

## 光子晶体垂直腔面发射激光器的设计分析

潘智鹏<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1\*</sup>, 戚宇轩<sup>1,2</sup>, 吕家纲<sup>1,2</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 仲莉<sup>1</sup>, 马晓宇<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 光子晶体垂直腔面发射激光器(PCVCSEL)是在传统的氧化限制型垂直腔面发射激光器(VCSEL)的基础上引入二维光子晶体结构的一种新型激光器,可以实现大功率的基横模输出。提出了PCVCSEL结构的合理设计方法,当归一化频率 $V_{\text{eff}}$ 位于2.405附近时实现了稳定的基横模输出。通过二维等效折射率模型分析对比了基横模PCVCSEL和缩小氧化孔径实现基横模的传统VCSEL,前者可以实现更大的横向限制并具备更宽的光场宽度。通过热电耦合模型分析了PCVCSEL的电流分布和温度分布,证明电流和热量主要集中在氧化限制孔所对应的区域。成功制备出了单模输出功率达到1.6 mW的PCVCSEL,其激光波长为932 nm。

**关键词** 激光器; 垂直腔面发射激光器; 光子晶体; 基横模; 二维等效模型; 热电耦合

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1414002

## Design and Analysis of Photonic Crystal Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Pan Zhipeng<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1\*</sup>, Qi Yuxuan<sup>1,2</sup>, Lü Jiagang<sup>1,2</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Zhong Li<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup><sup>1</sup>National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;<sup>2</sup>College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers (PCVCSEL) are the new lasers with two-dimensional photonic crystal structure based on the traditional oxide aperture confined vertical-cavity surface-emitting (VCSEL) lasers, which can achieve high-power fundamental transverse mode output. A reasonable design method for PCVCSEL structure is proposed, and a stable fundamental transverse mode output is achieved when the normalized frequency  $V_{\text{eff}}$  is around 2.405. Through the two-dimensional equivalent refractive index model, the fundamental transverse mode PCVCSEL and the traditional VCSEL with reduced oxide aperture are compared and analyzed. The former can achieve greater lateral limitation and wider optical field width. The current distribution and temperature distribution of PCVCSEL are analyzed by thermoelectric coupling model. It is proved that the current and heat are mainly concentrated in the area corresponding to the oxide confined aperture. A PCVCSEL with a single-fundamental-mode output power of 1.6 mW with a lasing wavelength of 932 nm is successfully fabricated.

**Key words** lasers; vertical-cavity surface-emitting lasers; photonic crystal; fundamental transverse mode; two-dimensional equivalent model; thermoelectric coupling

## 1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)是一种出光方向垂直于衬底表面的半导体激光器,相比其他半导体激光器,具有发散角小、耦合效率高、阈值电流低、动态单

纵模激射、可进行片上测试和成本低等优势<sup>[1-2]</sup>,被广泛用在空间光通信、激光雷达、三维传感、气体检测和泵浦源等领域中<sup>[3]</sup>。传统的VCSEL横向尺寸较大,对模式限制能力较弱,在大电流注入下存在多个横向模式分布,严重影响了器件的光束质量,限制了其在通

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-01-28; 录用日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(62174154)

通信作者: \*liwei66@semi.ac.cn

信、传感和激光雷达等领域中的进一步应用。缩小氧化孔径虽然可以实现 VCSEL 基横模输出,但是会带来串联电阻增大、发热严重和稳定性差等问题<sup>[4]</sup>。实现基横模输出的主要解决方案包括使用表面浮雕、反型波导、Zn 扩散孔径和二维光子晶体等方法<sup>[5]</sup>。其中,通过在 VCSEL 中引入光子晶体结构来实现基横模输出与其他方法相比,具有工艺更简单、可重复性高和制造容差更大的优势。光子晶体 VCSEL 是将传统的氧化限制型 VCSEL 和二维光子晶体结构相结合的一种新型激光器,可以通过氧化限制孔结构和二维光子晶体结构分别实现对载流子和光场的控制,在较大氧化孔径下可实现大功率的基横模输出,应用潜力巨大<sup>[6]</sup>。

在本文中,考虑了光子晶体的晶格常数  $a$ 、空气孔直径  $b$  和刻蚀深度  $h$  等的影响,计算了光子晶体垂直腔面发射激光器 (PCVCSEL) 的归一化频率,提出了 PCVCSEL 结构的合理设计方法,当归一化频率  $V_{\text{eff}}$  位于 2.405 附近时可以实现稳定的基横模输出。由于在分析 PCVCSEL 的模式特性时,采用三维有限差分域 (3D-FDTD) 对计算内存要求很大<sup>[7]</sup>,故通过二维等效折射率模型分析对比了基横模 PCVCSEL 和缩小氧化孔径实现基横模的传统 VCSEL,证明了前者可以实现更大的横向限制并具备更宽的光场宽度。通过热电

耦合模型分析了 PCVCSEL 的电流分布和温度分布,有源区中电流密度和温度较高的部分集中在氧化限制孔所对应的区域,模拟结果表明 PCVCSEL 可以在更大的注入电流下实现单模激射。成功制备出了晶格常数为  $a = 5 \mu\text{m}$ , 占空比为  $b/a = 0.5$ , 刻蚀深度为  $h = 2 \mu\text{m}$  的单模 PCVCSEL, 其阈值电流为 6 mA, 输出功率为 1.6 mW, 激射波长为 932 nm, 边模抑制比超过 30 dB。

## 2 光子晶体垂直腔面发射激光器的结构设计

PCVCSEL 的二维截面如图 1 所示。该结构由传统的 VCSEL 结构和二维光子晶体结构组合而成,需要通过刻蚀技术在上分布式布拉格反射镜 (DBR) 中引入带有中心点缺陷的光子晶体空气孔结构,一般采用感应耦合等离子 (ICP) 刻蚀可以获得侧壁形貌较好的空气孔结构<sup>[8]</sup>。本文利用光子晶体区域的有效波导实现模式控制,由于光子晶体区域的有效折射率要比中心缺陷区域的有效折射率低很多,故可以有效地将基横模抑制在缺陷区域内。氧化限制孔主要起到电流限制的作用,光子晶体结构的引入使得氧化限制孔对光场的限制作用减弱,在大氧化限制孔下可以实现基横模输出。

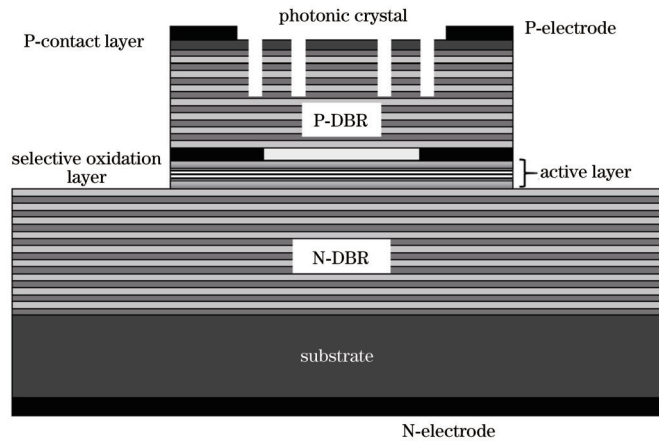


图 1 PCVCSEL 的二维截面示意图

Fig. 1 Two-dimensional cross-section diagram of PCVCSEL

对于 PCVCSEL 结构的设计主要在两个方面:1) 纵向的限制结构,即传统的氧化限制型 VCSEL 的外延结构设计。良好的 VCSEL 外延结构设计是获得高质量光子晶体 VCSEL 的前提,对于顶发射的 VCSEL 来说,P-DBR 的对数应该为 22~25,既可以获得高达 99.5% 左右的反射率,又可以保持一个相对较低的串联电阻<sup>[9-10]</sup>;2) 对于光子晶体结构的设计,主要是为了获得基横模激射,其机理在于对光子晶体区域的有效波导进行合理设计,实现对基横模的有效控制。因此,要对光子晶体晶格常数  $a$ 、空气孔直径  $b$  和刻蚀深度  $h$  进行合理调整<sup>[11]</sup>。对于 PCVCSEL,其基横模截止条件是  $V_{\text{eff}} < 2.405$ ,  $V_{\text{eff}}$  为归一化截止频率<sup>[12]</sup>,其表达式为

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - (n_{\text{eff}} - \gamma \Delta n)^2}, \quad (1)$$

式中:  $n_{\text{eff}}$  为上 DBR 层的有效折射率;  $\gamma$  为与光子晶体刻蚀深度  $h$  有关的刻蚀因子 ( $0 < \gamma < 1$ );  $\Delta n$  为光子晶体结构引起的折射率变化;  $\lambda$  为布拉格反射的中心波长。根据 Yokouchi 等<sup>[13]</sup>的计算,P-DBR 的最佳刻蚀深度一般在 15~20 对 DBR,其对应的刻蚀因子  $\gamma$  为 0.12~0.20。计算了刻蚀因子  $\gamma$  为 0.12 时,不同占空比 ( $b/a$ ) 下归一化频率  $V_{\text{eff}}$  与归一化晶格常数 ( $a/\lambda$ ) 的关系,如图 2 所示。虽然基横模截止条件是  $V_{\text{eff}} < 2.405$ ,但是如果  $V_{\text{eff}}$  太小会导致载流子注入和热效应等外部因素对光子晶体的模式调制造成干扰,使得输

出模式变得不稳定。因此,为获得稳定的单模条件,  $V_{\text{eff}}$  的参数一般选择在 2.405 附近<sup>[14]</sup>, 基于此可设计合理的光子晶体结构参数。与传统的小氧化孔径 VCSEL 实现基横模相比, PCVCSEL 在实现基横模方面有更多的结构选择。调整光子晶体结构的晶格常数  $a$ 、空气孔直径  $b$  和刻蚀深度  $h$  可使得 PCVCSEL 的归一化频率位于 2.405 附近, 从而对不同的波长实现稳定的基横模控制, 并且这种结构具有可重复制备和制作容差大的优点, 是一种用来实现高功率基横模输出的有效方式。

### 3 光子晶体垂直腔面发射激光器的模式分析

氧化限制层是通过湿法氧化制备而成的, 主要机理是高铝组分材料  $\text{Al}_{0.98}\text{GaAs}$  在高温环境下与水汽发生反应, 生成折射率较小的致密氧化膜  $\text{AlO}_x$ , 使得载流子与光子同时被限制在氧化孔区域中, 实现对电场和光场的双重限制<sup>[15]</sup>。图 3(a) 为 VCSEL 的二维等效模型, 考虑到  $\text{AlO}_x$  氧化限制层所导致的等效折射率减

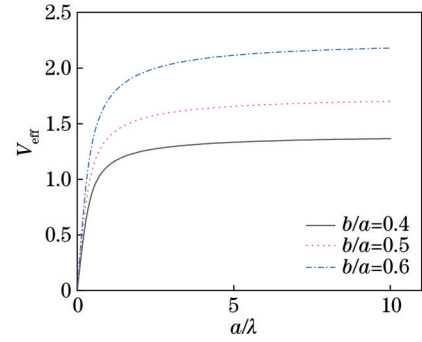


图 2 PCVCSEL 归一化频率与归一化晶格常数的关系  
Fig. 2 Relationship between PCVCSEL normalized frequency and normalized lattice constant

小<sup>[16]</sup>, 可以将二维模型分为中间折射率较大的芯区和外围折射率较小的包层, 两者之间的折射率差值 ( $n_{\text{core}} - n_{\text{cald}}$ ) 决定了  $\text{AlO}_x$  氧化限制层对模式的限制能力, 其中  $n_{\text{core}}$  和  $n_{\text{cald}}$  分别为芯区和包层的等效折射率,  $d_{\text{ox}}$  是氧化孔 (等效芯区) 的直径。

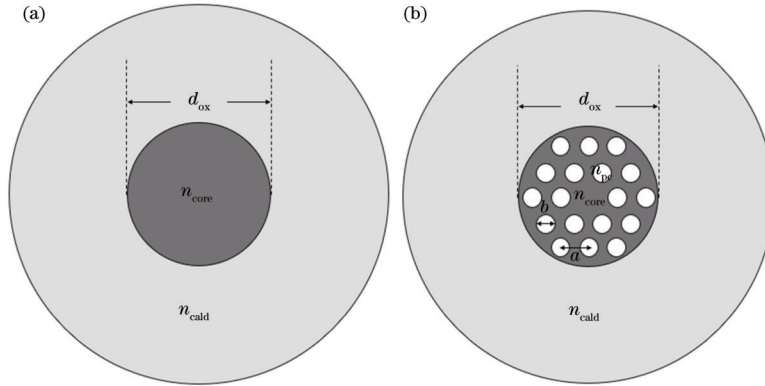


图 3 VCSEL 和 PCVCSEL 的二维等效模型。(a) VCSEL; (b) PCVCSEL  
Fig. 3 Two-dimensional equivalent models of VCSEL and PCVCSEL. (a) VCSEL; (b) PCVCSEL

根据实际的 VCSEL 结构, 建立了相应的二维等效模型, 并研究了 VCSEL 的各个横模的模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  与氧化限制孔直径  $d_{\text{ox}}$  之间的关系。图 4 是不同模式的有效折射率与氧化限制孔径之间的关系。其中,  $N=0$  这条曲线反映了基横模的模式有效折射率随氧化限制孔直径  $d_{\text{ox}}$  的变化趋势。可以明显看到, 随着氧化限制孔直径 (芯区直径)  $d_{\text{ox}}$  的增大, 基模的模式折射率逐渐接近芯区的等效折射率  $n_{\text{core}}$ , 这是因为随着芯区直径  $d_{\text{ox}}$  的增大, 包层的折射率  $n_{\text{cald}}$  对模式的影响越来越小, 进而基横模的有效折射率越来越接近  $n_{\text{core}}$ 。图 4 中的曲线  $N=1, 2, \dots, 7$  表示的是高阶横模的模式折射率与氧化限制孔直径  $d_{\text{ox}}$  之间的关系, 依然呈现氧化孔直径越大, 模式有效折射率越大的趋势。同时, 随着氧化限制孔直径  $d_{\text{ox}}$  的增大, 氧化限制层对横向模式的限制能力逐渐减弱, 使得各种高阶横模相继被激发出来。从图 4 中可以看出, 氧化限制型 VCSEL 结构的基横模截止孔径  $d_{\text{ox}}$  在  $3 \mu\text{m}$  左右, 氧化限制孔直径超过  $3 \mu\text{m}$  后高阶横便模被激发出来, 因此要想通过氧化

限制孔来实现基横模, 氧化孔的直径要小于  $3 \mu\text{m}$ 。虽然小孔径氧化限制孔光电限制能力更强, 但是制备工艺复杂, 很难通过湿法氧化精确控制, 且串联电阻特别大, 发热严重, 会使得整个器件的功率损耗更大, 导致器件的温度可靠性降低。

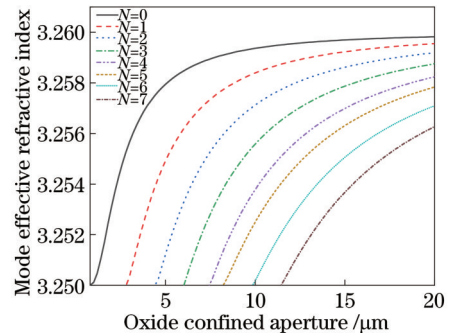


图 4 模式有效折射率与氧化限制孔径的关系  
Fig. 4 Relationship between mode effective refractive index and oxide confined aperture



为了解决上述问题,将光子晶体结构引入到 VCSEL 中,器件可以在较大的氧化限制孔径下实现基横模输出,进而提高器件的光束质量。在 PCVCSEL 中,光子晶体空气孔结构会在器件的横模中引入模式损耗,由于不同的横模分布位置不同,因此引入的模式损耗也不相同。由于所引入的高阶横模损耗要远大于基横模损耗,因此高阶横模的激射会被抑制,进而可实现器件的基横模输出<sup>[17]</sup>。如图 5 所示,计算了 PCVCSEL 横截面上的光场分布。图 5(a) 是 PCVCSEL 的基横模光场分布,明显可以看到光场主要集中在光子晶体的缺陷区域中,光子晶体空气孔造成的损耗较小。图 5(b) 是 PCVCSEL 的高阶横模分布,其模式的光场分布不如基横模集中,并且由于空气孔的作用,高阶横模的损耗较大,故高阶横模的激射阈值增大,最终可实现基横模输出。将二维光子晶体空气孔结构引入到 VCSEL 的二维等效折射率模型中,建立了 PCVCSEL 的二维等效模型,如图 3(b) 所示。考虑到光子晶体的刻蚀深度为  $M$  对 DBR, PCVCSEL 二维模型结构中被刻蚀部分的等效折射率应该为

$$n_{pc} = [(n_1 \times h_1 + n_h \times h_h) \times (P - M) + (h_1 + h_h) \times M \times n_{air}] / [(h_1 + h_h) \times P], \quad (2)$$

式中:  $n_{pc}$  是考虑空气孔的刻蚀深度后,光子晶体空气孔区域的等效折射率;  $n_1$  是 DBR 中低铝组分  $Al_xGaAs$  材料的折射率;  $h_1$  是对应的低铝组分层的厚度,  $h_1 = \lambda / (4n_1)$ ;  $n_h$  是 DBR 中高铝组分  $Al_xGaAs$  材料的折射率;  $h_h$  是对应的高铝组分层的厚度,  $h_h = \lambda / (4n_h)$ ;  $P$  是 DBR 对数;  $n_{air} = 1$  是空气折射率。对于  $Al_xGaAs$  材料来说,铝的组分越高,折射率越低<sup>[18]</sup>。计算了  $3 \mu m$  氧化孔径 VCSEL 的基横模分布和 PCVCSEL 的基横模

分布,如图 6(a)、(b) 所示。可以发现,基横模被有效限制在光子晶体的缺陷区域中,并且高阶模式被光子晶体空气孔结构损耗。此时,电场并没有分布在空气孔洞中,而是完全在芯区半导体介质中传播。根据横向限制因子的计算公式  $\Gamma = \iint_{oxide} |E_y|^2 ds / \iint_{all} |E_y|^2 ds$  分别计算了两种模式限制结构下的横模限制因子,其中分子部分是对氧化限制区域之内的电场强度  $|E_y|^2$  进行积分,分母部分是对整个平面内的电场强度进行积分。图 5(a) 所示的小氧化孔径 VCSEL 的基横模限制因子为 56.7%,图 5(b) 所示的 PCVCSEL 的基横模限制因子为 99.7%,说明得益于更大的氧化孔径,PCVCSEL 能够对横模实现更强的限制作用,可以在比较宽的有源区增益范围内实现基横模激射。分别计算了两种模式限制结构下基横模的半峰全宽,由于两种限制结构下的基横模都是圆形的,因此只需要计算一个径向的光场分布即可算出半峰全宽。图 7 是两种不同的限制结构下光场的径向分布,其中,虚线是 PCVCSEL 光场模式的径向分布,其半峰全宽约为  $5 \mu m$ ,实线为小氧化孔径 VCSEL 光场模式的径向分布,其半峰全宽约为  $3 \mu m$ 。可以发现,PCVCSEL 实现的基横模有更大的半峰全宽,即基横模光斑的面积更大,故可以实现更小的远场发散角和更好的光束质量。当氧化限制孔直径较大时,器件的模式基本不受氧化孔结构的影响。此时,氧化孔只起到限制注入电流的作用,二维光子晶体结构对器件的光场模式控制起主导作用。将光子晶体结构和氧化孔结构之间的关系合理匹配,可以使器件工作在基横模状态,并实现器件的高功率输出。

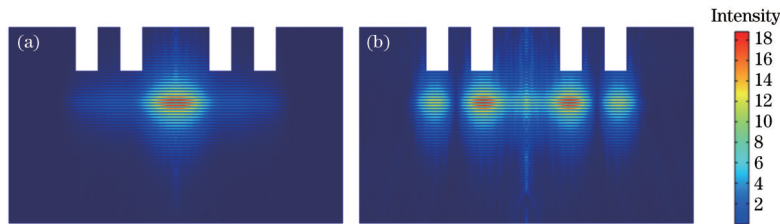


图 5 PCVCSEL 的模场分布。(a)基横模;(b)高阶横模

Fig. 5 Mode field distribution of PCVCSEL. (a) Fundamental transverse mode; (b) high order transverse mode

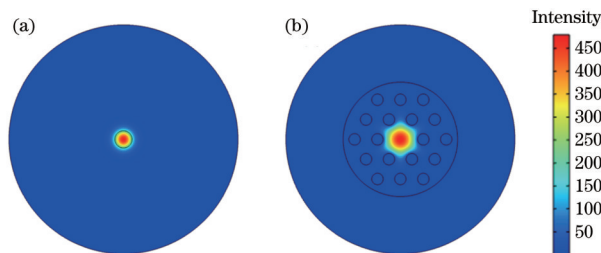


图 6 基横模的模场分布。(a)小氧化孔 VCSEL;(b) PCVCSEL

Fig. 6 Mode field distribution of fundamental transverse mode. (a) VCSEL with small oxide aperture; (b) PCVCSEL

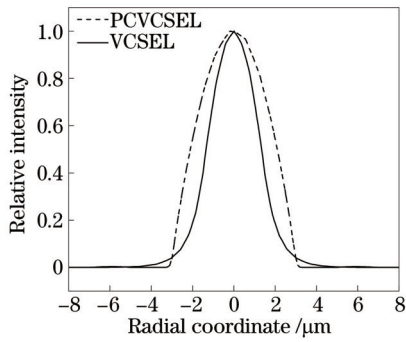


图 7 两种限制结构基横模的光场宽度

Fig. 7 Field widths of fundamental transverse modes of two restricted structures

#### 4 光子晶体垂直腔面发射激光器热电模型分析

相比其他半导体激光器,由于 VCSEL 中引入了 DBR 多层介质膜结构,使得电阻和热阻增大,内部自生热问题比较严重,故温度特性有所降低。电注入型 VCSEL 的主要热量来源是器件中各个材料层的体电阻所产生的焦耳热,器件中的产热情况受各部分的电流分布、电导率和热导率影响,因此采用热电耦合模型来模拟分析器件中的电流分布和温度分布情况。在热电耦合模拟分析中,DBR 和有源区均具有各向异性的电导率和热导率<sup>[19]</sup>。等效各向异性电导率为  $\sigma = \sum \sigma_i d_i / \sum d_i$ ,其中  $\sigma_i$  为 DBR 中第  $i$  层的电导率,  $d_i$  为 DBR 中第  $i$  层的厚度。等效各向异性热导率为  $\kappa = \sum \kappa_i d_i / \sum d_i$ ,其中  $\kappa_i$  为 DBR 中第  $i$  层的热导率。计算了相同注入电流下,不同氧化孔径的 VCSEL 的有源区的电流密度分布,如图 8 所示。由于氧化限制孔的电流限制作用,注入到有源区的电流主要集中在氧化限制孔所对应的区域内,并且存在边缘拥挤效应,故不同位置处的模式增益有所差别,进而造成多横模激射。有电流注入的地方才能产生激励,实现粒子数翻转从而产生激光,故小氧化孔径下有源区的增益范围很小。同时,可以从图 8 中看到,随着氧化限制孔直径的减小,有源区中心的注入电流密度急剧增大。由于小氧化孔径下所施加的注入电流一般较小,故很难实现大功率的单模激射。采用同样的模型对 PCVCSEL 进行了计算,注入电流 20 mA 下 PCVCSEL 中不同位置处的温度分布切线如图 9 所示。可以看到:P-DBR 部分温度相对较高,这是因为 P-DBR 利用迁移率较低的空穴导电,P-DBR 整体的电阻较大,生成的焦耳热较多;N-DBR 与衬底接触,受环境温度的影响比较大,散热效果好,所以 N-DBR 平均温度相对较低。同时,氧化限制层  $\text{AlO}_2$  不仅是一个光学限制通道,还是一个连接 P-DBR 和有源区的电流和热流限制通道,因此氧化限制孔所对应的区域有很高的电流密度和温度,且有源区中温度较高的部分主要集中在氧化限制孔所对应的位置处,形成台阶状的温度分布,在氧化限制窗口外侧

的有源区温度会迅速下降。对于传统的氧化限制型 VCSEL 来说,虽然通过缩小氧化孔径可以获得 VCSEL 的基横模激射,但是会导致串联电阻增大,产生的焦耳热增多,阈值电流增加,严重影响器件的寿命和质量。通过光子晶体结构可以在较大的氧化限制孔径下进一步控制光场,可以施加比较大的注入电流,从而获得大功率的单模输出。

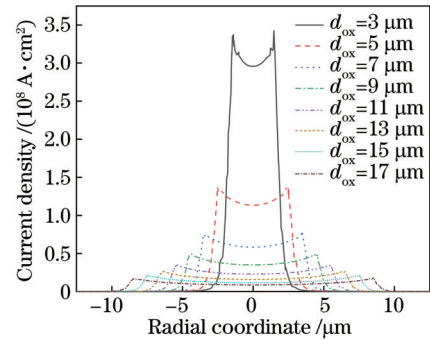


图 8 不同氧化孔径下 PCVCSEL 的电流密度分布

Fig. 8 Current density distribution of PCVCSEL under different oxide apertures

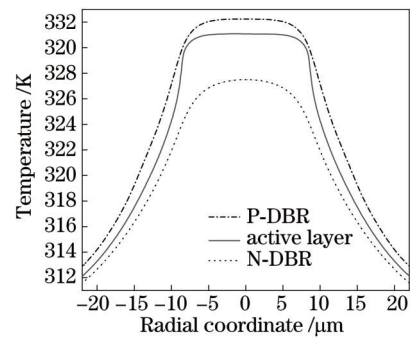


图 9 PCVCSEL 各部分的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of each part of PCVCSEL

#### 5 器件制备和测试

通过金属有机化合物化学气相沉积法(MOCVD)依次在 N 型砷化镓衬底上生长 40 对 N-DBR ( $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$ ),渐变波导层( $\text{Al}_{0.2-0.9}\text{GaAs}$ ),三个周期的多量子阱( $\text{In}_{0.11}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}$ ),渐变波导层( $\text{Al}_{0.9-0.2}\text{GaAs}$ ),高铝氧化层( $\text{Al}_{0.98}\text{GaAs}$ )和 23 对 P-DBR( $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$ )。在 DBR 的高铝和低铝之间插入了 20 nm 厚的渐变层,这样可以有效降低半导体突变界面处的势垒尖峰的强度,从而减小 DBR 引入的串联电阻。P-DBR 和 N-DBR 的反射率分别为 99.5% 和 99.9%。

在工艺方面,首先用二氧化硅作为掩膜通过 ICP 刻蚀出激光器的台面,台面直径为 60  $\mu\text{m}$ ,刻蚀深度为 4.2  $\mu\text{m}$ ,刻蚀深度达到有源区之下,便于后续的湿法氧化,氧化深度为 20  $\mu\text{m}$ 。氧化完成后用丙酮、去离子水、异丙醇对芯片进行清洗处理,用等离子增强化学气相沉积(PECVD)生长一层质地均匀的二氧化硅用作

电学隔离层,并且在绝缘隔离层上刻蚀出光窗口。在利用负胶剥离工艺制备出P面高质量的环形电极后,在制备好的氧化限制型 VCSEL 的基础上,利用 ICP 刻蚀在上 DBR 表面刻蚀出晶格常数为  $a = 5 \mu\text{m}$ , 占空比为  $b/a = 0.5$ , 刻蚀深度为  $h = 2 \mu\text{m}$  的光子晶体空气孔结构。最后,将衬底减薄至  $120 \mu\text{m}$  左右,通过电子束蒸发制作背面电极。

对制备的器件进行了测试,PCVCSEL 的光输出功率-电流-电压曲线如图 10 所示,图中左上角为制备的器件图。当注入电流为 23 mA 时,器件的最大功率达到 1.6 mW, 阈值电流为 6 mA。PCVCSEL 的激光出射区域位于光子晶体缺陷区域内,有效出光面积较小,光子晶体空气孔结构通过增加对高阶横模的损耗来抑制高阶模式的激励,但这也导致注入电流扩散困难,进而引起 PCVCSEL 的阈值电流较大,功率-电流曲线的斜率效率较小。测量了不同注入电流下 PCVCSEL 的光谱特性曲线,如图 11 所示。随着注入电流的增加,PCVCSEL 的激励波长会发生红移。在 8, 12, 16, 20 mA 的注入电流下,激励波长分别为 929.8, 930.6, 931.2, 932.0 nm。各种注入条件下边模抑制比均能达到 30 dB 以上,光谱宽度均小于 0.5 nm, 均能实现稳定的基横模输出,且模式特性较好。

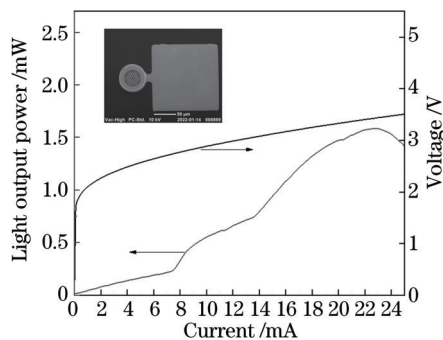


图 10 PCVCSEL 的光输出功率-电流-电压特性

Fig. 10 Light output power-current-voltage characteristic of PCVCSEL

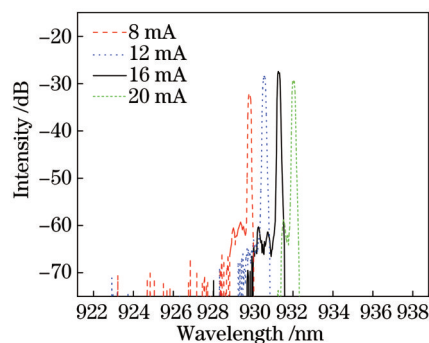


图 11 PCVCSEL 的光谱特性

Fig. 11 Spectral characteristic of PCVCSEL

## 6 结 论

在传统的 VCSEL 中引入光子晶体空气孔结构可

以实现电场和光场的分别限制。对不同位置的横模引入不同的模式损耗可对光场进一步控制,实现较大氧化孔径下的基横模输出。提出基横模 PCVCSEL 的结构参数设计方法,当 PCVCSEL 的归一化频率  $V_{\text{eff}} < 2.405$  时,可实现基横模输出。验证了采用 PCVCSEL 实现的基横模具有更大的模式限制因子、更大的半高全宽和更低的远场发散角,模式特性相比缩小氧化孔径的 VCSEL 有较大的提高。通过简化的热电耦合模型分析了 PCVCSEL 的电流分布和温度分布,有源区中电流密度和温度较高的部分位于氧化限制孔下方的区域中,电流密度存在明显的边缘拥挤效应,这是造成多横模激励的原因之一,因此需要通过光子晶体结构实现对光场的进一步控制。最后,成功制备出了晶格常数为  $a = 5 \mu\text{m}$ , 占空比为  $b/a = 0.5$ , 刻蚀深度为  $h = 2 \mu\text{m}$  的单模 PCVCSEL, 在 23 mA 注入电流下其输出功率可达 1.6 mW, 激励波长为 932 nm, 边模抑制比超过 30 dB。

## 参 考 文 献

- [1] 陈良惠, 杨国文, 刘育衔. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.  
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [2] 王阳, 崔碧峰, 房天啸. 垂直腔面发射激光器(VCSEL)的研究进展[J]. 光电子, 2017, 7(2): 50-57.  
Wang Y, Cui B F, Fang T X. Research progress of VCSEL[J]. Journal of Optoelectronics, 2017, 7(2): 50-57.
- [3] Liu A J, Wolf P, Lott J A, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 121-136.
- [4] 刘安金. 单模直调垂直腔面发射激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701005.  
Liu A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701005.
- [5] Lear K L, Schneider R P, Choquette K D, et al. Index guiding dependent effects in implant and oxide confined vertical-cavity lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(6): 740-742.
- [6] Unold H J, Golling M, Michalzick R, et al. Photonic crystal surface-emitting lasers: tailoring waveguiding for single-mode emission[C]//Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551), September 30-October 4, 2001, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2001: 520-521.
- [7] Nyakas P. Full-vectorial three-dimensional finite element optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(9): 2427-2434.
- [8] 徐晨, 王宝强, 刘英明, 等. 掩膜对 GaAs 基二维光子晶体 ICP 刻蚀效果的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(3): 279-282.



- Xu C, Wang B Q, Liu Y M, et al. Impact of mask on the effect of ICP etched on GaAs-based two-dimensional photonic crystals[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(3): 279-282.
- [9] (日)伊贺健一, (日)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.  
Iga K, Koyama E. Fundamentals and applications of surface emitting lasers[M]. Zheng J, Transl. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] 于洪岩, 尧舜, 张红梅, 等. 940 nm 垂直腔面发射激光器的设计及制备[J]. *物理学报*, 2019, 68(6): 064207.  
Yu H Y, Yao S, Zhang H M, et al. Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(6): 064207.
- [11] 张瑞君. 光子晶体垂直腔表面发射激光器及最佳化设计[J]. *微纳电子技术*, 2006, 43(9): 420-425.  
Zhang R J. Photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers and optimized design[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(9): 420-425.
- [12] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Etching depth dependence of the effective refractive index in two-dimensional photonic-crystal-patterned vertical-cavity surface-emitting laser structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(9): 1344-1346.
- [13] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Two-dimensional photonic crystal confined vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(5): 1439-1445.
- [14] Danner A J, Raftery J J, Yokouchi N, et al. Transverse modes of photonic crystal vertical-cavity lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(7): 1031-1033.
- [15] 陈磊, 罗妍, 冯源, 等. 基于 VCSEL 的湿法氧化工艺的温度依赖性研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701023.  
Chen L, Luo Y, Feng Y, et al. Temperature dependence of wet oxidation process based on VCSEL [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701023.
- [16] Larsson A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [17] Xie Y Y, Kan Q, Xu C, et al. Single fundamental mode photonic crystal VCSEL with high power and low threshold current optimized by modal loss analysis[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(1): 014203.
- [18] Adachi S. GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : material parameters for use in research and device applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 58(3): R1-R29.
- [19] Qi Y X, Li W, Liu S P, et al. Optimized arrangement of vertical cavity surface emitting laser arrays to improve thermal characteristics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(19): 193101.