

引用格式: WANG Haijing, WANG Jun, LI Jiachen, et al. Ultra-thin Photonic Crystal Mirror for Vertical-cavity Surface-emitting Lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0914002

王海静, 王俊, 李家琛, 等. 用于垂直腔面发射激光器的超薄光子晶体反射镜[J]. 光子学报, 2022, 51(9):0914002

# 用于垂直腔面发射激光器的超薄光子晶体反射镜

王海静<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 李家琛<sup>1</sup>, 肖春阳<sup>1</sup>, 贾艳星<sup>1</sup>, 明蕊<sup>1</sup>, 马博杰<sup>1</sup>, 刘倬良<sup>1</sup>,  
刘凯<sup>1</sup>, 白一鸣<sup>2</sup>, 黄永清<sup>1</sup>, 任晓敏<sup>1</sup>

(1 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**提出了一种光子晶体反射镜作为垂直腔面发射激光器的 P 面反射镜, 并分析了其反射特性。为了设计在 850 nm 波段具有高反射率和宽带宽的光子晶体反射镜, 采用三维时域有限差分法对光子晶体反射镜的结构参数进行计算优化。结果表明, 当二维光子晶体结构的气孔半径为 84 nm, 周期为 212 nm, 高度为 90 nm 时, 对应 TE 光学模式的高反射率( $R \geq 99.5\%$ )带宽为 106 nm, 与中心波长之比为 12.5%; 同时对于 TM 光学模式的反射率低于 80%, 具有较宽的偏振选择性。并且光子晶体反射镜薄, 串联电阻小, 没有氧化物引入的电阻和应力问题。因此, 提出的新型光子晶体反射镜可替代传统垂直腔面发射激光器的 P 型分布布拉格反射镜, 提供高反射率和宽带宽, 并提高器件的光电性能。

**关键词:**垂直腔面发射激光器; 光子晶体反射镜; 时域有限差分法; 分布布拉格反射镜; 二维光子晶体; 宽带宽

中图分类号: O472

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225109.0914002

## 0 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 因其低功耗、阈值电流低、易与光纤耦合、功率转换效率高等优点, 被广泛应用于光通信、光互连和光信息处理中。

传统 VCSEL 主要由 N 型分布布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR)、量子阱有源区、P 型 DBR 三部分构成。由于 VCSEL 的谐振腔长度较短, 所以要求它的反射镜具有极高的反射率 (一般反射率  $R \geq 99.5\%$ )。因此, DBR 的对数通常为 20~40 对, 但是 DBR 对数的增加, 又会使整个器件串联电阻增大, 特别是 P 型 DBR, 其形成的同型异质结在界面处存在较大的势垒, 会产生更高的串联电阻和严重的发热情况, 从而导致 VCSEL 整个器件内部的温度较高, 影响器件的性能<sup>[1]</sup>。因此, 从减小反射镜厚度使串联电阻降低的角度出发, 设计新型 P 面反射镜是提高 VCSEL 整体性能的有效途径。

针对传统 VCSEL 中 P 面反射镜存在的问题, 目前提出的解决方法主要是利用亚波长光栅结构作为 P 面反射镜。2007 年, HUANG M C Y<sup>[2]</sup> 首次成功制备了高对比度亚波长光栅 (High Contrast Grating, HCG) 作为反射镜的 VCSEL, 结构中使用 4 对 DBR 补偿了 HCG 反射率的不足, 但是由于 DBR 的引入降低了器件的偏振选择性。2015 年, 李秀山等<sup>[3]</sup> 报道了适用于 850 nm 的 SiO<sub>2</sub> 和 Si 结构的亚波长光栅, 并利用有限元分析软件进行了模拟计算, 在 825~878 nm 之间的反射率大于 99.5%。但是, 这种 P 面反射镜的高反射率带宽

**基金项目:**国家自然科学基金 (Nos.61874148, 61974141), 国家重点研发计划重点专项课题 (No.2018YFB2200104), 国家自然科学基金创新研究群体项目 (No.62021005), 北京市科技计划课题 (No.Z191100004819012), 北京市自然科学基金 (No.4212055), 高校学科创新引智计划 (No.BP0719012, 111 基地)

**第一作者:**王海静 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器。Email: whj0910@bupt.edu.cn

**导师:**王俊 (1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为直接外延 III-V/Si 材料及硅基激光器材料制备、III-V 族半导体光电子器件材料 MOCVD 和 MBE 制备。Email: wangjun12@bupt.edu.cn

**收稿日期:**2022-03-10; **录用日期:**2022-04-29

<http://www.photon.ac.cn>

( $R \geq 99.5\%$  时对应的波长范围)较小,器件制备的容差性较差。2020年,王凤玲等<sup>[1]</sup>设计制备了一种适用于850 nm波长GaAs基VCSEL的P面HCG反射镜。整体结构采用GaAs材料体系, $\text{AlO}_x$ 和GaAs分别作为低折射率层和高折射率层,并在低折射率层上设计了应力缓冲层,反射率大于99.9%的带宽为91 nm。但是HCG反射镜的氧化层会使反射镜的串联电阻增加和引入应力等。为了解决应力问题,有研究<sup>[1]</sup>提出引入应力缓冲层,但应力缓冲层的引入导致HCG整体厚度增加,影响散热效果。

为了解决传统VCSEL中P面反射镜的高串联电阻造成的严重发热和HCG反射镜中的氧化层带来的高电阻、应力等问题。本文提出一种新型光子晶体反射镜,并采用三维时域有限差分法(Three Dimensional Finite Difference Time Domain, 3D-FDTD)分析了其反射特性。详细研究了二维光子晶体结构中气孔半径、周期、高度等结构参数对反射谱的影响。最优化二维光子晶体层中的气孔半径为84 nm,周期为212 nm,高度为90 nm。光子晶体反射镜的整体厚度为338 nm,是传统P型DBR反射镜厚度的12.4%,并且其热导率比DBR反射镜提高了46%,所以光子晶体反射镜有利于散热,降低吸收损耗,提高器件的光学性能。除此之外,它的光子晶体结构刻蚀深度比较小,并且存在着很强的光学限制,所以几乎不会对串联电阻和电流密度产生影响<sup>[4]</sup>,还有利于进一步降低激光器的阈值电流密度<sup>[5]</sup>,也避免了高铝化合物氧化生成 $\text{AlO}_x$ 后因体积收缩带来的应力问题。光子晶体反射镜代替VCSEL中P型DBR,对提高器件性能具有重要意义,可促进VCSEL在光通信、光互连和光信息处理等领域的发展。

## 1 结构设计及仿真模型

针对波长850 nm GaAs基VCSEL设计了一种新型光子晶体反射镜来代替VCSEL中的P型DBR,其结构主要包括GaAs光栅层、GaAs间隔层、 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 二维光子晶体层,如图1所示。对于这种类似二维光子晶体结构的制备方法,已有京都大学<sup>[6-8]</sup>和新墨西哥大学<sup>[9]</sup>等研究组进行了报道。

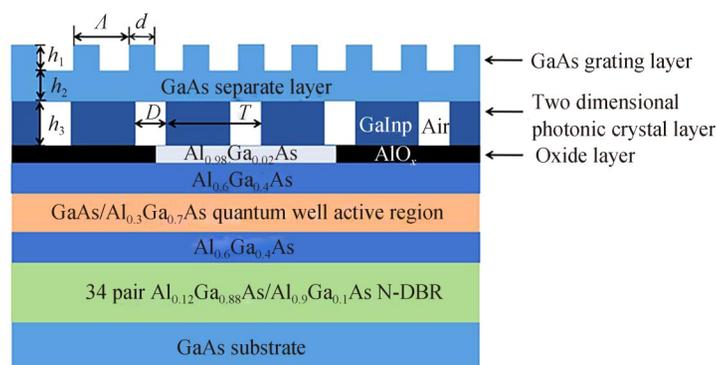


图1 具有光子晶体反射镜的垂直腔面发射激光器

Fig. 1 VCSEL with photonic crystal mirror

本文主要通过研究分析光子晶体反射镜的反射谱是否满足VCSEL的激射条件验证其是否可作为VCSEL的P面反射镜。首先优化二维光子晶体层的参数,包括气孔直径 $D$ 、周期 $T$ 和高度 $h_3$ ,再优化光栅结构参数,包括光栅的周期 $\Lambda$ 、占空比 $d/\Lambda$ 、高度 $h_1$ ,最后优化光栅层与二维光子晶体层之间的间隔层厚度 $h_2$ ,如图1。光栅单个周期内的二维光子晶体结构排布,如图2。由于电流限制氧化孔容易产生光学损耗,因此将氧化层放在光场驻波波腹处,以降低光损耗<sup>[10]</sup>,如图3。

本文采用有限差分法3D-FDTD研究了850 nm波段的TE和TM光学模式入射下光子晶体反射镜的反射谱。在波长850 nm处,空气、GaAs和 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 等材料的复折射率分别为1, 3.675+

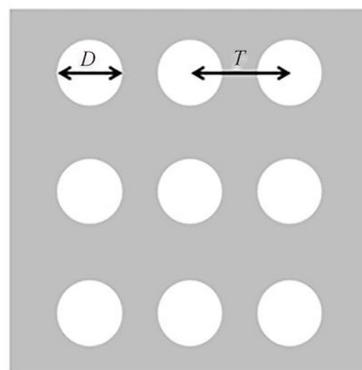


图2 二维光子晶体层的俯视图

Fig. 2 Top view of 2D photonic crystal layer

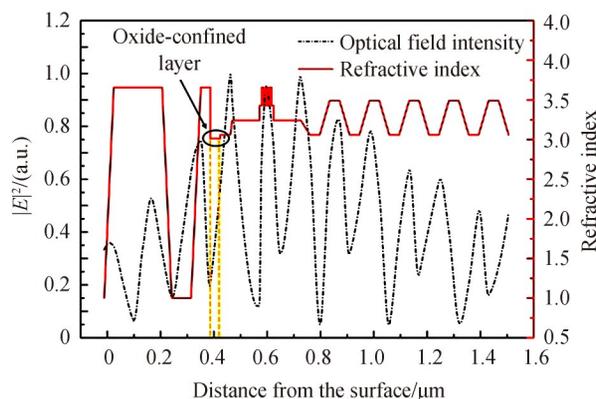


图3 光子晶体反射镜的光场强度和折射率分布示意

Fig. 3 Optical field intensity and refractive index of the photonic crystal layer

0.05i 和  $3.18+0.1i$ 。考虑到计算机存储量和计算时间限制,对FDTD仿真参数进行如下设置:采用完美匹配层吸收边界和周期性边界条件,来终止FDTD计算窗口,使电磁波在无反射地进入边界处吸收介质后被衰减掉;为保证计算结果准确,将网格精度设置为2.5 nm,仿真时间设置为1 000 fs;然后,分别采用中心波长为850 nm,波长范围为600~1 200 nm的TE和TM光学模式,从有源区入射再从光子晶体反射镜的光栅层出射;最后分别计算TE和TM光学模式入射下的光子晶体反射镜的反射谱。

## 2 分析与讨论

为了保证光子晶体反射镜作为P面反射镜的VCSEL能够实现850 nm波长的激射,需要新型光子晶体反射镜在以850 nm为中心波长的波段内都有高反射率。

二维光子晶体层中气孔的半径、周期、高度、光栅层和间隔层等结构参数都会对光子晶体反射镜的反射谱有影响。为了使光子晶体反射镜在TE光学模式下的850 nm波段有较高的高反射率带宽,需要采用控制变量法对光子晶体反射镜的各个参数进行仿真计算,并确定各个结构最优参数。目前本课题组已对光栅结构做了大量研究工作,为本结构中光栅初始参数的选取提供了参考。因此,为了减少工作量,先优化二维光子晶体再优化光栅结构。

为了研究二维光子晶体层的作用,对比分析了有、无二维光子晶体层即 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 层有、无气孔结构时反射镜的反射谱,如图4。在相同TE光学模式入射下,可清楚地看出具有二维光子晶体层的光子晶体反射镜的高反射率带宽更宽。因为二维光子晶体结构会使 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料层的等效折射率降低,从而光栅层与二维光子晶体层形成较大的折射率差,最终实现高反射率带宽的扩展。

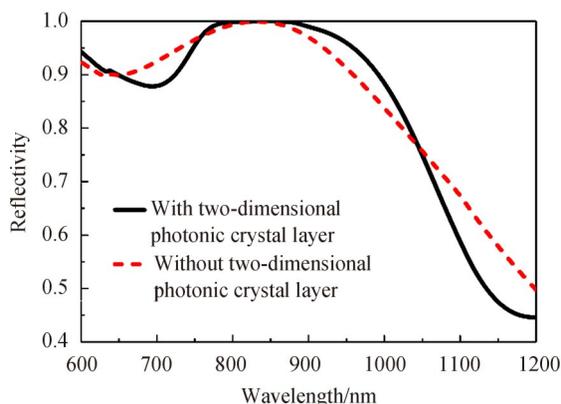


图4 有、无二维光子晶体层时TE光学模式对应的反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of TE optical mode with the two-dimensional photonic crystal structure and without two-dimensional photonic crystal structure

首先,对二维光子晶体层进行优化。对于二维光子晶体层,主要研究二维光子晶体层中气孔半径、周期和高度对各个波长对应的反射率的影响。

初步设定光栅周期为 600 nm, 占空比为 15%, 厚度为 150 nm, 间隔层为 80 nm, 二维光子晶体层中的气孔半径为 60 nm, 高度为 85 nm, 周期变化范围为 125~260 nm, 如图 5。图 5 中, 实线轮廓内的反射率大于 99.5%。随着二维光子晶体结构周期的增大, 高反射率带宽的中心波长会向长波长方向移动, 同时随着周期从 125 nm 到 140 nm (图 5 的  $A_1$ ), 高反射率带宽变化比较明显, 从 0 nm 增大到 29 nm, 然后高反射率带宽大小基本稳定增加, 最后从 200 nm (图 5 的  $B_1$ ) 至 260 nm 时高反射率带宽先从 75 nm 增大到 96 nm 再减小到 70 nm。同时, 周期的大小影响着气孔的大小, 气孔边界之间的距离若太小, 不利于结构的工艺制备, 考虑到光栅周期, 避免光栅周期边界处气孔间距太小。因此, 二维光子晶体结构的周期设计为 212 nm。

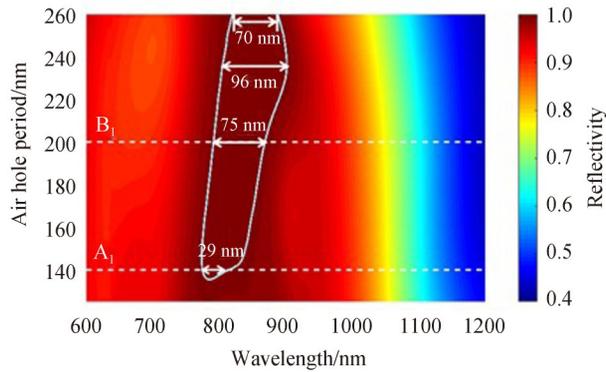


图 5 二维光子晶体结构周期与波长对应的反射率的关系

Fig. 5 Reflectivity as function of the height of the period of the hole in the two-dimensional photonic crystal structure and wavelength

根据图 5 的计算结果, 将二维光子晶体层中的气孔周期确定为 212 nm, 调节气孔半径从 25 nm 到 85 nm, 气孔高度为 85 nm, 研究光子晶体反射镜的反射谱, 其中光栅周期为 600 nm, 占空比为 15%, 厚度为 150 nm, 间隔层为 80 nm。图 6 中两条虚线分别表示反射率 99.5% 的边界, 它们之间的区域反射率大于 99.5%, 则虚线之间的距离表示高反射率带宽。随着二维光子晶体层中气孔半径的增大, 虚线的间距不断增大, 即高反射率带宽逐渐增加。高反射率带宽不断增大, 是由于气孔的增大会使其所在的  $Ga_{0.5}In_{0.5}P$  层的等效折射率降低。当二维光子晶体结构周期一定时, 气孔较大 会导致相邻气孔的边界间距较小, 工艺难度增大, 所以气孔半径最大设定为气孔周期的 0.4 倍。因此, 最优化的二维光子晶体层中的气孔半径大小为 84 nm。

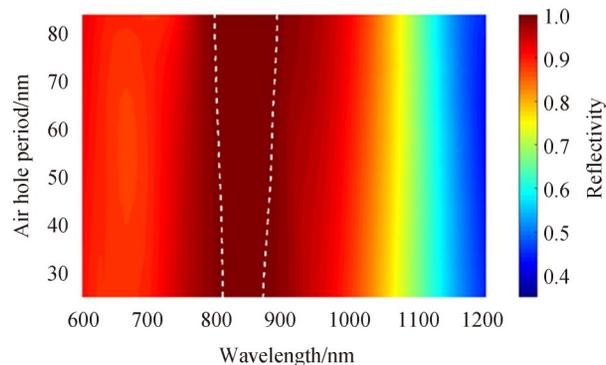


图 6 二维光子晶体结构中的气孔半径与波长对应的反射率的关系

Fig. 6 Reflectivity as function of the height of the radius of the hole in the two-dimensional photonic crystal structure and wavelength

经过二维光子晶体层中气孔周期和半径的优化, 气孔周期和半径定为 212 nm 和 84 nm, 设置气孔高度从 0 nm 到 150 nm, 光栅周期为 600 nm, 占空比为 15%, 厚度为 150 nm, 间隔层为 80 nm, 研究光子晶体反射

镜的反射谱。在图7中可以发现,随着二维光子晶体层中气孔高度的增大,高反射率带宽的中心波长先向长波长方向移动,然后再向短波长方向移动,并且高反射率带宽从气孔高度由57 nm(图7的A<sub>2</sub>)增加到97 nm(图7的B<sub>2</sub>)后基本稳定不变。最后考虑到高反射率带宽的大小和高反射率带宽的中心波长应为850 nm,二维光子晶体层中气孔的高度设计为90 nm。

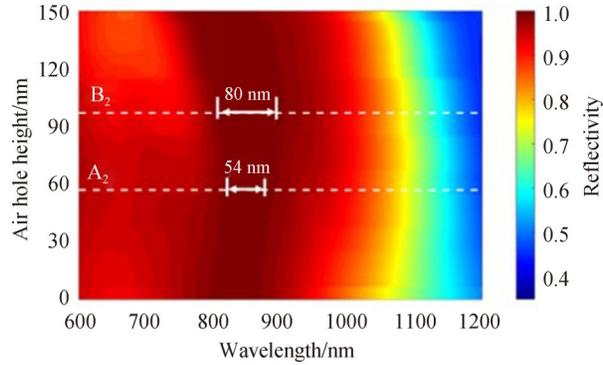


图7 二维光子晶体结构中气孔高度与波长对应的反射率的关系

Fig. 7 Reflectivity as function of the height of the hole in the two-dimensional photonic crystal structure and wavelength

将二维光子晶体层的参数确定后,进一步优化光栅层和其与二维光子晶体层之间的间隔层参数。首先,对比分析有、无光栅层时光子晶体反射镜的反射谱,从图8中可以明显地看出光栅层可以提高波长的反射率。结合图4中无二维光子晶体层的反射谱和图8的反射谱,可知光栅层仅使850 nm波长在内的短波段(805~860 nm)的反射率提高到了99.5%以上,而反射率带宽的扩展由二维光子晶体层实现。

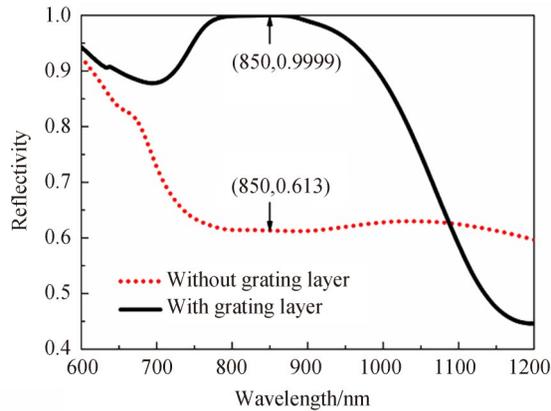


图8 有、无光栅层时TE光学模式对应的反射谱

Fig. 8 Reflection spectra of TE optical mode with the grating layer and without the grating layer

在二维光子晶体层参数优化之后,气孔周期、半径和高度定为212 nm、84 nm和90 nm,然后优化光栅参数。从图9可以看出,VCSEL的中心波长决定光栅的周期,周期的增加会使高反射带向长波长方向漂移,高反射率带宽的大小也会发生改变,在周期为620~750 nm(图9的A<sub>3</sub>~B<sub>3</sub>)时,850 nm波段的反射率均大于99.5%,最终将光栅周期设计为636 nm,厚度为162 nm,占空比为16.35%。

经过二维光子晶体层和光栅层参数优化后,气孔周期、半径和高度定为212 nm、84 nm和90 nm,光栅周期确定为636 nm,厚度为162 nm,占空比为16.35%,设置间隔层范围为0~300 nm,研究光子晶体反射镜的反射谱。图10显示了二维光子晶体层与光栅层之间的间隔层厚度对各波长反射率的影响。随着间隔层厚度的增加,高反射率带宽的中心波长逐渐向短波长方向移动,高反射率带宽大小出现周期性变化。间隔层厚度的取值范围为60~100 nm(图10的A<sub>4</sub>~B<sub>4</sub>)时,可以使850 nm波段的反射率大于99.5%,考虑到结构整体厚度要尽量薄,所以间隔层需要适中的厚度,因此,最后间隔层厚度设计为86 nm。

基于上述分析,确定了光子晶体反射镜的结构参数。图11为TE和TM光学模式垂直入射时的反射谱。

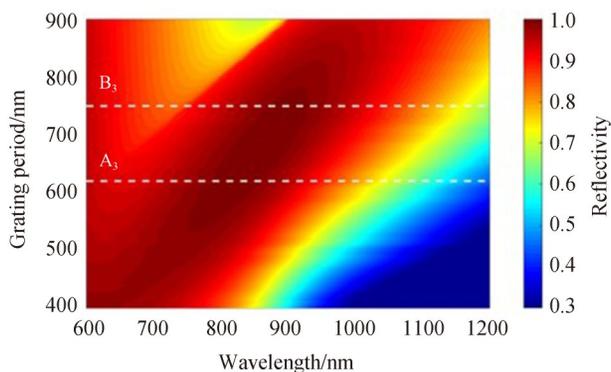


图9 光栅周期与波长对应的反射率的关系

Fig.9 Reflectivity as function of the grating period and wavelength

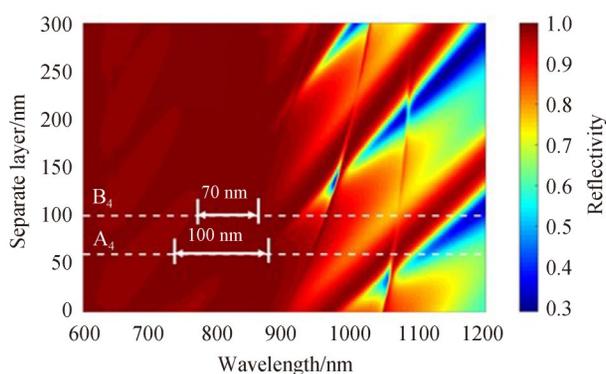


图10 间隔层厚度与波长对应的反射率的关系

Fig. 10 Reflectivity as function of the separate layer thickness and wavelength

在TE光学模式入射时,反射率大于99.5%的波段范围为781~887 nm,高反射率带宽与中心波长之比为12.5%,中心波长850 nm的反射率为99.99%,满足VCSEL的激射条件。而TM光学模式在781~887 nm波段范围内的反射率最大为80%,无法满足VCSEL的激射条件。因此,光子晶体反射镜不仅具有高反射率带宽还具有良好的偏振选择性。同时,光子晶体反射镜整体厚度为338 nm,是HCG反射镜<sup>[1]</sup>厚度的61.7%,传统VCSEL P型DBR反射镜厚度的12.4%。此外,通过对光子晶体反射镜和DBR反射镜的等效热导率计算<sup>[11-15]</sup>,得出光子晶体反射镜比DBR反射镜等效热导率提高了46%,所以光子晶体反射镜有利于散热,降低吸收损耗,提高器件的光学性能。

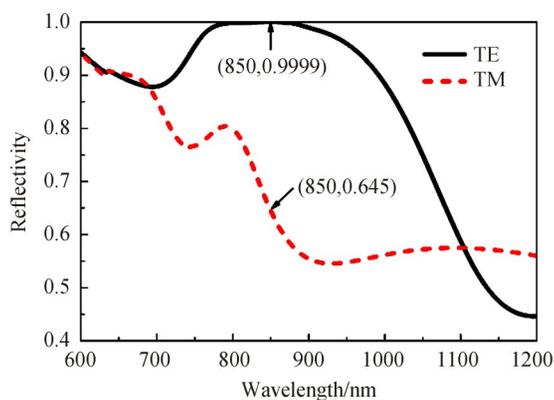


图11 TE和TM光学模式对应的反射谱

Fig. 11 Reflection spectra of TE and TM optical modes

### 3 结论

本文提出了一种不同于DBR反射镜和HCG反射镜的超薄光子晶体反射镜。通过3D-FDTD方法对光子晶体反射镜的反射谱进行了计算优化,结果表明,当二维光子晶体层中的气孔高度、半径、周期分别为90 nm、84 nm、212 nm时,TE光学模式下的高反射率带宽为106 nm,是SiO<sub>2</sub>/Si结构的亚波长光栅反射镜<sup>[3]</sup>高反射率带宽的2倍,并且中心波长850 nm的反射率为99.99%,满足VCSEL的激射条件。而TM光学模式下的反射率都低于80%,因此还有稳定的偏振特性。光子晶体反射镜不仅具有高反射率带宽和单偏振特性,且

整体结构薄,厚度只有 338 nm。其厚度是传统 VCSEL P 面反射镜的 12.4%,有利于降低吸收损耗。因此,可作为 VCSEL 的 P 面反射镜,促进其在光通信、光互连和光信息处理等领域的发展。

#### 参考文献

- [1] WANG Fengling, CHEN Lei, ZHANG Qiubo, et al. Design of high contrast subwavelength gratings with GaAs-based VCSEL materials[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(1): 19-24.  
王凤玲,陈磊,张秋波,等.与 GaAs 基 VCSEL 同材料体系高对比度亚波长光栅的设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(1): 19-24.
- [2] HUANG M C Y, ZHOU Y, CHANG-HASNAIN C J, et al. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(5): 297-297.
- [3] LI Xiushan, NING Yongqiang, ZHANG Xing, et al. Influence of grating parameters on reflectivity of Si/SiO<sub>2</sub> high contrast gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(7): 806-810.  
李秀山,宁永强,张星,等. Si/SiO<sub>2</sub> 高对比光栅参数对反射率的影响[J]. *发光学报*, 2015, 36(7): 806-810.
- [4] WANG Baoqiang, XU Chen, LIU Yingming, et al. Study on current spreading of photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2010, 59(12): 8542-8547.  
王宝强,徐晨,刘英明,等.光子晶体垂直腔面发射激光器的电流分布研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(12): 8542-8547.
- [5] ITOH Y, KONO N, FUJIWARA N, et al. Continuous-wave lasing operation of 1.3- $\mu\text{m}$  wavelength InP-based photonic crystal surface-emitting lasers using MOVPE regrowth[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35483.
- [6] YOSHIDA M, ZOYSA M D, ISHIZAKI K, et al. Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams[J]. *Nature Materials*, 2019, 18(2): 121-128.
- [7] DE ZOYSA M, YOSHIDA M, KAWASAKI M, et al. Photonic crystal lasers fabricated by MOVPE based on organic arsenic source[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(20): 1739-1742.
- [8] YOSHIDA M, KAWASAKI M, DE ZOYSA M, et al. Fabrication of photonic crystal structures by tertiary-butyl arsine-based metal-organic vapor-phase epitaxy for photonic crystal lasers[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(6): 062702.
- [9] REILLY K J, KALAPALA A, YEOM S, et al. Epitaxial regrowth and hole shape engineering for photonic crystal surface emitting lasers (PCSELs)[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 535: 125531.
- [10] DEMEULENAERE B, BIENSTMAN P, DHOEDT B, et al. Detailed study of AlAs-oxidized apertures in VCSEL cavities for optimized modal performance[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(3): 358-367.
- [11] HAN Xiaoming, YANG Dexing, ZHAO Jianlin, et al. Thermal effect in high-power Yb<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2822-2826.  
韩晓明,杨德兴,赵建林,等.掺镱大功率光子晶体光纤激光器热效应分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2822-2826.
- [12] NAKWASKI W. Thermal conductivity of binary, ternary, and quaternary III-V compounds [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(1): 159-166.
- [13] OSINSKI M, NAKWASKI W. Effective thermal conductivity analysis of 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP vertical-cavity top-surface-emitting microlasers[J]. *Electronics Letters*, 1993, 11(29): 1015-1016.
- [14] LEE H K, SONG Y M, LEE Y T, et al. Thermal analysis of asymmetric intracavity-contacted oxide-aperture VCSELs for efficient heat dissipation[J]. *Solid-State Electronics*, 2009, 53(10): 1086-1091.
- [15] LI Hui, JIA Xiaowei, WEI Zekun, et al. Thermal analysis and structure optimization of high-speed optical communication-VCSEL[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(11): 1516-1522.  
李惠,贾晓卫,魏泽坤,等.高速光通讯面发射激光器的热分析及优化[J]. *发光学报*, 2017, 38(11): 1516-1522.

## Ultra-thin Photonic Crystal Mirror for Vertical-cavity Surface-emitting Lasers

WANG Haijing<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, LI Jiachen<sup>1</sup>, XIAO Chunyang<sup>1</sup>, JIA Yanxing<sup>1</sup>, MING Rui<sup>1</sup>,  
MA Bojie<sup>1</sup>, LIU Zhuoliang<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, BAI Yiming<sup>2</sup>, HUANG Yongqing<sup>1</sup>, REN Xiaomin<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100876, China)

(2 State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric  
Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A new type of photonic crystal mirror was proposed as the P-side mirror of the vertical-cavity surface-emitting laser, and the reflection characteristics of the photonic crystal mirror were studied and

analyzed by using the three-dimensional finite-difference time domain method. In this paper, taking 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser as an example, a photonic crystal mirror suitable for it was designed. To make photonic crystal mirrors meet the requirements of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for mirrors, it needs to have high reflectivity and wide bandwidth in the 850 nm band. The structural parameters that need to be optimized in the photonic crystal mirror include a grating layer, a two-dimensional photonic crystal layer, and a spacer layer between the grating layer and the two-dimensional photonic crystal layer. It can be seen that many structural parameters need to be optimized, so the control variable method is used to optimize the parameters. Because our research group has done a lot of research on grating structure, to reduce the amount of calculation, it is necessary to optimize the two-dimensional photonic crystal structure first and then optimize the grating structure. After optimization calculations, the optimal structural parameters of the photonic crystal mirror are that the grating period is 636 nm, the thickness is 162 nm, the duty cycle is 16.35%, the thickness of the spacer layer is 86 nm, and the air hole radius of the two-dimensional photonic crystal structure is 84 nm, the period is 212 nm, and the height is 90 nm. When the photonic crystal mirror has optimal structural parameters, its high reflectivity bandwidth in TE optical mode is 106 nm, and the ratio to the central wavelength is 12.5%. At this time, the reflectivity of the photonic crystal mirror at the center wavelength of 850 nm is greater than 99.5%. However, the reflectivity in the TM optical mode is lower than 80%, so the photonic crystal mirror not only meets the requirements of the vertical-cavity surface-emitting laser for the mirror, but also has a wide polarization selectivity. In terms of the thickness of the mirror, the overall thickness of the photonic crystal mirror is very thin. Its thickness is 338 nm, which is 12.4% of the thickness of conventional P-type distributed Bragg mirrors and 61.7% of the thickness of high-contrast subwavelength grating mirrors. In terms of thermal conductivity of materials, the equivalent thermal conductivity of the photonic crystal mirror is 46% higher than that of the distributed Bragg mirror, so the photonic crystal mirror has good equivalent thermal conductivity. Therefore, considering factors such as the thickness of the mirror and the equivalent thermal conductivity, the photonic crystal mirror is beneficial to heat dissipation and improves the optoelectronic performance of the laser. In addition, the etching depth of the photonic crystal structure of the photonic crystal mirror is relatively small, so it will hardly affect the series resistance and current density. Moreover, the two-dimensional photonic crystal structure has strong optical confinement, which is also beneficial to further reduce the threshold current density of the laser. In addition, the photonic crystal mirror also avoids the stress problem caused by volume shrinkage after oxidation of high-aluminum compounds in high-contrast subwavelength gratings to form low-refractive-index oxides. Therefore, the new photonic crystal mirror proposed in this paper can replace the P-type distributed Bragg mirror of the traditional vertical-cavity surface-emitting laser. At the same time, photonic crystal mirrors are conducive to promoting the rapid development of vertical-cavity surface-emitting lasers in optical communication, optical interconnection, and optical information processing. They also conducive to promoting vertical-cavity surface-emitting lasers to enter new application fields continuously.

**Key words:** Vertical-cavity surface-emitting lasers; Photonic crystal mirror; Finite difference time domain method; Distributed Bragg reflector; Two-dimensional photonic crystal; Wide bandwidth

**OCIS Codes:** 140.7260; 140.7270; 140.3460