

内腔亚波长光栅 MEMS VCSELs 的波长调谐范围

田 镨^{1,2} 邹永刚¹ 江孝伟² 海一娜¹ 刘 储² 关宝璐² 马晓辉¹

¹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

²北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 微机电系统(MEMS)垂直腔面发射激光器(VCSELs)是一种特殊光源,具有低功耗、高调制速率、宽波长调谐范围、易耦合等优点,被广泛应用于激光通信领域。为提升激光器工作性能,如扩大波长调谐范围、提高偏振对比度等,需要优化内腔亚波长光栅结构参数来改善腔内光场分布以及偏振输出模式。基于等效介质理论(EMT),并结合薄膜理论设计了针对调谐范围中心波长为850 nm、GaAs 材料的亚波长光栅的较优周期、占空比、脊高的取值。分析了横电(TE)、横磁(TM)光,占空比与脊高对光栅透射率的影响。另外,通过系统模拟,对比了未刻蚀光栅、光栅未优化及光栅优化后的激光器波长调谐范围,结果表明:针对特定波长调谐范围及光栅材料,通过优化光栅参数可实现光栅对 TE 或 TM 光的增透,增强半导体腔和空气隙之间光场的耦合,进而扩大激光器的波长调谐范围。

关键词 激光器;可调谐半导体激光器;亚波长光栅;等效介质理论;透射率;波长调谐范围

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701009

Wavelength Tuning Range of Inter Cavity Subwavelength Grating MEMS VCSELs

Tian Kun^{1,2} Zou Yonggang¹ Jiang Xiaowei² Hai Yina¹ Liu Chu² Guan Baolu² Ma Xiaohui¹

¹State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract As a type of special light source, microelectronic mechanical system (MEMS) vertical cavity surface emitting laser (VCSELs) has the advantages such as low power consumption, high modulation speed, broad wavelength tuning range and easy coupling, which has been widely applied in the field of laser communication. To achieve better performance of the lasers, such as enlarging wavelength tuning range and increasing polarization contrast, optimizing the structure parameters of inter cavity subwavelength grating is indispensable to improve the distribution of optical field and polarization output mode. In this paper, based on effective medium theory (EMT), the optimal values of period, duty cycle and ridge height of subwavelength grating are designed combining with the theory of film (the center wavelength of tunable range is 850 nm and the grating material is GaAs). The impact of grating duty cycle, ridge height on the transmission efficiency for TE and TM are analyzed. Furthermore, the tuning ranges of MEMS VCSELs with no-etched grating, unoptimized grating and optimized grating are compared. The results indicate that, for the specific wavelength tuning range and grating material, optimization of the grating parameters can promote the increase of the grating transmission efficiency for TE or TM mode, enhance the coupling of optical field between the semiconductor cavity and air gap, thus enlarge the wavelength tuning range of the laser.

收稿日期: 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(60908012,61575008)、吉林省科技计划重点项目(201502040689x)

作者简介: 田 镨(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: springwulitk@sina.cn

导师简介: 邹永刚(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光电子技术及其应用等方面的研究。

E-mail: zouyg@cust.edu.cn(通信联系人)

Key words lasers; tunable semiconductor lasers; subwavelength grating; effective medium theory; transmission efficiency; wavelength tuning range

OCIS codes 140.7260; 140.7270; 140.2020; 050.1950

1 引 言

垂直腔面发射激光器^[1-5](VCSELs)自首次被提出至今已有 30 多年,其由于垂直衬底出光、可在片测试、低阈值电流、单纵模工作、低发散角、圆形输出光斑易耦合、易集成等优点被广泛应用。波长可调谐垂直腔半导体激光器兼具了以上所有优点及大波长调谐范围、高调制速率的独特优势,有望在光通信、光学陀螺仪、原子钟、光互联等领域中取代多频半导体激光器阵列。目前,开发研究具有高单横模偏振对比度、偏振稳定控制以及大范围波长可调的 VCSELs 已成为国际研究热点。

微机电系统(MEMS)VCSELs^[6-9]是可调谐激光器中的一种,其主要部分由下至上分别为:分布布拉格反射镜(DBR),半导体腔,中 p-DBR,空气隙和顶部 p-DBR,通过在半导体腔和 p-DBR 之间施加反向偏压实现上 DBR 的移动,空气腔厚度发生变化,导致有效腔长改变而实现波长调谐。其中,亚波长光栅层位于中 p-DBR 上面,空气填充,具有减反射、偏振双折射、低吸附性、大角度范围高透射率、高损伤阈值等优良特性,作为减反层有望应用于光学领域代替光学薄膜。

本文基于等效介质理论(EMT)和薄膜理论开展了对可调谐垂直腔激光器内亚波长光栅的优化设计。首先,对等效介质理论的零阶和二阶近似等效折射率进行了数值模拟。然后,结合薄膜理论,得出针对中心波长为 850 nm 的调谐波段、GaAs 材料的亚波长光栅的周期、占空比、脊高的最佳取值。其次,分析了对于横电(TE)、横磁(TM)光,光栅透射率随占空比以及调谐波长的变化,以及不同占空比时,光栅透射率随脊高的变化。最后,建立了 MEMS VCSELs 系统模型,并进行了模拟,对比了未刻蚀光栅、刻蚀光栅未优化及优化后输出 TE、TM 光的 MEMS VCSELs 的波长调谐范围,得出通过刻蚀和优化光栅可实现光栅对 TE 或 TM 光的增透,增强半导体腔和空气隙之间光场的耦合,进而扩大激光器的波长调谐范围。

2 基本原理

MEMS VCSELs 腔可等效为腔长可变的法布里-珀罗谐振腔。制备成型的器件具有三个电极:调谐电极、注入电极和衬底电极,通过调节调谐电极和注入电极间的电位差来调节空气厚度,即使得 MEMS DBR 在静电力作用下,向有源区移动,进而减小空气隙厚度和激光器谐振腔的有效腔长,使 TE、TM 偏振模式波长蓝移,实现波长调谐。如果想要得到较大的波长调谐范围,直接加大空气腔的厚度即可,但是随着空气厚度的增加,需要的调谐电压升高,同时因为有效腔长变长,使得模式间距变小,最终的调谐范围因为受到模式间距的影响而变小^[10],因此空气腔厚度的选取需要参考 VCSELs 整体系统的其他参数。

亚波长光栅位于空气隙下,作为减反层使得光在半导体腔和空气隙间的耦合增强,从而增强空气隙中的光场分布,增大激光器的调谐范围;亦用于分离 TE 和 TM 光波长,选出目标偏振模式的同时抑制另一模式,实现稳定的偏振控制及输出。另外,用作接触电极的中间 p-DBR 的对数亦会影响器件的调谐范围,因为 p-DBR 的对数影响了光进入空气层的多少和器件的物理腔长,适当减少 DBR 对数,有利于光透过其与亚波长光栅进入空气隙,提高器件调谐效率,扩大自由光谱范围。

2.1 亚波长光栅及一阶等效介质理论

半导体激光器中,刻蚀亚波长光栅的材料常选用 GaAs 或 $Al_xGa_{1-x}As$, 折射率为 n_g , 空气作填充介质,折射

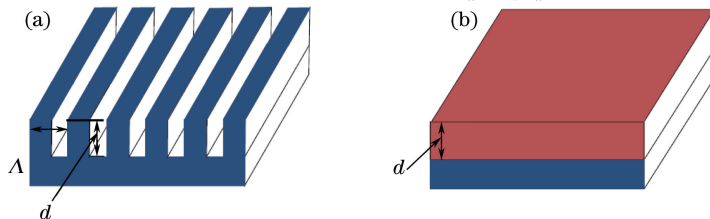


图 1 (a)亚波长光栅(周期为 Δ , 脊高为 d)及(b)等效薄膜

Fig. 1 (a) Subwavelength grating (period is Δ , ridge height is d) and (b) equivalent film

率为 n_i 。当光波(研究波长范围为 830~880 nm)正入射亚波长光栅时,发生衍射,仅有零阶反射和零阶透射。此时,亚波长光栅对于 TE、TM 光的折射率不同,分析时其可等效为一层各向异性的均匀薄膜,如图 1 所示。

研究人员已证明利用等效介质理论对亚波长光栅进行分析得到的结果与严格耦合波(RCWA)的偏差较小,并且得出可根据需要设计光栅结构,如占空比、脊高、周期等来获得 0~100%任意透射率^[11]。

当入射光波长远大于亚波长光栅周期时,选用零阶近似等效折射率公式对 TE 和 TM 模进行分析^[12-15], n_{eff} 分别为

$$n_{0,\text{TE}} = \sqrt{(1-f)n_i^2 + fn_g^2}, \quad (1)$$

$$n_{0,\text{TM}} = \frac{n_i n_g}{\sqrt{fn_i^2 + (1-f)n_g^2}}. \quad (2)$$

当入射光波长与亚波长光栅周期较为接近时,选用二阶近似等效折射率对 TE 和 TM 模进行分析, n_{eff} 分别为

$$n_{2,\text{TE}} = \sqrt{n_{0,\text{TE}}^2 + \frac{\pi^2}{3}f^2(1-f)^2(n_g^2 - n_i^2)\left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right)^2}, \quad (3)$$

$$n_{2,\text{TM}} = \sqrt{n_{0,\text{TM}}^2 + \frac{\pi^2}{3}f^2(1-f)^2\left(\frac{1}{n_g^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)^2 n_{0,\text{TM}}^2 n_{0,\text{TE}}^2 \left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right)^2}. \quad (4)$$

相应的光栅透射率为

$$T = 1 - \frac{(n_i - n_g)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_i n_g}{\eta} - \eta\right)^2 \sin^2 \delta}{(n_i + n_g)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_i n_g}{\eta} + \eta\right)^2 \sin^2 \delta}, \quad (5)$$

式中, $\delta = 2\pi d n_{\text{eff}} \cos \theta / \lambda$, TE 模 $\eta = n_{\text{eff}} \cos \theta$, TM 模 $\eta = n_{\text{eff}} / \cos \theta$, n_i, n_g 分别为光栅填充材料折射率与光栅材料折射率, $n_{0,\text{TE}}, n_{0,\text{TM}}$ 分别为 TE 模和 TM 模的零阶近似等效折射率, $n_{2,\text{TE}}, n_{2,\text{TM}}$ 分别为 TE 模和 TM 模的二阶近似等效介质折射率, Λ 为光栅周期, f 为光栅占空比, λ 为入射光波长, d 为光栅齿高, θ 为入射角, 为正入射, 取 $\pi/2$ 。由零阶及二阶等效折射率公式可知, 一维亚波长矩形光栅的等效折射率与基底材料、光栅周期和占空比有关, 反射率和透射率与齿高有关。等效介质理论计算光栅透射率比 RCWA 法简明, 且其依赖有效折射率的准确性^[16]。

2.2 薄膜理论

根据薄膜理论, 欲实现亚波长光栅的增透功能, 需等效膜层的折射率、厚度和光栅周期满足下式^[13,15]:

$$n_{\text{film}} = \sqrt{n_i n_g}, \quad (6)$$

$$d_{\text{film}} = \frac{\lambda}{4n_{\text{film}}}, \quad (7)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_i + n_g}, \quad (8)$$

式中, 等效折射率 $n_{\text{eff}} = n_{\text{film}}$, 等效膜层厚度即为光栅的齿高: $d = d_{\text{film}}$; Λ 为仅有零阶衍射光波的光栅周期的最大取值。

3 模拟及讨论分析

根据等效介质理论与薄膜理论, 建立光栅与 MEMS VCSELs 系统模型, 并分别进行模拟。讨论并分析光栅占空比对零阶、二阶近似等效折射率以及光栅透过率的影响、波长调谐过程中光栅透射率的变化以及光栅脊高对光栅透射率的影响, 并对比、分析分别具有未刻蚀光栅、未优化光栅和已优化光栅结构的 MEMS VCSELs 的波长调谐范围。

3.1 EMT 等效折射率数值模拟

半导体激光器中, 常选用 GaAs 或 $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ ($0 < x < 1$) 作为基底材料进行光栅刻蚀。下文选择 GaAs 基底的光栅进行数值模拟及讨论分析。基于等效介质理论可得到, 零阶与二阶近似等效折射率条件下, 光栅对于

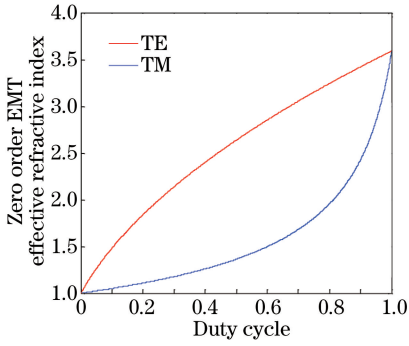


图 2 零阶近似等效折射率与光栅占空比关系

Fig. 2 Relationship between zero order effective refractive index and grating duty cycle

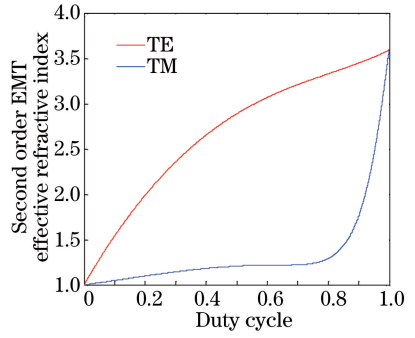


图 3 二阶近似等效折射率与光栅占空比关系

Fig. 3 Relationship between second order effective refractive index and grating duty cycle

TE 和 TM 偏振光折射率随占空比的变化情况如图 2 和图 3 所示。

由图 2、图 3 可知：1) 当 f 分别取 0 和 1 时, n_{eff} 分别为 n_i 和 n_g , 且对于 TE、TM 偏振光, 光栅等效折射率是不同的 ($n_{\text{TE}} > n_{\text{TM}}$); 2) 随着光栅占空比的增大, TE 偏振光的零阶与二阶近似等效折射率较接近, 而 TM 偏振光的零阶与二阶近似等效折射率相差较大; 3) 当 f 为 0.7 时, 零阶与二阶近似等效折射率中对于 TE 和 TM 模的折射率差均取最大值, 相对于零阶, 二阶近似等效折射率公式表示出光栅更强的各向异性。

3.2 亚波长光栅透射率数值模拟

由(6)~(8)式可知, 光栅实现增透时各结构参数的取值

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_i n_g} = \sqrt{3.59} \approx 1.89473, \quad (9)$$

$$d = \frac{\lambda}{4n_{\text{eff}}} \approx 112.15321 \text{ nm}, \quad (10)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{n_i + n_g} \approx 185.18519 \text{ nm}. \quad (11)$$

同时基于等效介质理论零阶近似折射率可得对于 TE、TM 偏振光实现最大光栅透射率时, 光栅占空分别为 $f=0.21785$ 和 0.78044 。当 TE 和 TM 偏振光垂直入射周期为 185 nm、脊高为 112 nm 的亚波长光栅时, 零阶和二阶近似等效折射率下, 亚波长光栅透射率随其占空比与调谐波长的变化如图 4~图 9 所示。

由图 4~9 可知:

1) 无论对于 TM 或 TE 光, 当占空比偏离最优占空比时, 光栅透射率迅速下降。

2) 光栅透射率取最大值时, 对于 TE 偏振光, 占空比分别为 $f \approx 0.22$ 和 0.18, 具有一定的差异性, 但与理论计算值较接近; 对于 TM 偏振光, 占空比分别为 $f \approx 0.78$ 和 0.67, 前者与理论值相符, 后者与理论值有微小偏差。

3) 对于 TM 和 TE 偏振光, 零阶与二阶等效介质理论公式获得的透射率不同, 存在一定的差异。理论上, 光栅透射率可达 100%, 占空比为 0.22 时, 对于 TE 偏振光, 在激光器波长调谐过程中, 零阶和二阶等效介质理

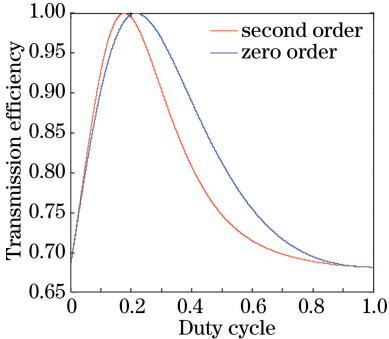


图 4 对 TE 光, 光栅透射率与占空比的关系

Fig. 4 Relationship between grating transmission efficiency and grating duty cycle for TE polarization

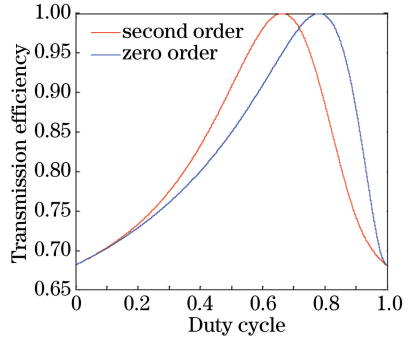


图 5 对 TM 光, 光栅透射率与占空比的关系

Fig. 5 Relationship between grating transmission efficiency and grating duty cycle for TM polarization

论获得的光栅透射率均在 99% 以上,最大透射率差约为 0.008,有利于激光器的稳定工作,而对于 TM 偏振光,光栅透射率较低,仅在 0.73 左右,这一点有利于谐振腔内 TE 和 TM 光的波长分离及模式抑制;占空比为 0.78 时,对于 TM 偏振光,零阶和二阶近似折射率得到的透射率大部分在 90% 以上,但相差较大(约为 0.06~0.1),随着蓝移,透射率差继续增大,TE 偏振光的透射率很低,仅在 0.7 左右,与 TM 偏振光透射率相差较大。总之,亚波长光栅占空比一定时,TM 和 TE 偏振光两者的透射率不会同时取得最大值,且差异较大,该性质亦源于等效折射率的差异。该性质有利于可调谐 VCSELs 中的偏振选择。

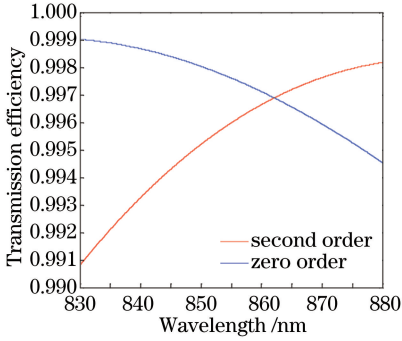


图 6 对 TE 光,光栅($f=0.22$)透射率与波长的关系
Fig. 6 Relationship between grating transmission and wavelength for TE polarization and $f=0.22$

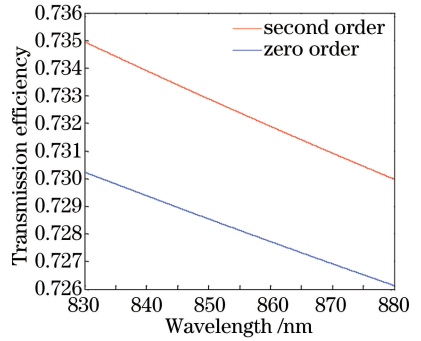


图 7 对 TM 光,光栅($f=0.22$)透射率与波长的关系
Fig. 7 Relationship between grating transmission and wavelength for TM polarization and $f=0.22$

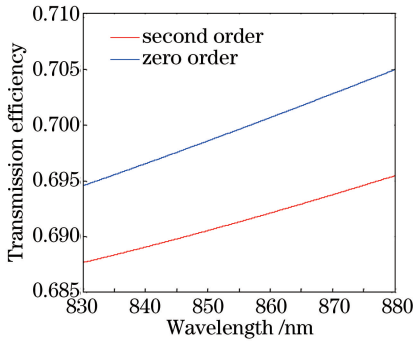


图 8 对 TE 光,光栅($f=0.78$)透射率与波长的关系
Fig. 8 Relationship between grating transmission and wavelength for TE polarization and $f=0.78$

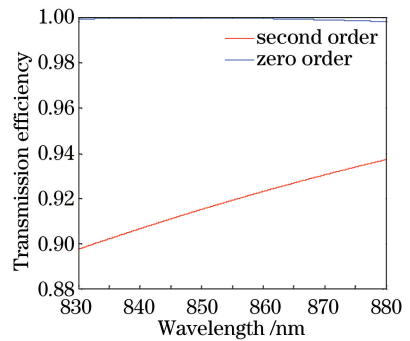


图 9 对 TM 光,光栅($f=0.78$)透射率与波长的关系
Fig. 9 Relationship between grating transmission and wavelength for TM polarization and $f=0.78$

透射率随脊高与调谐波长的变化如图 10~图 11 所示,分析可知:

- 1) 当具有相同光栅占空比时,TE 和 TM 偏振光实现最大透射率对应的脊高相差较大。
- 2) 无论对于 TE 或 TM 偏振光,当脊高偏离最优值时,光的透射率明显下降,考虑到实际加工工艺,光栅脊

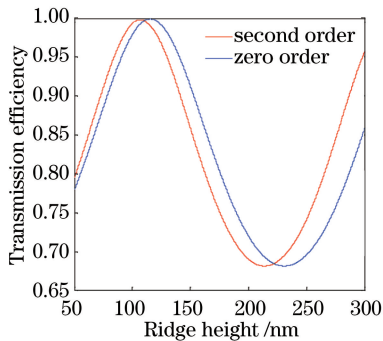


图 10 对 TE 光,光栅($f=0.22$)透射率与脊高的关系
Fig. 10 Relationship between grating transmission and ridge height for TE polarization and $f=0.22$

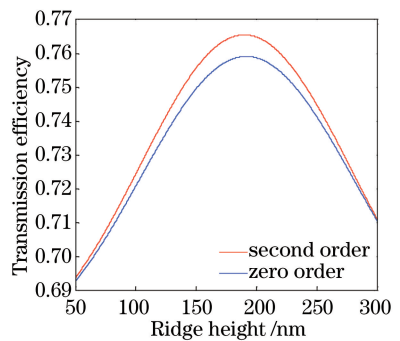


图 11 对 TM 光,光栅($f=0.22$)透射率与脊高的关系
Fig. 11 Relationship between grating transmission and ridge height for TM polarization and $f=0.22$

高应控制在合适的范围。对比图 12、图 13 可知,设计脊高时,选择某一偏振光取得较高透射率时,可有目的地将另一偏振光取低透射率的脊高值,实现激光器的高偏振抑制比及稳定模式控制。

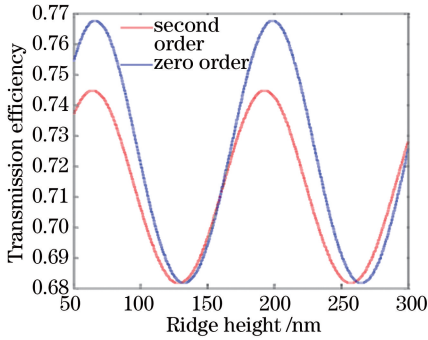


图 12 对 TE 光,光栅($f=0.78$)透射率与脊高的关系
Fig. 12 Relationship between grating transmission and ridge height for TE polarization and $f=0.78$

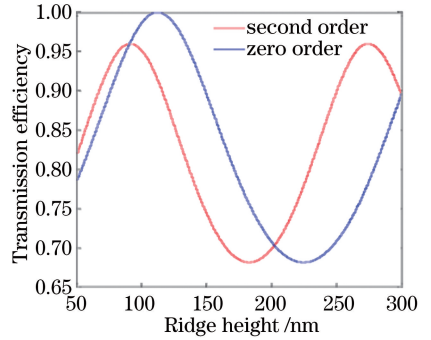


图 13 对 TM 光,光栅($f=0.78$)透射率与脊高的关系
Fig. 13 Relationship between grating transmission and ridge height for TM polarization and $f=0.78$

3.3 MEMS VCSELs 系统模拟

MEMS VCSELs 系统设计由下至上为:GaAs 衬底,34 对下 $n\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ DBR,半导体腔(包括三层 GaAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱),氧化限制层,1 对 $p\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ DBR,GaAs 光栅层,空气隙,22 对上 $p\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ DBR,如图 14 所示。

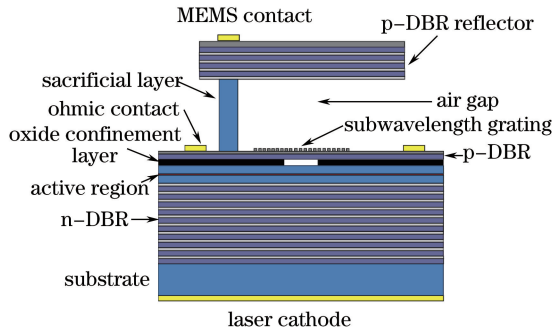


图 14 MEMS VCSELs 结构
Fig. 14 Structure of MEMS VCSELs

采用 Matlab 软件设计程序对具有不同占空比光栅、单一偏振输出模式的 MEMS VCSELs 系统进行了模拟,其中光栅周期、脊高分别为 185、112 nm,光栅材料为 GaAs。对输出 TE 和 TM 模式系统,分别设定了不同的光栅占空比组合进行对比:TE 模式($f=0.22, 0.5$ 和 1)和 TM($f=0.5, 0.78$ 和 1)。模拟结果的波长调谐范围情况如图 15、图 16 所示。

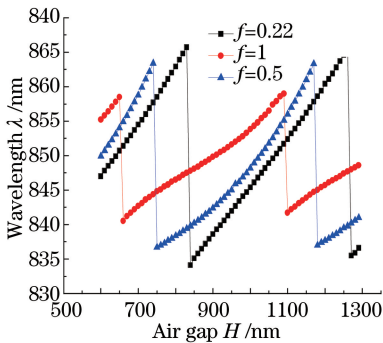


图 15 TE 模式 VCSELs,波长与空气隙的关系
Fig. 15 Relationship between wavelength and air gap for TE polarization VCSELs

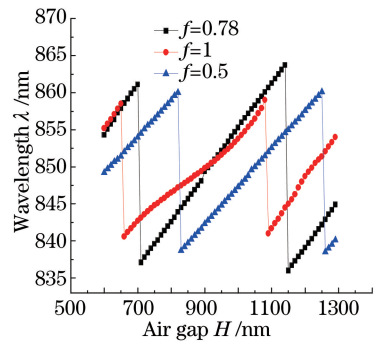


图 16 TM 模式 VCSELs,波长与空气隙的关系
Fig. 16 Relationship between wavelength and air gap for TM polarization VCSELs

图 15、图 16 分别给出了输出 TE 和 TM 模式的 MEMS VCSELs 的波长调谐过程。其中在光栅占空比取值有 0.22、0.5、0.78 和 1, $f=0.22$ 和 0.78 分别代表对 TE 和 TM 模式优化后的光栅占空比, $f=0.5$ 代表未进行优化的光栅占空比, $f=1$ 代表未刻蚀光栅结构。

由图 15、图 16 可得波长调谐范围, 结果如表 1 所示。

表 1 不同占空比时输出 TE 和 TM 模式 MEMS VCSELs 的波长调谐范围

Table 1 Wavelength tuning ranges of TE and TM mode MEMS VCSELs with different grating duty cycles

Grating duty cycles f	Wavelength tuning range /nm	
	TE MEMS VCSELs	TM MEMS VCSELs
1	18.5	18.4
0.5	26.7	21.4
0.22 (TE) and 0.78 (TM)	31.4	25.6

由图 15、图 16 及表 1 可知:

1) 刻蚀光栅可增强光场在空气隙内的能量分布, 扩大 MEMS VCSELs 的波长调谐范围。

2) 对于目标输出模式为 TE 或 TM 偏振光的 MEMS VCSELs, 优化光栅占空比后, 相应目标偏振模式的光栅透射率可得到进一步提高(理论值可达 100%), 分布在空气隙内的光场能量进一步增强, 波长调谐范围也在刻蚀但未优化光栅的基础上得到进一步扩大。

4 结 论

基于等效介质理论对零阶和二阶近似等效折射率进行了数值模拟和分析, 并结合薄膜理论确定了针对 VCSELs 内调谐范围中心波长为 850 nm、GaAs 材料亚波长光栅的最佳周期、占空比、脊高的取值。分析了对于 TE、TM 光, 占空比与脊高对光栅透射率的影响, 当占空比取 TE 或 TM 模式中其一较优值时, 另外一模式的光栅透射率必定较低, 且当脊高偏离较优值时, 光栅透射率会迅速下降, 这使得谐振腔内两模式的波长发生分离, 有利于激光器的偏振控制及稳定输出。最后, 通过建立 MEMS VCSELs 系统模型并进行模拟, 对比了未刻蚀光栅、光栅未优化及光栅优化后激光器的调谐范围, 模拟结果表明: 针对特定波长调谐范围及光栅材料, 通过刻蚀光栅及优化光栅参数可实现光栅对 TE 或 TM 光的增透, 增强半导体腔和空气隙之间光场的耦合, 进而扩大波长的调谐范围。

目前, 波长可调谐垂直腔半导体激光器已成功应用于大容量光通信网络、光传感等领域。随着可调谐激光器偏振对比度与模式稳定性的提升、波长调谐范围的进一步扩大, 具有模式单一、输出稳定、调谐范围大等优势的波长可调谐激光光源将在光通信领域发挥不可替代的作用。

参 考 文 献

- Iga K. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution[J]. Appl Phys, 2008, 47(1): 1-10.
- Larsson A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 6(17): 1552-1567.
- 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 桢, 赵小侠, 等. 表面涂覆胆固醇液晶一垂直腔面发射激光器的偏振特性[J]. 激光与光电学进展, 2014, 51(11): 111402.
- Li Zhifeng, Wang Hongjie, Wang Wenrui, *et al.*. Upconversion by vertical 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 Xiushan, Ning Yongqiang, Cui Jingjiang, *et al.*. Polarization properties of rectangle-shape VCSEL with asymmetrical current injection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071402.
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 非对称电流注入对矩形台面激光器的偏振分析[J]. 激光与光电学进展, 2015, 52(7): 071402.
- Kögel B, Maute M, Halbritter H, *et al.*. Long-wavelength MEMS tunable vertical-cavity surface-emitting lasers with high

- sidemode suppression[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2006, 8(7): S370-S376.
- 7 Koyama F, Nakahama M. Micromachined vertical cavity surface emitting lasers-Athermalization, Tuning, and Multiwavelength Integration[J]. IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, 2006, 21(4): 1700310.
 - 8 Cierl C, Gründl T, Zougal K, *et al.*. Widely tunable MEMS-VCSELs operating at $>70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [C]. SPIE, 2013, 8639: 86390G.
 - 9 Potsaid B, Jayaraman V, Fujimoto J G, *et al.*. MEMS tunable VCSEL light source for ultrahigh speed 60 kHz~1 MHz axial scan rate and long range centimeter class OCT imaging[C]. SPIE, 2012, 8213: 821300M.
 - 10 Wang Honghang. Study on micromechanical tunable vertical cavity surface emitting lasers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006: 36-37.
王红航. 微机械可调谐垂直腔面发射激光器的研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2006: 36-37.
 - 11 Ma Youqiao, Zhou Jun, Sun Tietun, *et al.*. Design of antireflection structure of photovoltaic cells with sub-wavelength grating based on EMT[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(10): 1353-1357.
马佑桥, 周 骏, 孙铁囤, 等. 基于等效介质理论的光伏电池亚波长光栅减反结构设计[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1353-1357.
 - 12 Rytov S M. Electromagnetic properties of a finely stratified medium[J]. Sov Phys JETP, 1956, 2(3): 466-475.
 - 13 Li Yunfang. Study on optical characteristics of subwavelength optical elements[D]. Chanchun: Chanchun University of Science and Technology, 2013: 6-9.
李云芳. 亚波长光学元件光学特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 6-9.
 - 14 Luo Chenchen. Research on the fabrication and properties of micro/nano grating[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University of Science and Technology, 2013: 26-27.
罗晨晨. 微纳光栅的制备与特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 26-27.
 - 15 Tang JinFa, Zheng Quan. Applied thin film optics[M]. Shanghai: Shanghai Science And Technology Publishing House, 1984: 45-46.
唐晋发, 郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 45-46.
 - 16 Sang Tian, Cai Tuo, Liu Xiaochun, *et al.*. Study on validity of effective refractive indices of one dimensional subwavelength gratings on grating spectral properties[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 100501.
桑 田, 蔡 托, 刘晓春, 等. 一维亚波长光栅等效折射率描述光谱特性的有效性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 100501.