-VCSEL 的波长调谐范围最大可达 54 nm (均是 TE 偏振), SSWG-VCSEL 的波长调谐范围为 40 nm, 而 TIWG-VCSEL 的波长调谐范围仅为 33 nm。这种结果表明, 亚波长光栅虽然具有增透作用, 但是要想增大波长的调谐范围则必须考虑其所在的位置, 而通过模拟计算对比可知, 只有将亚波长光栅置于内腔才能提高波长的调谐范围。

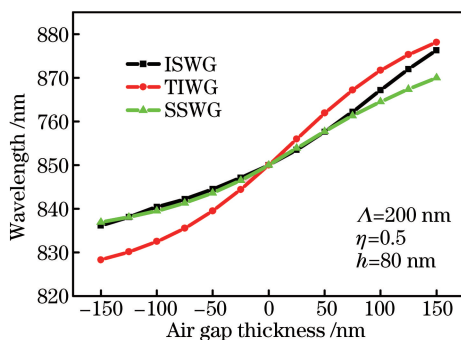


图 5 不同空气隙厚度下三种波长可调谐 VCSEL 的波长调谐范围

Fig. 5 Wavelength tuning ranges for three kinds of tunable VCSELs at different air gap thicknesses

ISWG-VCSEL 的波长调谐范围在相同的空气隙变化范围内比另外两种结构大, 是因为其内腔的亚波长光栅使空气隙变为谐振腔的一部分, 从而相当于扩大了腔长。而 TIWG-VCSEL 和 SSWG-VCSEL 所在的亚波长光栅位置并不能使腔长扩大, 所以改变这两种结构的空气隙相当于改变上反射镜的色散-反射相位, 而根据(1)式可知, 改变上反射镜的色散-反射相位并不能明显地增大波长的调谐范围。对于 ISWG-VCSEL, 调谐效率为

$$\frac{\partial \lambda}{\partial d_{\text{air}}} = \frac{\lambda}{D_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中 d_{air} 为空气隙厚度。而 TIWG-VCSEL 和 SSWG-VCSEL 的调谐效率为

$$\frac{\partial \lambda}{\partial d_{\text{air}}} = \frac{\lambda}{D_{\text{eff}}} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\partial \phi_{\text{top-DBR}}}{\partial d_{\text{air}}} \right), \quad (4)$$

式中 $\phi_{\text{top-DBR}}$ 为上反射镜的有效反射相位。对比(3)、(4)式可以发现, 在相同条件下 TIWG-VCSEL 和 SSWG-VCSEL 的调谐效率小于 ISWG-VCSEL 的调谐效率。

3.3 不同亚波长光栅位置对器件波长驻波场的影响

图 6 为对应图 3 所示三种不同结构的波长可调谐 VCSEL 的驻波场分布, 空气隙厚度为 1062 nm, 光栅周期为 200 nm, 占空比为 0.5, 厚度为 80 nm。横坐标为器件的厚度, 左纵坐标为归一化折射率, 右纵坐标为归一化

光场强度。这里研究的是 TE 偏振时的情况,而对于横磁(TM)偏振,情况是类似的。对于 ISWG-VCSEL 结构,计算可得,归一化后空气隙中的光场强度占有所有光场强度的 47%,而对于 TIWG-VCSEL 和 SSWG-VCSEL,其空气隙归一化后的光场能量占各自光场总能量的 50%和 44%。通过对比三种结构的驻波场分布图,可以发现,在有源区范围内,SSWG-VCSEL 的光场能量最高,占总能量的 0.36%,所以对于该结构,其阈值增益较低。而对于 TIWG-VCSEL 结构,其有源区范围内的光场能量占比为 0.08%,低于 SSWG-VCSEL 但高于 ISWG-VCSEL (占比为 0.02%),所以其所需的阈值增益高于 SSWG-VCSEL 但低于 ISWG-VCSEL。

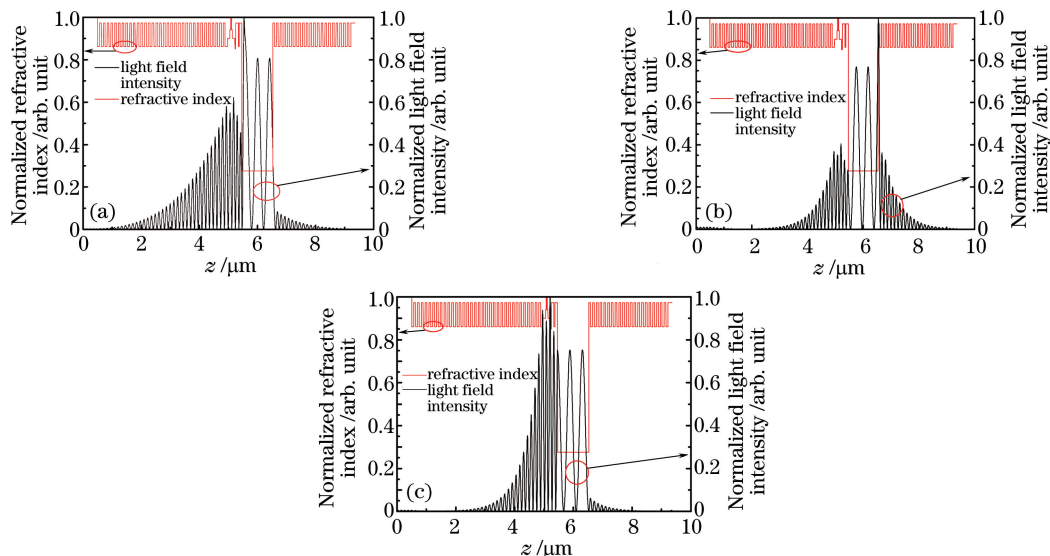


图 6 三种可调谐 VCSEL 的驻波场分布。(a) ISWG; (b) TIWG; (c) SSWG

Fig. 6 Standing wave field distributions of three kinds of tunable VCSELs. (a) ISWG; (b) TIWG; (c) SSWG

3.4 不同亚波长光栅位置对激光波长的影响

图 7 是对应于图 3 所示三种可调谐 VCSEL 在同一空气隙和同一光栅条件下 TE 和 TM 偏振光的谐振腔波长,图中设空气隙的厚度为 850 nm,光栅周期为 200 nm,占空比为 0.5,厚度为 80 nm。从图 7 中可以看到,对于 TIWG 和 ISWG 两种结构,其 TE 和 TM 偏振光谐振腔波长出现了分离,这是因为亚波长光栅对于 TE 和 TM 偏振光有不同的折射率,导致对两个偏振的有效腔长不同,进而引起两个偏振光的谐振波长不同。而因为 SSWG 的亚波长光栅在上 DBR 的上表面,所以亚波长光栅对 TE 和 TM 偏振的折射率不同反映在它们的反射率不同,而不会导致 TE 和 TM 偏振有效腔长的不同,因此 SSWG-VCSEL 的 TE 和 TM 偏振的谐振腔波长相同。在同一空气隙下,TIWG-VCSEL 的 TE 和 TM 偏振光谐振波长分离 10.1 nm,而 ISWG-VCSEL 的 TE 和 TM 偏振光谐振波长偏离了 8.3 nm。除此之外,TIWG-VCSEL 和 ISWG-VCSEL 实现偏振控制和 SSWG-VCSEL 实现偏振控制的原理是不同的,SSWG-VCSEL 实现偏振控制是因为 TE 和 TM 偏振谐振波长对应的反射率不同从而导致它们阈值增益不同,而 TIWG-VCSEL 和 ISWG-VCSEL 是因为 TE 和 TM 对应的有效腔长不同和它们谐振波长对应的反射率不同共同引起它们阈值增益的不同。表 1

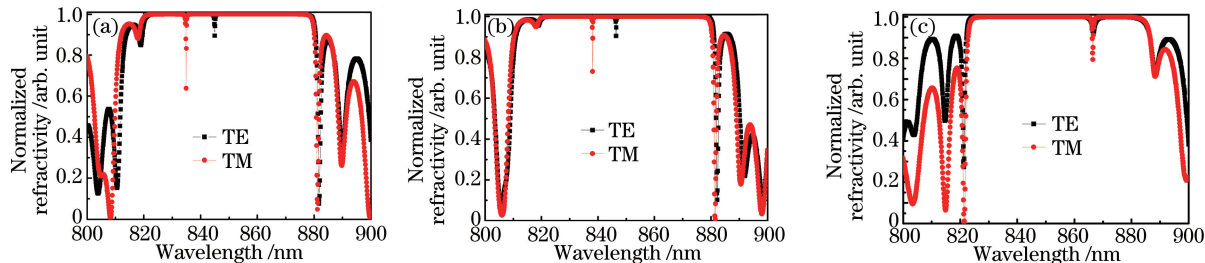


图 7 不同位置的亚波长光栅对不同结构可调谐 VCSEL 的谐振腔波长的影响。(a) ISWG; (b) TIWG; (c) SSWG

Fig. 7 Influence of different sub-wavelength positions on resonant cavity wavelength for three kinds of tunable VCSELs. (a) ISWG; (b) TIWG; (c) SSWG

总结了亚波长光栅在不同位置时对波长可调谐 VCSEL 的影响。

表 1 不同亚波长光栅位置对波长可调谐 VCSEL 性能的影响

Table 1 Influence of the sub-wavelength grating at different positions on wavelength tunable VCSEL performance

Structure	Tuning range /nm	Active region energy of total energy /%	TE and TM wavelength separation /nm
ISWG	54	0.02	8.3
TIWG	33	0.08	10.1
SSWG	40	0.36	0

4 结 论

通过研究亚波长光栅在 MEMS 波长可调谐 VCSEL 的不同位置时对器件性能影响可知,光栅在不同位置时,器件的调谐范围、阈值增益、驻波场及谐振腔波长都有明显的区别。在调谐范围方面,将增透亚波长光栅置于器件内腔中可使调谐范围达到最大;而为了使阈值电流最小,则必须将光栅置于器件上 DBR 的表面,由此可见,将亚波长光栅置于器件上 DBR 的表面在调谐范围和阈值增益上均没有明显的优势。最后分析谐振腔波长可以得出,将光栅置于内腔和上 DBR 的下表面时 TE 和 TM 偏振会使它们对应的谐振腔波长分离,而对于光栅置于上 DBR 的上表面的 MEMS 波长可调谐 VCSEL,其偏振谐振腔波长不会分离,由此可以知道其实现偏振稳定的机理是不同的。

参 考 文 献

- Iga Kenichi, Koyama Fumio. Fundamentals and applications of surface emitting lasers[M]. Zheng Jun, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 37-38.
伊贺健一, 小山二三夫. 面发射激光器基础与应用[M]. 郑 军, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 37-38.
- Tian Kun, Zou Yonggang, Jiang Xiaowei, *et al.* Wavelength tuning range of inter cavity subwavelength grating MEMS VCSELs[J]. Chinese J 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.
- Hadley G R. Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Optics Letters, 1995, 20(13): 1483-1485.
- Wang Hongying, Cheng Zhen, Zhao Xiaoxia, *et al.* Polarization controlling of vertical cavity surface emitting laser with cholesteric liquid crystal overlay[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 111402.
王红英, 成 楨, 赵小侠, 等. 表面涂覆胆固醇液晶-垂直腔面发射激光器的偏振特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 111402.
- Li Zhifeng, Wang Hongjie, Wang Wenrui, *et al.* Upconversion by vertical cavity surface emitting laser injection locking [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206001.
李知峰, 王红杰, 王文睿, 等. 利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206001.
- Li Shuo, Guan Baolu, Shi Guozhu, *et al.* Polarization stable vertical-cavity surface-emitting laser with surface sub-wavelength gratings[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18):184208.
李 硕, 关宝璐, 史国柱, 等. 亚波长光栅调制的偏振稳定垂直腔面发射激光器研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 184208.
- Davani H A, Kögel B, Debernardi P, *et al.* Polarization investigation of a tunable high-speed short-wavelength bulk-micromachined MEMS-VCSEL[C]. SPIE, 2012, 82760: 82760T.
- Gründl T, Zogal K, Debernardi P, *et al.* Continuously tunable, polarization stable SWG MEMS VCSELs at 1.55 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 841-843.
- Guan Baolu, Liu Xin, Jiang Xiaowei, *et al.* Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 164203.
关宝璐, 刘 欣, 江孝伟, 等. 多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 164203.
- Li Xiushan, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.* Influence of grating parameters on reflectivity of Si/SiO₂ high contrast gratings[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(7): 806-810.

- 李秀山, 宁永强, 张 星, 等. Si/SiO₂ 高对比光栅参数对反射率的影响[J]. 发光学报, 2015, 36(7): 806-810.
- 11 Zhang Xi. Research on sub-wavelength gratings and its applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 15-18.
- 张 曦. 亚波长光栅及其应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 15-18.
- 12 Chung I S, Mørk J, Sirbu A, *et al.* 80-nm-tunable high-index-contrast subwavelength grating long-wavelength VCSEL: proposal and numerical simulations[C]. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7615: 76150K.