

文章编号: 1000-7032(2018)06-0855-07

一种具有低折射率的高对比度光栅反射镜的设计

谢检来, 郝永芹*, 张家斌, 晏长岭, 马晓辉, 王志伟, 王霞

(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)

摘要: 设计并研究了一种工作于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的 GaSb 基亚波长高对比度光栅反射镜, 其具有低折射率光栅层结构。通过严格耦合波理论优化结构, 以最大限度地满足 VCSEL 腔面反射镜对反射率带宽的要求。反射镜对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的 TM 模式具有优良的反射效率, 带宽与设计波长之比达 15% (反射率 $R > 99\%$), 在反射率 $R > 99.9\%$ 的部分 $\Delta\lambda/\lambda_0 > 9.5\%$, 带宽中心波长为 $2.003\ \mu\text{m}$, 与此同时 TE 模的反射率不超过 70.20%。该反射镜结构中几个参数的制作容差较大, 且厚度低于 $1.1\ \mu\text{m}$, 有利于在垂直腔面发射半导体激光器上的单片集成。

关键词: 亚波长光栅; 反射镜; 垂直腔面发射激光器; GaSb

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183906.0855

Design of High Contrast Grating Mirror with Low Index Grating Layer

XIE Jian-lai, HAO Yong-qin*, ZHANG Jia-bin, YAN Chang-ling,

MA Xiao-hui, WANG Zhi-wei, WANG Xia

(National Key Laboratory of Science and Technology on High Power Semiconductor Lasers,

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

* Corresponding Author, E-mail: hyq72081220@aliyun.com

Abstract: A $2\ \mu\text{m}$ subwavelength high contrast grating (HCG) mirror based on GaSb was designed and investigated, which had a low index grating layer structure. These designs of structure were optimized by use of rigorous coupled wave theory to maximize the reflectivity and bandwidth to meet the requirements of a VCSEL cavity mirror. The mirror has excellent reflectivity for TM mode of the $2\ \mu\text{m}$ wave band. The ratio of bandwidth to design wavelength is 15% (reflectivity $R > 99\%$). When the reflectivity $R > 99.9\%$, $\Delta\lambda/\lambda_0 > 9.5\%$, and the bandwidth center wavelength is $2.003\ \mu\text{m}$. At the same time, the reflectivity of TE mode does not exceed 70.20%. Several parameters in the mirror structure have larger fabrication tolerances, and the thickness is less than $1.1\ \mu\text{m}$, which is beneficial to the monolithic integration on vertical cavity surface emitting semiconductor lasers.

Key words: subwavelength grating; mirror; VCSEL; GaSb

1 引 言

亚波长高折射率对比度光栅 (HCG)^[1-2] 是

一种光栅周期小于入射光波长、体积小、对光具有高效衍射特性的二元光学元件^[3]。自从上个世纪以来, 随着微纳结构加工技术的高速发展,

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(11474038, 61376045, 11474036); 总装预研究基金(61424050302162405002)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11474038, 61376045, 11474036); General Assembly Pre-research Fund(61424050302162405002)

光栅的制作精度以及制作规模得到了空前的提高, HCG 因而广泛地被应用于带宽滤波器、 $1/4$ 波片、偏振分束器、低损耗空心波导、红外探测器、光功分器等^[4-5], 以及用作近年来备受关注的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的腔面反射镜^[6]。

传统 VCSEL 的腔面反射镜是两个由 20 对到 40 对 $1/4$ 光学波长厚度的高、低折射率材料层构成的分布式布拉格反射镜 (DBRs)^[7]。由于分布式布拉格反射镜 (DBRs) 具有膜层数目多、膜层厚度及其组分要求严格、阈值电流高、偏振性差等特点, 并且膜层制作误差的叠加也会带来较大的影响, 因此实际的器件制作会有较大难度。尤其是对于工作波长较长的 VCSEL ($1.8 \mu\text{m}$ 以上), 较厚的 DBRs 具有更高的电阻和更严重的光吸收, 使阈值升高, 内量子效率下降, 严重影响了器件性能。适用于工作波长较长的介质型 HCG 可以很好地避免这些问题。相对于 DBRs 而言, HCG 具有膜层少、衍射效率高、带宽大、偏振好、制作容差较大等优点, 并且处于零吸收窗口的制作材料来源广、制备工艺更为简便, 使得它在 VCSEL 上的应用在国际上受到广泛的关注^[8]。

2004 年, 一种适用于工作波段为 $1.55 \mu\text{m}$ VCSEL 的介质型宽带高反射率 HCG 被报道, 它使用普通的 Si 与 SiO_2 材料, 在反射率 $R > 99.9\%$ 的带宽 ($\Delta\lambda$) 与中心波长 (λ_0) 比达到了 17% ^[1]。2007 年, 首支集成 HCG 作为反射镜的 VCSEL 成功实现了激射, 结构中使用 4 对 DBRs 补偿 HCG 反射率和带宽的不足^[9]。2011 年, Chevallier 等^[10]用 Si 与 SiO_2 设计了一种应用于工作波段为 $2.3 \mu\text{m}$ VCSEL 的宽带高反射率亚波长光栅反射镜, 并使用了一对介质型 DBRs, 它在对 TM 模实现偏振的同时反射率 $R > 99.9\%$ 的带宽达 152 nm , 基本上满足了 VCSEL 对反射率的设计要求, 但是依然存在偏振性、高反射率宽带等衍射特性与制作容差、膜层厚度等结构特点之间的矛盾。对于含有 DBRs 的 HCG 反射镜, 由于 DBRs 对所有模式的反射率都有贡献, 导致 HCG 在 TM 模实现高反射率宽带宽的同时 TE 模的反射率普遍较高, 以至于偏振性较弱。本文针对工作在 $2 \mu\text{m}$ 波段 TM 模式的 GaSb 基 VCSEL 设计了一种新的 HCG 结构, 并应用严格耦合波方法对其特性进行仿真分析。

2 光栅设计与理论模型

一维 HCG 可以被认为是一种周期性的波导阵列^[11], 由于结构材料之间的大折射率差以及小于入射光波长的周期, 在平面波入射光栅之后只输出零级衍射波, 以至于具有合适参数的光栅对光波具有很强的衍射能力。HCG 通常是在低折射率材料上面生长高折射率材料, 并把高折射率材料层刻蚀形成光栅, 由低折射率材料层-高折射率材料光栅-空气形成高折射率对比度, 从而获得很大的高反射率带宽, 使其更适于应用在 VCSEL 上。

图 1 为本文设计的具有低折射率光栅层的 HCG 结构示意图, 它与通常的应用于 VCSEL 中 HCG 反射镜最大的差别在于: 不存在由高、低折射率材料构成的 DBRs 多膜层结构, 只是在 Si 光栅上增加了一层与其同周期的低折射率 SiO_2 光栅层。为了最大限度地避免 HCG 自身产生的光吸收, HCG 的设计通常采用处于零吸收窗口的材料^[12]。文中 HCG 的衬底使用的是一种在 $2 \mu\text{m}$ 波段无吸收的高折射率半导体材料 GaSb, 与其紧挨着的低折射率材料亚层 (SiO_2) 形成高折射率差, 在一定程度上有利于增强 HCG 的反射效果。 SiO_2 亚层还可以通过一定的技术手段来实现与 GaSb 的晶格匹配, 避免 Si 光栅与 GaSb 的晶格失配导致其他的薄膜质量问题^[13], 例如 Si 与 GaSb 晶格失配导致薄膜应力大。

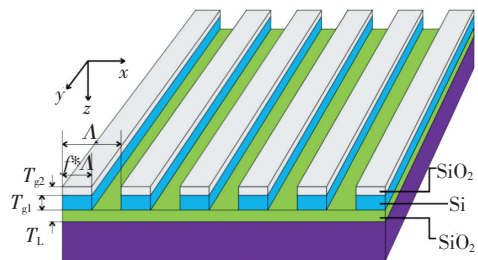


图 1 高对比度亚波长光栅示意图: 周期 A , 占空比 f , Si 光栅层厚度 T_{g1} , SiO_2 光栅层厚度 T_{g2} , 亚层厚度 T_L 。
Fig. 1 Schematic diagram of a HCG: grating period A , fill factor f , Si grating thickness T_{g1} , SiO_2 grating thickness T_{g2} , low index thickness T_L .

亚层与光栅层中的 Si 层也形成了高折射率差, 这有利于提高光栅高反射率带宽, 并与衬底构成一种高折射率对比度结构, 从整体上提高了光栅的衍射效率。光栅层中的低折射率材料层

SiO₂层与Si层形成了鲜明的折射率对比,使光栅脊自身形成了折射率突变,且对Si光栅起到抗氧化保护作用,提高其长期工作的稳定性。其次,这种相对极薄的反射镜在提供宽带高反射率的同时不提供电阻,这对VCSEL的应用具有重要的现实意义。另外,反射镜结构简单、厚度小,能够降低对制作工艺的要求,加强器件的散热。更重要的是这种无DBRs的亚波长光栅反射镜还可以提供较强的偏振性,这对改善VCSEL的偏振稳定性、提高信噪比、避免偏振的开关和涨落效应具有重要意义^[14]。

亚波长光栅衍射效率的计算可以采用严格耦合波理论(RCWA),一维亚波长光栅的反射率可以表示为^[15]:

$$D_{ii} = |R_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) + |R_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{1,zi}/n_1^2}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (1)$$

$$D_{ii} = |T_{s,i}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{\parallel,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) + |T_{p,i}|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{k_{\parallel,zi}/n_{\parallel}^2}{k_0 n_1 \cos \theta} \right), \quad (2)$$

式中*i*表示衍射波的级次, θ 为入射角, k_0 为入射波波矢, n_1 、 n_{\parallel} 分别是入射区与光栅区中介质的折射率, $k_{1,zi}$ 、 $k_{\parallel,zi}$ 分别是入射区与光栅区中沿*z*轴方向的波矢, $R_{s,i}$ 、 $R_{p,i}$ 分别是反射波的归一化TE分量和TM分量, $T_{s,i}$ 、 $T_{p,i}$ 分别是透射波的归一化TE分量和TM分量。

其中HCG的衍射级次与光栅的相关参数又有如下关系^[16]:

$$\frac{\Lambda}{\lambda_0} (n_g \sin \theta - 1) < i < \frac{\Lambda}{\lambda_0} (n_g \sin \theta + 1), \quad (3)$$

式(3)中的*i*为光栅的衍射级次, n_g 与 Λ 分别是光栅材料的折射率与周期, λ_0 与 θ 分别是入射波长及其入射角, Λ 与 λ_0 单位相同。亚波长光栅通常只有零级衍射波,其余为倏逝波。从式(3)可知,对于一维亚波长光栅来说,当给定入射波长与入射角时,可计算出光栅周期与材料折射率之间的关系。

3 数值仿真

为了使结构(图1)在2 μm波长处对TM模具有高反射率($R > 99.9\%$)宽带宽,而HCG对入射波的高衍射效率并具有偏振性是其各参数共同作用的结果,调制率越大,高反射率带宽越大,因

此需要对各参数进行优化。为得到高反射率宽带宽,通常让结构只发生零级衍射,其余为倏逝波,反射波能量更为集中。根据等效介质理论,亚波长光栅的偏振性是一种形式双折射效应,根本原因是光栅介质在*x*轴方向上对电磁波的周期性调制,因此对光栅参数中占空比的优化选择是至关重要的。

使用Rsoft软件通过应用控制变量法对图1结构进行参数模拟,分析各参数对高反射率带宽(反射率 $R > 99.9\%$)的影响以及整个结构对目标波段入射光的衍射效果。以2 μm为中心波长,分别对所设计HCG中的Si光栅厚度、亚层厚度、占空比、周期、SiO₂光栅层厚度进行仿真模拟,输出相应的反射率谱线并对其进行相应的分析,得到使HCG达到最优衍射效率的各参数区间,并在最后选取一组合适的参数画出HCG的反射率谱线。其中GaSb衬底的折射率为3.90,材料Si的折射率为3.48,材料SiO₂的折射率为1.47,空气折射率为1。图2、3、4、5、6是仿真得到的相关参数与波长对应的反射率图谱。

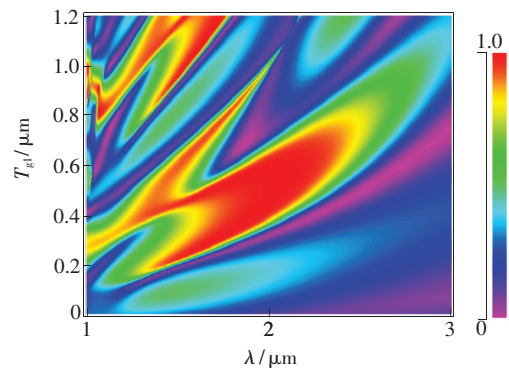


图2 Si光栅厚度(T_{g1})与波长对应的反射率图

Fig. 2 Reflectivity as function of Si grating period (T_{g1}) and wavelength

图2是Si光栅厚度与波长对应的反射率图。根据严格耦合波理论,光栅厚度是光栅区中切向磁场和电场的空间谐波 $U_{yi}(z)$ 和 $S_{xi}(z)$ 的重要影响因子,它对入射波具有很强的调制作用。另外,光栅层厚度在电磁波入射界面对切向电磁场的反射振幅 R_i 具有重要的影响,从而直接影响反射率的大小。图中显示Si光栅厚度的变化会对高反射率带宽产生较大的影响,从1.85~2.30 μm,较宽的高反射率带随着Si光栅厚度的增加几乎是向着长波方向线性移动。在1.870~2.170 μm,

Si 光栅适当的厚度区间都可以在 2 μm 波段形成很宽的高反射带,其中反射率大于 99.9% 对应的厚度区间范围是 0.565 ~ 0.590 μm ,即调制作用达到最强,HCG 具有很高的衍射效率。

图 3 是亚层厚度与波长对应的反射率图。其中纵向弯曲的高反射率区域表明亚层厚度的大范围变化对高反射率带宽中心波长具有较小的周期性影响,它主要表现在调节高反射率带宽的位置,这对于膜层生长厚度的选择具有重要的参考价值。而且,当亚层厚度从 0 开始增大时,虽然在图 3 中难以看出高反射率带宽宽度的变化,但从仿真的数据中发现高反射率带宽的宽度是增大的,当厚度为 250 ~ 350 nm 时高反射率带宽宽度较宽且其中心波长在 2.0 μm 处,并在 320 nm 左右达到最优。说明低折射率亚层的存在对拓宽 HCG 的高反射率带宽具有一定的作用,主要是因为亚层提供了折射率的高对比度,增强了光栅的调制率,对高反射率带宽起到一定的调控作用。此外,还可以通过调节其厚度来适当调节 VCSEL 的有效腔长。

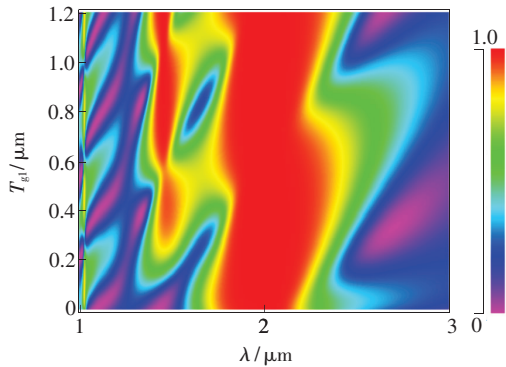


图 3 亚层厚度 (T_L) 与波长对应的反射率图

Fig. 3 Reflectivity as function of low index thickness (T_L) and wavelength

图 4 是占空比与波长对应的反射率图。光栅层 x 轴方向上周期性的折射率变化可以由 Fourier 谐波表示,对电磁场归一化空间谐波的磁场矢量与电场矢量起到周期性的调制作用,占空比影响调制强度,进而表现为对调制带宽的影响。图中大小变化剧烈的高反射率区域表明占空比的大范围变化对高反射率带的位置与大小都有明显的影响,占空比的增大意味着等效折射率的增大,光栅对入射波的折射率周期性调制强度发生变化。图中显示 2 μm 波长处高反射率带(反射率 $R > 99.9\%$)对

应的占空比在 48% ~ 62.4%,此时调制强度最强,衍射效果最优。

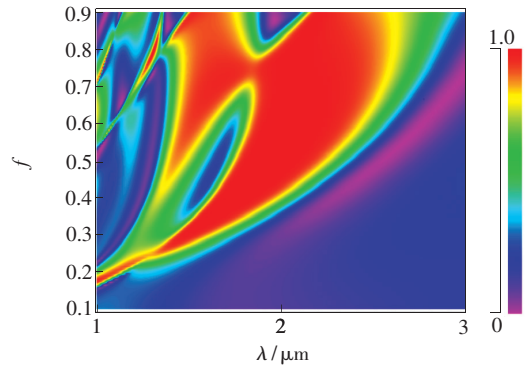


图 4 占空比 (f) 与波长对应的反射率图

Fig. 4 Reflectivity as function of fill factor (f) and wavelength

图 5 为 SiO_2 光栅层厚度对反射率的影响。低折射率光栅层使整个光栅层的等效折射率有所降低,在某种程度上影响了对入射波的调制作用。从图中可以直观地看出其厚度变化对反射率带宽宽度、中心波长位置的影响很小,但实际上从输出数据中发现,当厚度从 0 开始增大到 70 nm 时,两个反射率 $R > 99.9\%$ 的带宽迅速在设计波长 2.0 μm 处合并成一个带宽。图中竖直方向表现出多个宽度不同的条纹,通过他们接近拉平的“S”曲线可知不同反射率带宽的中心波长位置在特定的波长区间都存在微弱的周期性变化(来回移动),即 SiO_2 光栅层厚度在很大的区间内变化对反射率的影响微弱,这有利于 HCG 的制作。 SiO_2 光栅层的其中一个作用是可以当作 Si 光栅层刻蚀的掩膜。根据图 5 的仿真结果,Si 光栅刻蚀过程中即使部分 SiO_2 被刻蚀一部分,对高反射率带宽影响也很小。

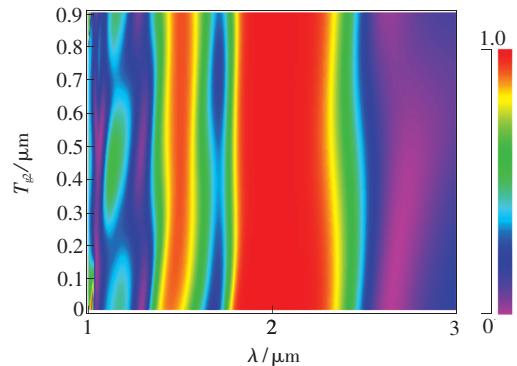


图 5 SiO_2 光栅层厚度 (T_{g2}) 与波长对应的反射率图

Fig. 5 Reflectivity as function of SiO_2 grating thickness (T_{g2}) and wavelength

图6是光栅周期与入射波长对应的反射率图,从图中可以看出周期的变化对中心波长的影响显著。周期性结构的亚波长光栅的高反射率窄带宽通常被认为是“导模共振异常”引起的,是由于衍射光场与调制波导泄漏模之间的耦合引起光波能量的重新分布,并在共振波长处出现尖锐的反射峰,如图中波长 $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.2\ \mu\text{m}$ 以及周期与波长分别为 $1.1\ \mu\text{m}$ 、 $1.9\ \mu\text{m}$ 处。在 x 轴方向上周期排列的介质中,电磁波的传播受到周期性调制,方程(1)中的波矢量 k 是 λ/Λ 的函数,只有当周期的数值最优时出现较好的衍射效率,即高反射率窄带宽。第 i 级衍射波是由于光栅区域介质的周期性所引起的各个衍射级次之间的耦合结果。依据图5, SiO_2 光栅层厚度的增加对反射率带宽中心波长的位置影响很小,于是式(3)中光栅材料的有效折射率近似于Si的折射率。从图6中得到HCG高反射率($R > 99.9\%$)带宽对应的周期区间在 $0.833 \sim 0.869\ \mu\text{m}$,在该范围内对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的调制强度最强、衍射效果最优,而周期的具体取值受HCG自身各参数之间的相互影响。

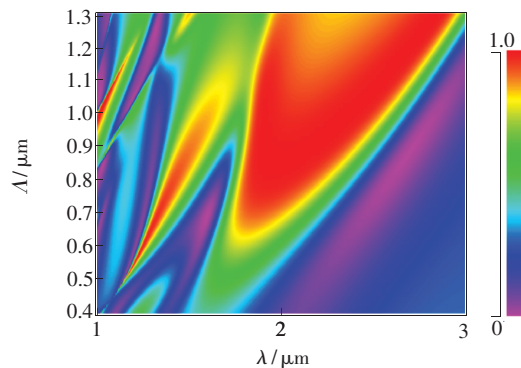


图6 光栅周期(Λ)与波长对应的反射率图

Fig.6 Reflectivity as function of grating period (Λ) and wavelength

通过上述分析,很容易发现不同的参数变化对反射率的影响程度不同,即反射率对不同参数改变的敏感度不同。这主要是因为各个参数对入射、反射电场与磁场的影响方式不同。其中光栅层厚度和占空比决定了光栅对入射光的调制强度,但是这种强度不能无限增加,并且存在一个光栅效应相对于反射率最强的最佳点^[1]。表1所示为仿真后得到的各参数取值的优化区间,从中可知HCG对Si光栅层厚度与周期的要求相对较高,而 SiO_2 光栅层、亚层以及占空比则允许很大

的制作容差。

表1 各参数优化区间

Tab.1 Optimization range of each parameter

Parameter	Optimization range
Si grating thickness/nm	565 - 590
SiO_2 grating thickness/nm	70 - 360
Low index thickness/nm	64 - 530
Period/nm	833 - 869
Fill factor	48% - 62.4%

基于上述结果,我们选取一组参数设计了亚波长光栅反射镜,图7为TM与TE入射光垂直于光栅表面入射时的反射率谱线,其中虚线为 $T_{g2} = 0\ \mu\text{m}$ (即没有 SiO_2 光栅层)时所对应的反射率谱线。从图中可知,相对于去掉 SiO_2 光栅层后的结构,HCG的TE模反射率要更低,并且TM模高反射率带宽在 $2\ \mu\text{m}$ 附近对应的反射率要更高,但TM模高反射率带宽的左侧更窄,这主要是因为HCG中的 SiO_2 光栅层在一定程度上降低了Si光栅层的折射率对比度。对于TM入射光,HCG具有高反射率窄带宽衍射特性,其中在TM模反射率 $R > 99\%$ 时,带宽所对应的波长位置为 $1.870 \sim 2.170\ \mu\text{m}$,带宽

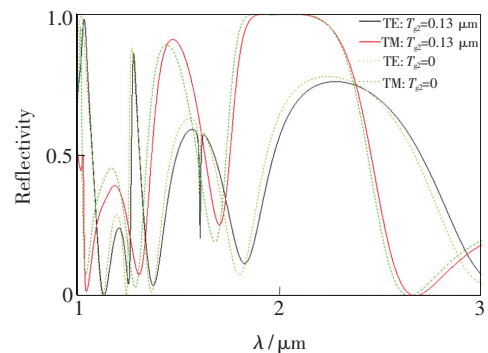


图7 TM(红色实线)和TE(黑色实线)模对应的反射率图:反射率 $R > 99.9\%$,带宽为 $196\ \text{nm}$ ($\Lambda = 0.860\ \mu\text{m}$, $f = 0.550$, $T_{g1} = 0.572\ \mu\text{m}$, $T_{g2} = 0.130\ \mu\text{m}$, $T_L = 0.320\ \mu\text{m}$)。TM(绿色虚线)和TE(黄绿色虚线)模对应的反射率图: $\Lambda = 0.860\ \mu\text{m}$, $f = 0.550$, $T_{g1} = 0.572\ \mu\text{m}$, $T_{g2} = 0\ \mu\text{m}$, $T_L = 0.320\ \mu\text{m}$ 。

Fig.7 Reflection spectra of TM (solid red) and TE (solid black) mode with a $196\ \text{nm}$ bandwidth in reflectivity $R > 99.9\%$ ($\Lambda = 0.860\ \mu\text{m}$, $f = 0.550$, $T_{g1} = 0.572\ \mu\text{m}$, $T_{g2} = 0.130\ \mu\text{m}$, $T_L = 0.320\ \mu\text{m}$). Reflection spectra of TM (dotted green) and TE (dotted yellow-green) mode: $\Lambda = 0.860\ \mu\text{m}$, $f = 0.550$, $T_{g1} = 0.572\ \mu\text{m}$, $T_{g2} = 0\ \mu\text{m}$, $T_L = 0.320\ \mu\text{m}$.

宽度达 300 nm,并且在这个带宽内 TE 模的反射率不超过 74.20%。HCG 用作 VCSEL 腔面反射镜时,要求设计其反射率大于 99.9% 才能保证较大的制作容差。根据图 7 的反射率谱线,在 TM 模反射率 $R > 99.9\%$ 处对应的波长位置为 1.905 ~ 2.101 μm ,带宽中心波长接近设计波长为 2.003 μm ,其带宽宽度为 196 nm,与此同时 TE 模的反射率低于 70.20%。与通常的 HCG^[10,17] 比较,在实现高反射宽带宽的同时,偏振性明显提高。其制作具有较大的制作容差,只是 Si 光栅层厚度、周期的制作容差略有降低,但因其更为简便的结构(无需制作精度难于控制的 DBRs)以及极薄的厚度(依据图 7 可知厚度可低于 1.1 μm),使之在实际制作及应用中更具有优势。

4 结 论

本文采用严格耦合波理论设计了一种可应用于 2 μm 波段 VCSEL 的新型 TM 偏振 HCG,并分析了各参数对 HCG 反射率的影响。HCG 中的光栅由两种不同的介质材料构成,它有益于 Si 光栅层的刻蚀以及器件的长期稳定性。设计的反射镜具有强偏振效果的同时对 TM 模具有宽度可达 300 nm 的高反射率(反射率 $R > 99\%$)宽带宽, $\Delta\lambda/\lambda_0 = 15\%$,TE 模反射率最高为 74.20%;在反射率 $R > 99.9\%$ 时,带宽超过 190 nm, $\Delta\lambda/\lambda_0 > 9.5\%$,TE 模反射率不超过 70.20%。由于 SiO₂ 光栅层厚度、亚层厚度、占空比具有很大的制作容差且总厚度可低于 1.1 μm ,使得 HCG 更容易实现制备及其与 VCSEL 的单片集成应用。

参 考 文 献:

- [1] MATEUS C F R, HUANG M C Y, DENG Y F, *et al.*. Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwave-length grating [J]. *Photon. Technol. Lett. IEEE*, 2004, 16(2):518-520.
- [2] MATEUS C F R, HUANG M C Y, CHEN L, *et al.*. Broad-band mirror (1.12 - 1.62 μm) using a subwavelength grating [J]. *Photon. Technol. Lett. IEEE*, 2004, 16(7):1676-1678.
- [3] 金国藩. 二元光学 [J]. *物理与工程*, 2000, 10(5):2-16.
JIN G F. Binary optics [J]. *Phys. Eng.*, 2000, 10(5):2-16. (in Chinese)
- [4] 胡劲华, 刘秀红, 赵继军, 等. 一种亚波长高折射率差光栅滤波器的设计与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5):050502.
HU J H, LIU X H, ZHAO J J, *et al.*. Design and analysis of optical filter based on subwavelength high-contrast grating [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2016, 53(5):050502. (in Chinese)
- [5] 毛敏, 黄永清, 房文静, 等. 基于非周期高折射率差亚波长光栅的光功分器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1):010603.
MAO M, HUANG Y Q, FANG W J, *et al.*. Novel optical power splitter based on nonperiodic subwavelength high-index-contrast grating [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2016, 53(1):010603. (in English)
- [6] 关宝璐, 张敬兰, 任秀娟, 等. 具有宽调谐范围的微纳光机电系统可调谐垂直腔面发射激光器研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(3):262-265.
GUAN B L, ZHANG J L, REN X J, *et al.*. Micro-nano-optical machine system tunable wavelength vertical cavity surface emitting lasers with wide tunable range [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2011, 60(3):262-265. (in Chinese)
- [7] QI F, LIU L, ZHANG R, *et al.*. Broadband and polarization-insensitive subwavelength grating reflector for the near-infrared region [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2014, 12(2):6-8.
- [8] CHUNG I S. Study on differences between high contrast grating reflectors for TM and TE polarizations and their impact on VCSEL designs [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(13):16730-16739.
- [9] HUANG M C Y, ZHOU Y, CHANGHASNAIN C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwave-length grating [J]. *Nat. Photon.*, 2007, 1(2):119-122.
- [10] CHEVALLIER C, FRESSENGEAS N, GENTY F, *et al.*. Optimized sub-wavelength grating mirror design for mid-infrared wavelength range [J]. *Appl. Phys. A*, 2011, 103(4):1139-1144.
- [11] CHANGHASNAIN C J, YANG W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2010,

4(3):379-440.

- [12] GEBSKI M, DEMS M, SZERLING A, *et al.*. Monolithic high-index contrast grating: a material independent high-reflectance VCSEL mirror [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(9):11674-11686.
- [13] AKAHANE K, YAMAMOTO N, GOZU S I, *et al.*. High-quality GaSb/AlGaSb quantum well grown on Si substrate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, 44(1):L15-L17.
- [14] 韩力英. 垂直腔面发射激光器偏振特性的研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2004.
HAN L Y. *Polarization Properties of Vertical-cavity Surface-emitting Lasers* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [15] 袁惠, 周进, 王晓伟, 等. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究 [J]. 中国激光, 2002, 29(9):795-800.
YUAN H, ZHOU J, WANG X W, *et al.*. Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, 29(9):795-800. (in Chinese)
- [16] 张曦. 亚波长光栅及其应用的研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
ZHANG X. *Research on Subwavelength Gratings and Its Applications* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] 谢检来, 郝永芹, 王志伟, 等. 2 微米波段 GaSb 基亚波长光栅反射镜的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7):070501.
XIE J L, HAO Y Q, WANG Z W, *et al.*. Design of 2 μm subwavelength grating mirror based on GaSb [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2017, 54(7):070501. (in Chinese)



谢检来(1992 -),男,江西赣州人,硕士研究生,2015年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。
E-mail: xiejianlai@63.com



郝永芹(1972 -),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2007年于长春理工大学获得博士学位,主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。
E-mail: hyq72081220@aliyun.com