

2 μm 波段 GaSb 基亚波长光栅反射镜的设计

谢检来, 郝永芹, 王志伟, 王霞, 晏长岭, 刘国军, 马晓辉, 李杨, 岳光礼, 张昕

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 研究了一种 2 μm 波段 GaSb 基亚波长光栅反射镜, 讨论了亚波长光栅的各参数对反射谱的影响。对于中心波长为 2 μm 的 TM 模式, 反射镜具有大宽带和极高的反射率, 反射带宽与中心波长之比大于 26% (反射率大于 99%), 波长为 1.895~2.08 μm 时, 反射率达到 99.9% 以上, 带宽达 185 nm, 同时 TE 模的反射率低于垂直腔面发射半导体激光器的激励条件 (反射率小于 95%)。该结构的各个参数所允许的制作容差较大, 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 光栅; 反射镜; 垂直腔面发射激光器; 铟化镓

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070501

Design of 2 μm Waveband GaSb Based Subwavelength Grating Mirror

Xie Jianlai, Hao Yongqin, Wang Zhiwei, Wang Xia, Yan Changling, Liu Guojun,
Ma Xiaohui, Li Yang, Yue Guangli, Zhang Xin

*National Key Laboratory of Science and Technology on High Power Semiconductor Lasers,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A 2 μm waveband GaSb based subwavelength grating mirror is investigated, and the influence of subwavelength grating parameters on reflection spectrum is discussed. The mirror has a wide bandwidth and a high reflectivity with center wavelength of 2 μm in case of TM mode. The ratio of reflection bandwidth to central wavelength is more than 26% when the reflectivity is more than 99%. Especially, reflectivity of the mirror is more than 99.9% at the range of 1.895-2.08 μm , and the bandwidth is 185 nm, while the reflectivity in TE mode is lower than the lasing condition of the vertical cavity surface emitting laser (reflectivity is less than 95%). Each parameter of the structure has bigger fabrication tolerance, which facilitates monolithic integration of vertical cavity surface emitting laser.

Key words gratings; mirror; vertical cavity surface emitting laser; GaSb

OCIS codes 050.1950; 050.6624; 140.7260

1 引言

垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有体积小、重量轻、效率高, 宽温范围内容易实现单纵模工作等优异性质, 作为稳定高效的光源被广泛地应用在激光通信、激光雷达、光互连、光谱测量等领域^[1]。尤其是工作在 2~5 μm 中红外波段的 VCSEL, 在测量对中红外波长具有强吸收谱线的 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_2 等气体的成分和含量方面, 得到了广泛的应用^[2]。典型的 VCSEL 包含两个分布式布拉格反射镜 (DBR), 每个 DBR 至少由 20 对四分之一波长高低折射率材料层构成, 因为每一层膜厚都存在制造误差, 而且整体误差是由每

收稿日期: 2017-01-11; **收到修改稿日期:** 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(11474038, 61376045, 11474036)、总装预研究基金(9140C31010214C310003, 61424050302162405002)

作者简介: 谢检来(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器物理与技术方面的研究。

E-mail: xiejianlai@163.com

导师简介: 郝永芹(1972—), 女, 博士, 副研究员, 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(通信联系人)

层膜的误差叠加所得,制作难度较高^[3]。然而,具有高反射效率的亚波长光栅弥补了 DBR 的这个制造难点,并且可以提供很宽的高反射带宽^[4],因此可用于代替 VCSEL 中的 DBR。随着中红外波段可调谐 VCSEL 的发展,宽带宽反射镜越来越受到人们的重视^[5],给低损耗的亚波长光栅带来更广阔的应用前景。与此同时,亚波长光栅在标准具滤波器、微机电(MEMS)^[6-7]、红外探测器等方面均得到了很好的应用^[8-10]。

2004 年, Mateus C F R 等^[11]报道了一种用于 1550 nm VCSEL 的宽带宽亚波长光栅反射镜,反射镜在 1.4~1.67 μm 带宽与中心波长的比值 $\Delta\lambda/\lambda > 17\%$ (反射率 $R > 99.9\%$),但结构中低折射率层厚度高达 0.9 μm 的同时要求光栅层的厚度误差极小(最大不超过 10 nm),这对镀膜工艺有很高的要求,同时厚度过大可能会严重影响薄膜的质量^[12]。此外,该亚波长光栅是在 Si 衬底上进行的模拟结果,与实际 InP 基 VCSEL 器件集成时会产生光栅反射率降低、带宽变窄等性能劣化的问题,从而很难实现其在 VCSEL 中的应用。2011 年, Chevallier C 等^[13]报道了应用于 2.3 μm 波段 VCSEL 的 TM 模高反射率亚波长光栅反射镜,反射镜在 $R > 99\%$ 处具有很宽的反射带,使用比 Si 更高折射率的 GaAs 衬底,并且当亚层厚度为 17 nm 时,在 $R > 99.9\%$ 处的最大带宽达到 152 nm,但要求低折射率层的厚度控制在几十纳米内。考虑到在实际制作过程中所产生的误差可能降低反射镜实际的反射率和带宽,所以在设计中要求反射率尽可能高、带宽尽可能大。本文考虑了亚波长光栅与 GaSb 基 VCSEL 集成中的物理问题,模拟分析直接在 GaSb 衬底上完成,避免因衬底不匹配而造成的异质外延等因素对反射镜性能的影响,且考虑了实际制作中的技术问题,通过优化结构参数,使其具有更大的制作容差。

2 结构设计

高对比度亚波长光栅(HCG)^[14],是在一层低折射率材料上生长一层高折射率材料,并用高折射率材料层制作成一维光栅结构,由于折射率差较大从而容易形成宽带宽反射镜,适用于 VCSEL 上。相邻两种材料之间的折射率差会影响反射带宽大小,折射率差越大,反射带宽越大,所以位于光栅层下面的低折射率亚层是构成高反射率镜面的重要因素。在实际制作中,采用不同的薄膜生长技术会存在一定的膜厚限制,超过这个厚度可能导致膜厚均匀性变差等问题,从而影响薄膜质量^[12]。本文所采用的高折射率材料和低折射率材料分别为 Si($n_{\text{H}}=3.48$)和 SiO₂($n_{\text{L}}=1.47$),由于二者的折射率在较大的波长范围内变化很小,以至于可以忽略,所以把这两种材料的折射率看作是固定值,其他参数标记为:光栅周期 Λ ,光栅厚度 T_{g} ,占空比 f ,亚层厚度 T_{L} 。

通常采用严格耦合波分析法(RCWA)^[15]计算亚波长光栅的反射率,通过计算分析得到光栅衍射效率为^[4]:

$$D_{\text{ri}} = |R_{\text{s},i}|^2 \text{Re}\left(\frac{k_{\perp,zi}}{k_0 n_{\text{I}} \cos \theta}\right) + |R_{\text{p},i}|^2 \text{Re}\left(\frac{k_{\perp,zi}/n_{\text{I}}^2}{k_0 n_{\text{I}} \cos \theta}\right), \quad (1)$$

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

式中 $R_{\text{s},i}$ 和 $R_{\text{p},i}$ 分别是第 i 级衍射级反射场的 TE 分量和 TM 分量, $T_{\text{s},i}$ 和 $T_{\text{p},i}$ 分别是第 i 级衍射级透射场的 TE 分量和 TM 分量, k_0 为入射波矢, $k_{\perp,zi}$ 为入射区域中沿 z 轴方向的波矢, θ 为入射角, $k_{\parallel,zi}$ 为光栅区域中沿 z 轴方向的波矢, n_{I} 为入射区域介质折射率, n_{II} 为光栅区域中光栅介质的折射率。从(1)、(2)式可知光栅的反射率不仅与入射光自身的 TE、TM 分量有关,还与入射角 θ 和光栅自身参数(如:材料折射率、周期、占空比)有关,因此可以通过优化相关的参数来提高对应波长入射光的反射率。

在 VCSEL 中,谐振腔对上下反射镜的反射率要求很高,衡量反射镜性能的品质因子 Q 可以表示^[9]为:

$$Q = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{1}{N} \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\text{TM}}(\lambda) g(\lambda), \quad (3)$$

式中右边是对应各点 TM 反射率的高斯加权平均。由(3)式可知,对于反射镜而言,其品质因子与高反射率带宽的大小以及中心波长的位置密切相关,当中心波长固定时反射带越宽、反射率越高,则品质因子越高。必须注意的是,由于 VCSEL 的谐振腔很短,导致反射损耗比较大,因此对反射镜的要求很高(反射率一般要大于 99.5% 才能满足激射条件)。因此在参数设计时必须考虑带宽大小与反射率、中心波长之间的相互影响。

本文采用了一维条形光栅,所以反射波具有偏振选择性,这对于 VCSEL 来说很有利(比如:偏振稳定性强、单纵模工作稳定性高,不容易出现跳模情况)。反射镜衬底材料具有广泛的可选性,可以根据反射效果来选取合适的衬底,在必要时也可以选择金属作为衬底材料。在亚层底部,由一对 DBR(使用 Si 和 SiO_2) 和 GaSb 衬底(衬底折射率为 3.90)组成,用于构成高对比度亚波长光栅的基底。这一层 DBR 带来很大的反射率带宽,但是因为只有一层,所以反射率并不是很高;另一方面,单层光栅在提供高反射率的同时带宽相对较小,以至于这两者之间可以在高反射率和宽带宽上实现相互补充,同时作为亚层的 SiO_2 层在这两者之间充当了相位匹配层。具体结构如图 1 所示。这种由单对 DBR 和一层光栅构成的结构具有偏振选择性,使得其在目标波长周围具有宽带宽高反射率特性。

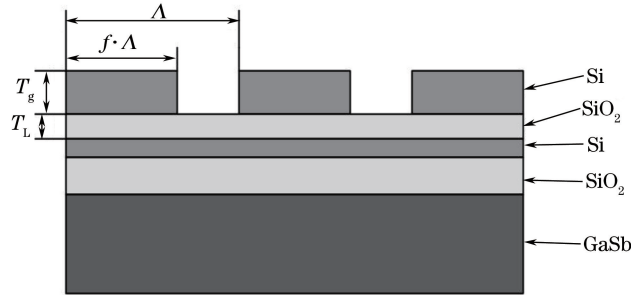


图 1 高对比度亚波长光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a high-contrast subwavelength grating

使用控制变量法进行参数讨论,每次只设定一个变量,具体讨论每个参数对高反射带($R > 99.9\%$)的影响,并且找出结构中其他参数确定时相应参数所允许的制造误差。

3 分析与讨论

光栅周期对高反射波带的影响较大,尤其是中心波长的位置。如图 2 所示,光栅周期的增加使高反射波带向着长波长漂移,同时高反射带宽的大小也随之改变。在整个周期增大过程中,位于最右侧的主反射带左边依次出现过 3 个小反射带,最初形成的小反射带与主反射带发生明显的合并与分离;从总体上看,这是一个反射带的形成与分裂过程。出现这个现象的原因是 DBR 形成的反射峰不变,光栅周期改变使得光栅衍射峰改变,从图中可以看出波长 $\lambda_0 = 2.0 \mu\text{m}$ 所在的高反射率带宽对应的光栅周期大约在 $0.78 \sim 0.85 \mu\text{m}$ 之间。

图 3 所示为光栅厚度对反射率的影响,可知存在两个高反射带,位于图中上方较小的反射带在出现之后与下方更宽的反射带先发生合并,随之又迅速分离,更宽的反射带在向着长波长移动一段距离后迅速缩小并消失。另外,位于下方更宽的高反射带在最初时,带宽宽度随着厚度的增加而增加,当厚度在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右带宽宽度达到最优并且暂时趋于平缓(通过模拟可以得知大约在 $0.47 \sim 0.52 \mu\text{m}$ 之间趋于平缓)。该厚度采用多种沉积技术,如化学气相沉积等,较为容易精确控制。

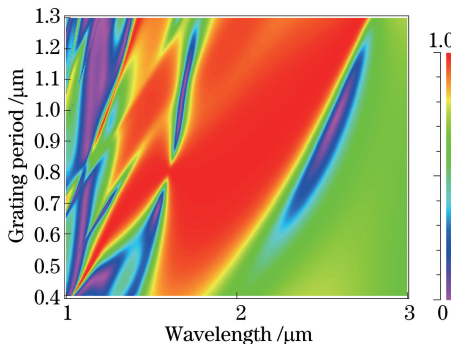


图 2 光栅周期与波长对应的反射率

Fig. 2 Reflectivity as a function of grating period and wavelength

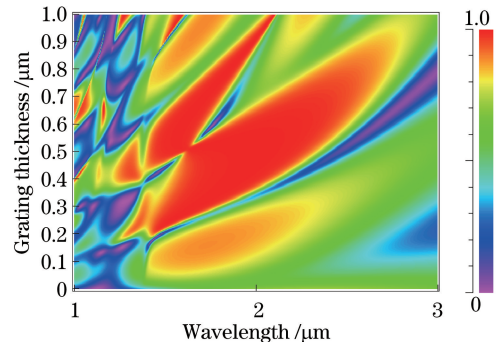


图 3 光栅厚度与波长对应的反射率

Fig. 3 Reflectivity as a function of grating thickness and wavelength

在图4中,随着占空比逐渐增大,位于右侧的大反射带存在一个逐渐增大后缓慢缩小的过程,而且当占空比较小反射带在距离 $2\ \mu\text{m}$ 较远的短波长处。另外,图中存在的两个显著的反射带中,在 $1.4\ \mu\text{m}$ 处产生的反射带随着占空比的增加逐渐地融合到右侧的主反射带,随着占空比的持续增大又迅速分离出来,并且反射率逐渐降低。在占空比 $0.68\sim 0.73$ 处形成了一个宽而平整的高反射带($R>99.9\%$)。

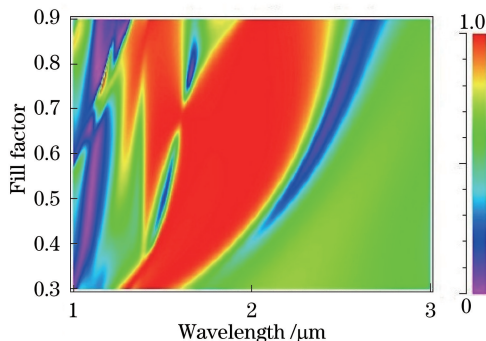


图4 占空比与波长对应的反射率

Fig. 4 Reflectivity as a function of fill factor and wavelength

最后讨论了亚层厚度对反射谱的影响,如图5所示。从图中可以看到,在一个很大的变化范围内,当亚层厚度大于 $0.07\ \mu\text{m}$ 时,所有的高反射带都把 $\lambda_0=2.0\ \mu\text{m}$ 包含在内,但是带宽宽度和中心波长与亚层厚度有着紧密的联系;在亚层厚度增加的过程中产生了几反射带,都随着亚层厚度的增加向长波长缓慢移动并且发生合并。以 $0.07\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 为例,亚层厚度在 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 的范围内带宽宽度达到 $170\ \text{nm}$ 以上($R>99.9\%$),并且在 $0.25\ \mu\text{m}$ 时达到最大值 $190\ \text{nm}$ 。由图可以看出,在保持中心波长不变和带宽宽的基础上,亚层厚度可以是 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 之间的任意一个值,因此亚层允许存在很大的制作误差。

基于讨论结果,选取一组数据,设计了一种用于 $2\ \mu\text{m}$ VCSEL的TM偏振亚波长光栅反射镜,具体参数为: $T_g=0.5\ \mu\text{m}$, $\Lambda=0.818\ \mu\text{m}$, $f=69.7\%$, $T_L=0.25\ \mu\text{m}$ 。图6为垂直于光栅表面入射情况下TM波的反射谱。反射率 $R>99\%$ 的波带范围是 $1.65\sim 2.18\ \mu\text{m}$,带宽宽度与中心波长比值 $\Delta\lambda/\lambda=26.5\%$ 。在 $1.895\sim 2.08\ \mu\text{m}$ 很宽的范围内,反射率均达到 99.9% 以上,高反射带宽达到了 $185\ \text{nm}$ 。同时,在此范围内,TE模的反射率低于VCSEL的激射条件(最大反射率 94.2%)。

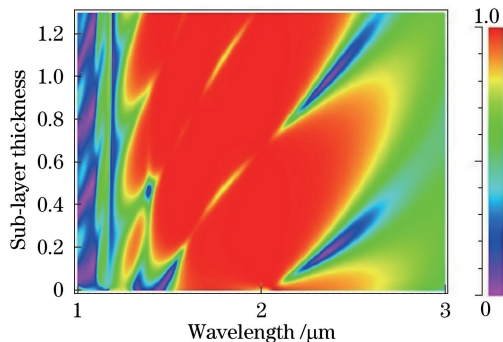


图5 亚层厚度与波长对应的反射率

Fig. 5 Reflectivity as a function of sub-layer thickness and wavelength

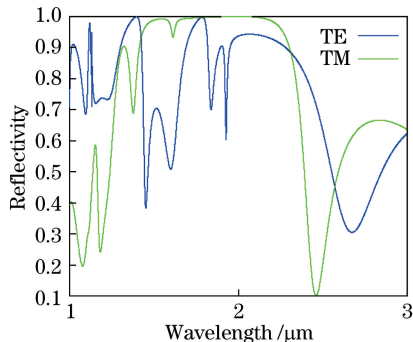


图6 垂直于光栅表面入射情况下的反射率谱

Fig. 6 Reflectivity spectra at the condition of vertical incidence on the grating surface

4 结 论

采用严格耦合波方法,设计了一种具有较大制作容差的用于 $2\ \mu\text{m}$ VCSEL的TM偏振亚波长光栅反射镜,讨论了各参数对反射谱的作用规律。设计的反射镜在TM波正入射时,在中心波长 $2.0\ \mu\text{m}$ 处具有很宽的高反射带。反射率 $R>99\%$ 时, $\Delta\lambda/\lambda=26.5\%$;波长为 $1.895\sim 2.08\ \mu\text{m}$ 时,反射率均达到 99.9% 以上,高反射带宽达到了 $185\ \text{nm}$ 。该反射镜由于允许较大的制作容差,更有利于实现在VCSEL上的单片集成。

参 考 文 献

- [1] Chen J, Hangauer A, Strzoda R, *et al.* VCSEL-based calibration-free carbon monoxide sensor at 2.3 μm with in-line reference cell[J]. Applied Physics B, 2011, 102(2): 381-389.
- [2] Babic D I, Dubble J J, Mirin R P, *et al.* Long-wavelength vertical-cavity lasers [C]. San Francisco: International Electron Devices Meeting, IEDM, Technical Digest, 1994, 32(18): 757-760.
- [3] Zhang R, Wang Y F, Zhang Y J, *et al.* Broadband and polarization-insensitive subwavelength grating reflector for the near-infrared region[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(2): 6-8.
- [4] Yuan Hui, Zhou Jin, Wang Xiaowei, *et al.* Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(9): 795-800.
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.
- [5] Guan Baolu, Zhang Jinglan, Ren Xiujuan, *et al.* Micro-nano-optical machine system tunable wavelength vertical cavity surface emitting lasers with wide tunable range[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 262-265.
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.
- [6] Li G S, Yuen W, Chang-Hasnain C J. Wide and continuously tunable (30 nm) detector with uniform characteristics over tuning range[J]. Electronics Letters, 1997, 33(13): 1122-1124.
- [7] 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.
- [8] Hu Jinhua, Liu Xiuhong, Zhao Jijun, *et al.* Design and analysis of optical filter based on subwavelength high-contrast grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050502.
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.
- [9] Liu Ying, Cui Jie, Yao Guozheng, *et al.* Study on diffraction, anti-reflection and transmission enhancement of subwavelength relief gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0205001.
刘 影, 崔 杰, 姚国政, 等. 亚波长浮雕光栅的衍射和抗反射及增透研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0205001.
- [10] Jiang Yanxiu, Han Jian, Li Wenhao, *et al.* Characteristic analysis for different beamsplitters of the plane holographic grating lithography system[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 241-247.
姜岩秀, 韩 建, 李文昊, 等. 平面全息光栅曝光系统中的分光器件特性分析[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 241-247.
- [11] Mateus C F R, Huang M C Y, Deng Y, *et al.* Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwave-length grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 518-520.
- [12] Wang Ning, Shao Jianda, Yi Kui, *et al.* Impact of evaporation characteristics of SiO_2 on uniformity of thin-film thickness[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2051-2056.
王 宁, 邵建达, 易 葵, 等. SiO_2 材料蒸发特性对膜厚均匀性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2051-2056.
- [13] Chevallier C, Fressengeas N, Genty F, *et al.* Optimized sub-wavelength grating mirror design for mid-infrared wavelength range[J]. Applied Physics A, 2011, 103(4): 1139-1144.
- [14] Chang-Hasnain C J, Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics [J]. Advances in Optics and Photonics, 2012, 4(3): 379-440.
- [15] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 811-818.