

类C形孔洞四方晶格 PCSEL 中 Γ_2 点带边模式特性及 结构参数调控规律

张大勇, 张建伟*, 吴昊, 周寅利, 陈超, 宁永强, 王立军

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 设计晶格常数 294 nm 的四方晶格“类C形”空气孔光子晶体面发射激光器 (Photonic Crystal Surface Emitting Laser, PCSEL) 结构, 基于有限元法开展数值仿真。通过平面波展开法验证了光子晶体能带中高对称点 Γ_2 点劈裂的四个带边共振模式位于光锥内, 是实现面外激射的泄漏模式, 并证实光场分布的面内不对称性是调控垂直衍射出光的核心机制, Γ_2 点其劈裂的四个带边模式中频率最低的 A 点的光场因不对称性最弱、Q 值最高 (7.1×10^5) 成为激射模式, 激射波长 980.6 nm。进一步研究占空比与晶格周期的调控规律: 占空比增大使激射波长蓝移、Q 值指数衰减, 有源层限制因子递增而光子晶体层限制因子线性衰减; 晶格周期增大使波长近线性红移, 对 Q 值与限制因子影响较弱。基于此提出多参数协同优化策略: 以晶格周期主导设定目标波长, 以占空比主导优化 Q 值与光场限制。研究揭示了 PCSEL 垂直方向光学约束的内在原理, 为高性能器件设计提供理论支撑与优化路径。

关键词: 光子晶体面发射激光器; 类C形孔洞; 占空比; 晶格周期; 光场限制因子

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260112

CSTR: 32170.14.CJL.20260112

Band-Edge Mode Characteristics at Γ_2 Point and Structural Parameter Regulation in Square-Lattice PCSEL with C-Shaped Holes

ZHANG Dayong, ZHANG Jianwei*, WU Hao, ZHOU Yinli, CHEN Chao,

NING Yongqiang, WANG Lijun

(State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: zjw1985@ciomp.ac.cn

Abstract: A PCSEL structure featuring a square lattice of “C-shaped” air holes with a lattice constant of 294 nm is designed, and numerical simulations are conducted using the finite element method. The plane wave expansion method verifies that the four band-edge resonant modes split at the high-symmetry point Γ_2 in the photonic crystal band structure lie within the light cone, making them leaky modes suitable for out-of-plane lasing. Furthermore, it is confirmed that the in-plane asymmetry of the optical field distribution is the core mechanism governing the vertical diffracted outcoupling of light. Among the four split band-edge modes at Γ_2 , point A, which has the lowest frequency, exhibits the weakest optical field asymmetry and the highest Q-factor (7.1×10^5), making it the lasing mode with a wavelength of 980.6 nm. The effects of duty cycle and lattice period on device performance are further investigated: increasing the duty cycle leads to a blueshift in the lasing wavelength, an exponential decrease in the Q-factor, an increase in the active layer confinement factor, and a linear decrease in the photonic crystal layer confinement factor; increasing the lattice period results in a nearly linear redshift of the lasing wavelength, with weaker effects on the Q-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB5500); 吉林省科技发展计划(20230201042GX)资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFB2805500); Science and Technology Development Project of Jilin Province (20230201042GX).

factor and confinement factors. Based on these findings, a multi-parameter collaborative optimization strategy is proposed: using the lattice period to primarily set the target emission wavelength, and the duty cycle to optimize the Q-factor and optical confinement. This study reveals the underlying principles of vertical optical confinement in PCSEL, providing theoretical support and an efficient optimization pathway for the design of high-performance, single-mode, high-power PCSEL devices.

Keywords: PCSEL; C-shaped hole; fill factor; lattice period; light field confinement factor

1 引 言

光子晶体表面发射激光器(Photonic Crystal Surface Emitting Laser, PCSEL)融合了光子晶体的光场调控特性与表面发射激光器的面出光优势,兼具单模工作、高光束质量、可阵列集成等特点,在光通信、激光显示、光电探测等领域具有重要的应用价值^[1-5]。其核心工作机制依托光子晶体的带边共振效应实现面内光反馈与模式选择,同时通过合理的结构设计实现高效的垂直面外激射,而光场的空间约束与垂直衍射光的调控是决定器件输出激光Q值、输出功率与工作稳定性的关键^[6-8]。

在PCSEL设计中,光子晶体孔洞几何参数的精确调控对光场的空间约束与垂直衍射光的调控至关重要。近年来,日本京都大学^[1-12]、美国德克萨斯大学阿灵顿分校^[13]、英国格拉斯哥大学^[14]、台湾交通大学^[15]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[16]、中国科学院半导体研究所^[17]等机构^[18-20]对不同孔洞形状构型PCSEL开展了深入研究。日本京都大学Noda团队(自1999年起)率先开展了圆形、椭圆形、三角形及双晶格孔洞阵列等PCSEL结构的研究,重点探究了上述结构对光场空间约束及垂直方向衍射增强的调控作用;相关研究显著提升了器件的输出光功率。早些年该团队对圆形孔洞阵列PCSEL进行了初步研究,验证了PCSEL的实用性;但由于圆形孔洞满足 C_{4v} 对称性,理论上没有垂直衍射光,小尺寸PCSEL可以实现一定的垂直衍射光,但衍射强度很弱,因此输出光功率非常弱^[7]。随后对椭圆形孔洞阵列PCSEL进行了研究,实现了最大约23 mW的脉冲激光输出^[8]。2014年该团队制备了等腰直角三角形孔洞阵列PCSEL,进一步降低结构的 C_4 对称性约束,首次实现瓦级连续波功率输出^[9]。2023年通过开发具有可控耦合的椭圆加圆孔双晶格结构大面积PCSEL,克服了传统高功率半导体激光器的多模振荡和热效应问题,在3 mm直径下,实现

了超50 W连续波单模振荡^[11]。2025年进一步优化并引入多结有源区,实现脉冲峰值功率1800 W [10],由于该结构引入一个直径为3 mm的双结有源区PCSEL,避免了在高度掺杂的隧道结中发生光学吸收,同时在有源区和光子晶体层中仍能实现足够的光学增益和共振效应。国内长春光机所于2024年提出三晶格结构,通过每晶胞三个孔洞嵌套叠加增强面内反馈,实现低阈值小型化PCSEL^[16]。尽管上述研究已较为广泛,但对“类C形”孔洞结构的PCSEL尚缺乏深入探讨。本文针对低功率的圆形孔洞四方晶格(C_{4v} 对称)阵列PCSEL,提出了“类C形”孔洞四方晶格(打破 C_{4v} 对称)阵列的PCSEL结构。该结构通过打破光子晶体周期性孔洞排列的 C_{4v} 对称性,增大垂直方向的光学损耗,从而提升输出功率,为提高PCSEL的输出功率提供了一种新结构方案,在低功率PCSEL的应用拓展方面具有潜在前景。因此,需针对四方晶格“类C形”孔洞阵列PCSEL开展孔洞占空比、晶格周期对带边模式Q值、光场纵向分布及限制因子耦合作用的定量化仿真,以指导高性能器件设计。

为此,本文设计了基于四方晶格的“类C形”空气孔阵列结构PCSEL,采用有限元法开展数值仿真,系统分析 Γ_2 点带边共振模式的激射机制,探究光子晶体占空比与晶格周期对PCSEL峰值波长、Q值(垂直方向损耗/垂直衍射光参量)、光场限制因子(光场的空间约束)的调控规律,明确不同参数的调控优先级,提出多参数协同优化的设计方法,旨在为高性能PCSEL器件的结构设计与性能优化提供理论依据和实践指导。

2 仿真实验

2.1 仿真结构

如图1所示,PCSEL结构包括有源区、电子阻挡层、光子晶体层、n包层,p包层。光子晶体为四方晶格周期阵列结构;光子晶体层中的孔洞材料

为空气, 孔洞形状采用“类C形”结构。该结构由一个空气填充的大正六边形与一个折射率和光子晶体材料相同的小正六边形叠加构成。

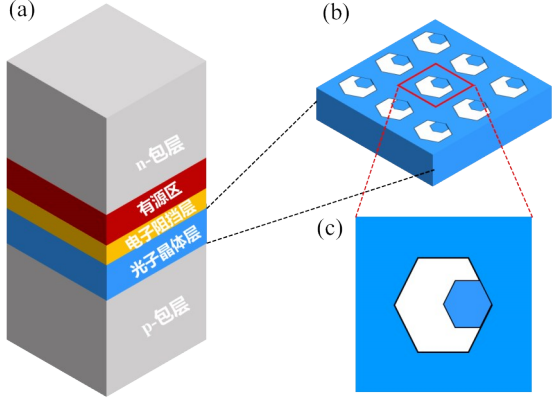


图1 PCSEL 三维结构与光子晶体单元示意图 (a) 器件垂直外延层结构; (b) 光子晶体层的周期阵列结构; (c) 光子晶体层单元胞放大视图

Fig.1 Schematic diagram of the three-dimensional structure of PCSEL and the unit of photonic crystal (a) Vertical epitaxial layer structure of the device; (b) Periodic array structure of the photonic crystal layer; (c) Enlarged view of the unit cell of the photonic crystal layer

PCSEL 基于垂直方向的折射率波导效应, 通过有源层与上下包覆层之间的折射率差对光场实施纵向约束, 将光场局域于有源区及光子晶体层内。光子晶体层凭借其带边共振特性, 可构成面内谐振腔, 实现光场的面内谐振; 而由于有源区与光子晶体层直接相邻, 光场在面内谐振过程中同步获得增益, 并沿面外方向实现受激辐射输出。

2.2 仿真方法与结构参数

本研究采用基于有限元法 (Finite Element Method, FEM) 的 COMSOL Multiphysics 商用仿真平台对该结构开展数值模拟。所涉几何与材料参数详见表 1。相应折射率根据相应文献中的理论计算得到^[21-23]。鉴于所用半导体材料在工作波段吸收极弱, 其本征光学损耗 α_0 统一设为 0。垂直

表 1 PCSEL 的周期结构仿真结构参数

Table 1 Structural Parameters of the Periodic Structure Simulation of PCSEL

层	材料	厚度 (nm)	折射率
n 包层	AlGaAs	1500	3.280 ^[21]
有源区	InGaAs/GaAs	70	3.674 ^[22-23]
电子阻挡层	AlGaAs	60	3.280 ^[21]
光子晶体层	GaAs/air	180	3.523 ^[23] /1
p 包层	AlGaAs	1500	3.280 ^[21]

方向光学损耗 α_1 的精确建模是仿真的关键环节。在模型侧向 4 周施加周期性边界条件, 以等效表征无限延展的 PCSEL 结构, 显著提升计算效率; 在垂直方向 (z 轴) 上下界面则设置完美匹配层 (PML) 作为吸收边界, 以高效截断并吸收向外衍射的电磁波, 进一步保障仿真精度与收敛性。

PCSEL 的仿真结构参数如表 1 所示。其中光子晶体层的晶格常数 a 为 294 nm 的, 孔洞深度为 180 nm, “类C形”空气孔洞的占空比为 15%, 由公式 (1) 计算得到。

$$f = V_{\text{孔洞}}/V_{\text{单元}} = S_{\text{孔洞}}/S_{\text{晶格}} = (S_{\text{大}} - S_{\text{小}})/a^2 = f_{\text{大}} - f_{\text{小}} \quad (1)$$

大、小正六边形的面积分别为 $S_{\text{大}} = 3\sqrt{3}b^2/2$ 和 $S_{\text{小}} = 3\sqrt{3}b_1^2/2$; b 和 b_1 分别为大、小正六边形的边长, 相应取值分别为 81.6、40.8 nm。此时, 大、小正六边形的占空比 $f_{\text{大}}$ 和 $f_{\text{小}}$ 分别为 0.20 和 0.05, 因此“类C形”空气孔洞的占空比 $f = f_{\text{大}} - f_{\text{小}} = 0.15$ 。

下面求解 PCSEL 的 Γ_2 点附近 4 个带边共振波长、Q 值 (损耗)、及其光场分布来分析垂直方向衍射出光量的物理机制。

3 结果与讨论

3.1 PCSEL 的带边共振模式分析

首先, 求解 PCSEL 的能带结构, 来验证其带边共振模式的存在。为了简化计算, 将 PCSEL 等效近似为二维周期性阵列光子晶体, 等效后的二维周期性阵列光子晶体材料的介电常数定义为 ϵ_b , 孔洞中的介电常数定义为 ϵ_a 。求得 ϵ_b 和 ϵ_a 后, 应用平面波展开法 (Plane Wave Expansion, PWE) 计算 PCSEL 等效二维近似结构的能带图。等效计算过程具体如下。

首先 PCSEL 的光子晶体层将材料的介电常数定义为 ϵ_{mat} , 孔洞中的介电常数定义为 ϵ_{air} 。通过四方晶格光子晶体层的等效折射率公式^[24]

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{fn_{\text{air}}^2 + (1-f)n_{\text{mat}}^2} \quad (2)$$

将光子晶体层等效为折射率为 n_{eff} 的均匀薄膜层。然后对波导结构的基模等效折射率 N_{eff} 进行估算。再通过公式 (3) 和 (4) 即可计算出 ϵ_a 和 ϵ_b ,

$$N_{\text{eff}}^2 = f\epsilon_a + (1-f)\epsilon_b \quad (3)$$

$$\epsilon_b - \epsilon_a = \Gamma_{\text{Phc}}(\epsilon_{\text{mat}} - \epsilon_{\text{air}}) \quad (4)$$

然后, 利用平面波展开方法对等效的二维近似结构的能带图进行计算^[24]。如图 2 所利用以

上原理计算得到的 PCSEL 的 TE-like 模式能带图。在动量空间的第一布里渊区的简约布里渊区(图 2 插图中蓝色三角形)的 $X \rightarrow \Gamma \rightarrow X \rightarrow M$ 方向的能带图。该能带表示频率 $a/\lambda = \omega a / 2\pi c \omega$ 随平面内波矢 $k_{//}$ ($k_{//} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$) 的变化关系图。光子晶体是由两种具有不同折射率的介质材料在空间中呈周期性交替排列所构成的人工微结构;其核心物理特征为存在光子带隙,该特性在概念与功能上均类比于半导体中的电子能带结构。基于光子带隙对电磁波传播的调控机制,可实现对光子态密度、自发辐射行为及光传播路径的精确控制。利用光子带隙,可以控制光的发射和传播。由于光场在光子晶体晶格周期阵列结构中发生强烈干涉和衍射,光子晶体能在 M 、 Γ_2 点附近能带劈裂为 4 条, X 点附近能带劈裂为 2 条。在 X 、 M 、 Γ_2 点处这四条能带的斜率都为 0 (群速度 $v_g = d\omega/dk$)。因此在 X 、 M 、 Γ_2 点处,光场可在光子晶体内部产生面内“驻波”振荡,因此这几个点都存在作为 PCSEL 谐振腔的可能。

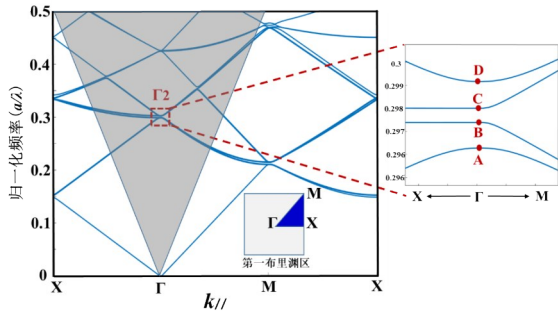


图 2 PCSEL 能带图

Fig.2 PCSEL Energy band diagram

能带图中灰色区域被称作光锥,光锥的边缘被称作光线,满足公式 $\omega a / 2\pi c = k_{//} a / 2\pi n$, 有 $k_{//} = \omega n / c$ 。对于光线下方(光锥以外)有 $k_{//} > \omega n / c$, 光被限制在波导以内,该模式即为波导模式;光线上方(光锥以内) $k_{//} < \omega n / c$, 能量可以耦合到背景介质中辐射出去,这些模式为泄漏模式。在 X 、 M 、 Γ_2 点中,只有 Γ_2 点在四方晶格光子晶体能带光锥内的泄漏模式区域,因此只有 Γ_2 点的带边共振模式可以泄漏到光子晶体外面作为激光器的激光光。图 2 右侧为 Γ_2 点附近能带放大图形, Γ_2 点劈裂的 A、B、C、D 四个点的带边共振模式中 Q 值最高的模式率先与有源区一起对光场实现谐振放大,并实现面外激射。

3.2 基于 COMSOL 的仿真分析与光场约束特性研究

下面应用基于 FEM 算法的 COMSOL Multiphysics 商用软件对该结构进行仿真计算,如表 2 所示,计算的全结构 PCSEL 的 Γ_2 点附近 4 个带边共振波长、Q 值及垂直方向损耗 α_{\perp} (根据公式(3)计算)。不考虑其他损耗, α_{\perp} 垂直方向损耗和 Q 值的关系可以表示为^[13]:

$$\alpha_{\perp} \approx \frac{\beta}{Q} = \frac{2\pi/a}{Q} = \frac{2\pi}{aQ} \quad (5)$$

其中, a 是光子晶体晶格周期。

表 2 “类 C 形”光子晶体孔洞 PCSEL 的 Γ_2 带边共振波长、Q 值及垂直方向损耗 α_{\perp}

Table 2 Resonant Wavelengths, Q Values and α_{\perp} of the Γ_2 Band Edge of "C-shaped" Photonic Crystal Hole PCSEL

Γ_2 带边共振点	A	B	C	D
共振波长(nm)	980.6	974.2	970.8	969.0
Q	7.1×10^5	7.0×10^4	705	760
α_{\perp} (cm^{-1})	0.3	3	303	281

Γ_2 点附近 4 个带边共振模式的面内光场分布(红色和蓝色光斑为 H 磁场,红色箭头为 E_x 、 E_y 电场)如图 3 所示。

接下来,从平面内电场分布的不对称性出发点,对控制垂直方向的光学约束(衍射)进行分析。对于该结构带边 C 点和 D 点,因为平面内对称的电场分布不会导致衍射光的抵消,带边模式 C 和 D 是泄漏模式, Q 值很低,无法激射。对于带边共振点 A 和 B,其情况如图所示,实线所表示孔洞,箭头所代表的电场分布。电场分布都总是相对于 x 轴呈反对称分布。电场分布相对于 y 轴都是不对称的。所以,只研究相对于 y 轴的平面内电场的不对称性。由于对于带边共振点 A 和 B 的电场关于 y 轴的不对称程度存在差异。带边共振点 B 电场关于 y 轴的不对称程度相对较大,泄漏出去的光较多,而得到了相对低的 Q 值。带边共振点 A 的电场关于 y 轴的不对称程度相对较小,泄漏出去的光相对较少,而得到了相对具有更高的 Q 值 (7.1×10^5)。因此,带边共振点 A 点对应的带边共振波长可以率先得到激射, A 点对应的共振波长即为激射波长。

下面从群论的角度出发定量分析类 C 形孔洞的物理机制主要是沿垂直方向衍射出光的物理机制。首先介绍 C_{4v} 点群的对称性质。如果正方形

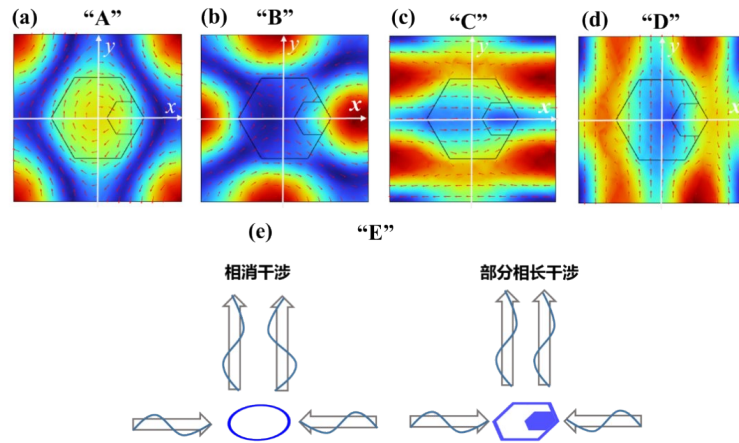


图3 Γ_2 点附近带边共振模式的光场分布与垂直相干示意图 (a)-(d) Γ_2 点附近4个带边共振波长单胞的光场分布仿真结果;(e)圆形、类C形孔洞PCSEL垂直方向光场相干示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical field distribution and vertical coherence of band-edge resonance modes near the Γ_2 point.

(a)-(d) Simulation results of optical field distribution in a unit cell at four band-edge resonance wavelengths near the Γ_2 point; (e) Schematic diagram of vertical optical field coherence for circular and C-shaped hole PCSEL

晶格在恒等操作(E)、绕中心轴顺时针旋转 90° (C_4)、 180° (C_4^2)、 270° (C_4^3), 以及关于 x 轴 (σ_x)、 y 轴 (σ_y)、两条对角线 (σ_d' 、 σ_d'') 的镜像反射等八种变换下保持结构不变, 即该结构满足 C_{4v} 对称性。以上集合完整定义了 C_{4v} 对称性, 相关操作的物理意义详见文献[24]。然而, 在本研究考虑的C形孔洞构型中, 仅满足操作E与 σ_x 的对称性, 其余6种对称性均不成立, 因此该结构打破了PCSEL光场 C_{4v} 对称性, 基于C形孔洞PCSEL沿垂直方向会产生相对较强的衍射光。图3(e)所示为正方晶格光子晶体单胞中圆形、类C形孔洞在垂直方向的衍射示意图。由图可知基于圆形孔洞的光子晶体PCSEL未破 C_{4v} 对称性时, 垂直方向光场产生强烈的相消干涉, 导致没有光沿垂直方向出射; 而基于类C形孔洞的光子晶体PCSEL打破 C_{4v} 对称性, 垂直方向的衍射光场发生部分相长干涉, 从而使出射光得到增强。

上述物理机制揭示了PCSEL通过光场不对称性与Q值协同调控垂直方向光学约束(即衍射效应)的内在原理。本研究在构建该机制时重点参考了文献[25], 所得结果与该文献中关于衍射主导型光学约束的理论分析高度吻合, 从而验证了本模型计算结果的可靠性。

下面研究图4所示的PCSEL器件在纵向磁场强度分布。

图4(a)、(b)展示了PCSEL器件在纵向方向上的 yz 面(水平位置分别如顶部单周期光子晶体横截面插图的红色虚线所示)磁场强度分布。磁场强度

在光子晶体层、有源区区域内达到峰值, 并向两侧有源区呈指数衰减分布, 呈现出典型的局域光场特性。图4(c)给出了沿 z 方向的折射率剖面(红色曲线)与归一化 H 强度分布图(黑色曲线, 水平位置如顶部插图的绿色圆点所示), 进一步证实纵向磁场主要局域在薄层有源区及邻近光子晶体层内, 场强向包层区域呈指数衰减。该分布特征表明, 光子晶体层作为谐振腔的核心区域, 有效调控了纵向光场约束, 体现出光场在光子晶体层中的强局域效应及其与有源区之间的高效耦合特性。这种纵向光场分布特性对降低PCSEL激射阈值、提升垂直辐射效率及稳定单模工作具有关键作用。

图4(a)、(b)展示了PCSEL器件在纵向方向上的 yz 面(水平位置分别如顶部单周期光子晶体横截面插图的红色虚线所示)磁场强度分布。磁场强度在光子晶体层、有源区区域内达到峰值, 并向两侧有源区呈指数衰减分布, 呈现出典型的局域光场特性。图4(c)给出了沿 z 方向的折射率剖面(红色曲线)与归一化 H 场强度分布图(黑色曲线, 水平位置如顶部插图的绿色圆点所示), 进一步证实纵向磁场主要局域在薄层有源区及邻近光子晶体层内, 场强向包层区域呈指数衰减。该分布特征表明, 光子晶体层作为谐振腔的核心区域, 有效调控了纵向光场约束, 体现出光场在光子晶体层中的强局域效应及其与有源区之间的高效耦合特性。这种纵向光场分布特性对降低PCSEL激射阈值、提升垂直辐射效率及稳定单模工作具有关键作用。

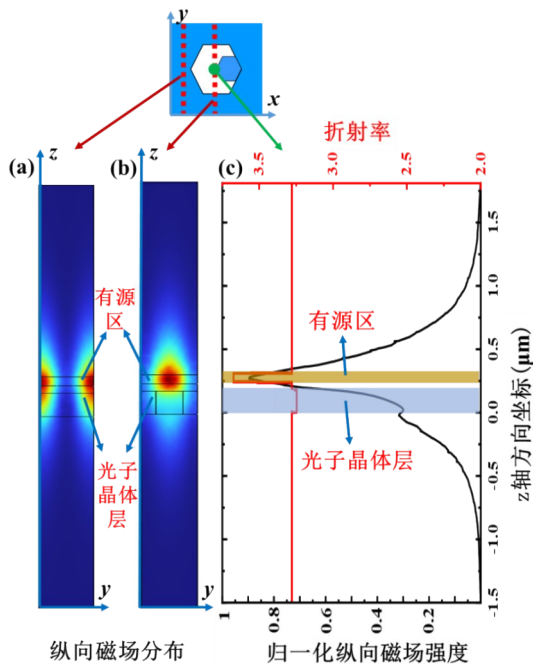


图4 PCSEL器件在纵向磁场强度分布 (a)、(b) PCSEL在纵向yz面的磁场强度分布;(c)沿z方向的折射率剖面(红色曲线)与归一化H场强度分布图(黑色曲线)

Fig.4 Longitudinal magnetic field intensity distribution of the PCSEL device; (a), (b) Magnetic field intensity distributions of the PCSEL in the longitudinal yz plane; (c) Refractive index profile along the z direction (red curve) and the normalized magnetic field intensity distribution graph (black curve)

3.3 PCSEL关键性能参数随光子晶体占空比的变化规律

图5为PCSEL关键性能参数随光子晶体占

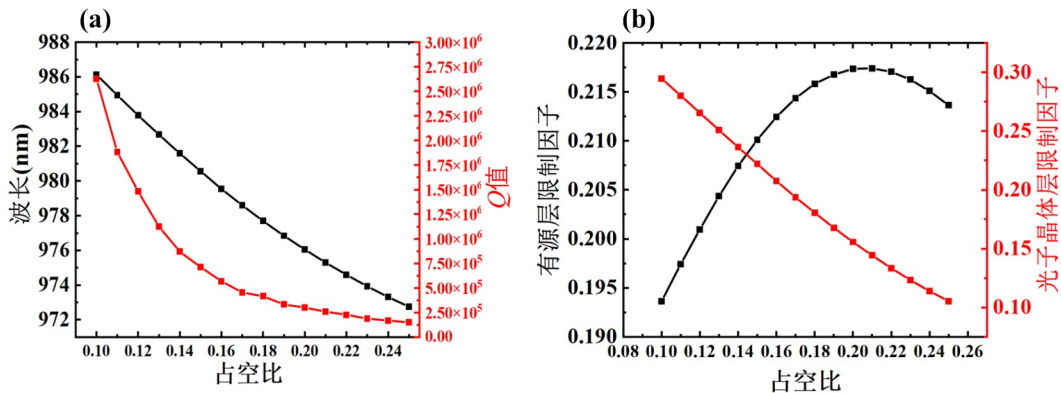


图5 PCSEL关键性能参数随光子晶体占空比的变化规律 (a) 峰值波长(黑色曲线)与品质因子Q(红色曲线)随占空比的变化关系;(b) 有源层限制因子(黑色曲线)与光子晶体层限制因子(红色曲线)占空比的变化关系

Fig.5 Variation patterns of key performance parameters of PCSEL with the fill factor of photonic crystals (a) Relationship between peak wavelength (black curve) and quality factor Q (red curve) as the fill factor of photonic crystals changes; (b) Relationship between active layer confinement factor (black curve) and photonic crystal layer confinement factor (red curve) as the fill factor of photonic crystals changes

空比的变化规律。类C形孔洞占空比变化范围从0.1增加至0.25。小正六边形边长大小始终保持为40.8 nm,对应的占空比 $f_1=0.05$;大正六边形的占空比 f_2 则在0.15-0.3之间间隔为0.01;使得类C形孔洞的占空比 $f=f_2-f_1$ 在0.1-0.25之间。而大正六边形边长和对应类C形孔洞占空比 f 分别为70.6 nm ($f=0.1$)、73.0 nm ($f=0.11$)、75.2 nm ($f=0.12$)、77.4 nm ($f=0.13$)、79.5 nm ($f=0.14$)、81.6 nm ($f=0.15$)、83.6 nm ($f=0.16$)、85.6 nm ($f=0.17$)、87.5 nm ($f=0.18$)、89.4 nm ($f=0.19$)、91.2 nm ($f=0.20$)、93.0 nm ($f=0.21$)、94.8 nm ($f=0.22$)、96.5 nm ($f=0.23$)、98.2 nm ($f=0.24$)、99.9 nm ($f=0.25$)。

图5(a)展示了在图1与表1相关其他参数保持不变的条件下,PCSEL带边共振模式模拟结果中光子晶体孔洞占空比对带边共振波长及其对应Q值的调控特性。黑色曲线(左纵轴)显示,随着占空比从0.1增加至0.25,带边共振波长由986.1 nm单调蓝移至972.8 nm,呈现显著的近线性蓝移。红色曲线(右纵轴)表明,该共振模式的Q值由 2.6×10^6 逐步下降至 1.5×10^5 ,呈指数衰减。上述变化归因于占空比改变光子晶体的等效折射率调制强度及光子能带结构,进而影响带边模式的本征频率;同时,占空比的增大将增强光场在垂直方向的衍射效应,从而引入更高的辐射损耗而导致Q值降低。该结果表明,在设计PCSEL器件时,占空比是实现模式波长调谐与Q值之间需权衡的关键结构参数,为面向特定波段的PCSEL器

件在光谱覆盖范围与激射阈值间的优化设计提供了关键依据。

从上述分析可知 Q 值的大小受到占空比大小的影响较大。在无论在理论设计和实际的制备过程中占空比的控制是核心内容。Q 值的大小选择取决于实际的应用。在窄线宽领域, 较大的 Q 值会获得较窄的线宽, 把占空比控制为较小值有利于可获得较大 Q 值。但在提升功率方面, 如输出功率的提升伴随的是 Q 值下降(垂直方向损耗增加)。本结构为单晶格结构 PCSEL, 较大的占空比对应较大的垂直方向损耗, 进而对应较大输出功率。但在实际的应用中, 占空比不宜过小也不宜过大。占空比过小难以实现较强的横向光反馈; 占空比过大面内反馈过强, 易引发多模震荡。因此, 占空比一般会被控制在大于等于 0.13, 不超过 0.25 的范围内。占空比大小取决于类 C 形空气孔洞的大小(参见公式(1)), 类 C 形空气孔洞尺寸减小, 占空比随之减小。

图 5(b) 展示了 PCSEL 边共振模拟中, 光子晶体孔洞占空比对有源层限制因子与光子晶体层限制因子(分别对应左侧与右侧纵坐标)的影响规律。有源层限制因子 Γ_{act} 与光子晶体层限制因子 Γ_{pc} 通过提取电场的 E_x 和 E_y 分量来计算, 计算公式如下^[6]

$$\Gamma_{act} = \frac{\int_{act} (E_x^2 + E_y^2) \cdot dV}{\int_{cav} (E_x^2 + E_y^2) \cdot dV}, \Gamma_{pc} = \frac{\int_{pc} (E_x^2 + E_y^2) \cdot dV}{\int_{cav} (E_x^2 + E_y^2) \cdot dV} \quad (6)$$

图 5(b) 揭示了 PCSEL 中有源层限制因子 Γ_{act} 与光子晶体层限制因子 Γ_{pc} 随光子晶体占空比的变化规律。占空比从 0.10 增大到 0.25, Γ_{pc} 的变化范围比 Γ_{act} 大, 说明占空比对 Γ_{pc} 的调控更明显。随着占空比由 0.10 增大至 0.25, 而光子晶体层限制因子(红色曲线)随占空比增大呈单调线性下降趋势, 表明占空比越高, 光场在光子晶体层的能量占比越低。上述变化归因于光子晶体占空比增大导致光子晶体的等效折射率变小(依据公式(1)、(2)), 光场能量在光子晶体层中的分配变少。有源层限制因子(黑色曲线)呈现先快速上升、达到峰值后缓慢下降的单峰变化趋势: 低占空比时, 光子晶体对光场的横向束缚较弱, 光场更多分布于有源层, 限制因子随占空比增大而快速提升。当占空比小于 0.20, 相应变化主要归因于光子晶

体占空比增大导致光子晶体的等效折射率变小, 光场能量在光子晶体层中的分配变少, 更多的光场能量重新分配到有源区; 而当占空比超过约 0.20 后, 相应变化除了归因于光子晶体占空比增大导致光子晶体的等效折射率变小外, 由于光子晶体的散射与损耗效应增强起到了主导作用, 光场向光子晶体层扩散, 导致有源层限制因子缓慢回落。两光场能量在有源层与光子晶体层之间的动态分配对 PCSEL 的模式增益、阈值电流及激射效率具有关键调控作用, 为通过占空比调控实现器件性能最优化提供了定量依据。

3.4 PCSEL 关键性能参数随光子晶体晶格周期的变化规律

图 6 为 PCSEL 关键性能参数随光子晶体晶格周期的变化规律。

图 6(a) 展示了如图 1 和表 1 所示的其他参数不变的前提下, PCSEL 带边共振模式模拟结果中光子晶体晶格周期对带边共振波长及其对应 Q 值的调控特性。黑色曲线(左纵轴)显示, 随晶格周期由 290 nm 增大至 300 nm, 带边共振波长从 967.5 nm 单调红移至 1000 nm, 呈现近线性红移。对应地, 红色曲线(右纵轴)呈非线性变化, 晶格周期从 290 到 294 nm 之间的共振模式 Q 值接近, 有轻微增大趋势, 然后晶格周期在从 294 nm 增加到 300 nm 对应的 Q 值从 7.9×10^5 约降至 5.9×10^5 , 总体变化区间不大, 说明光子晶体晶格周期对 PCSEL 的 Q 值调控作用较弱。上述波长变化规律归因于布拉格条件($\lambda \approx an_{eff}$)主导的光子带隙边缩放规律。同时, 反映出了晶格散射与垂直辐射泄漏(Q 值)间的相对复杂的耦合作用。该结果揭示了在 PCSEL 设计中, 周期是实现工作波长精确调谐的关键参数; 尽管在研究的范围内光子晶体晶格周期对 PCSEL 的 Q 值调控作用较弱, 但上述结果揭示了 PCSEL 的 Q 值对晶格尺度的依赖性。PCSEL 的设计需在波长选择与模式品质因数之间进行权衡, 以满足高效率、单模稳定输出的应用需求。

图 6(b) 展示了 PCSEL 带边共振模式的模式限制因子随光子晶体晶格周期演化的模拟结果。黑色曲线(左纵轴)显示, 随晶格周期由 290 nm 增大至 300 nm, 有源区限制因子 Γ_{act} 总体变化区间不大, 由约 0.214 单调衰减至约 0.204 近线性变化, 表明大周期下光场与增益介质的重叠程度轻

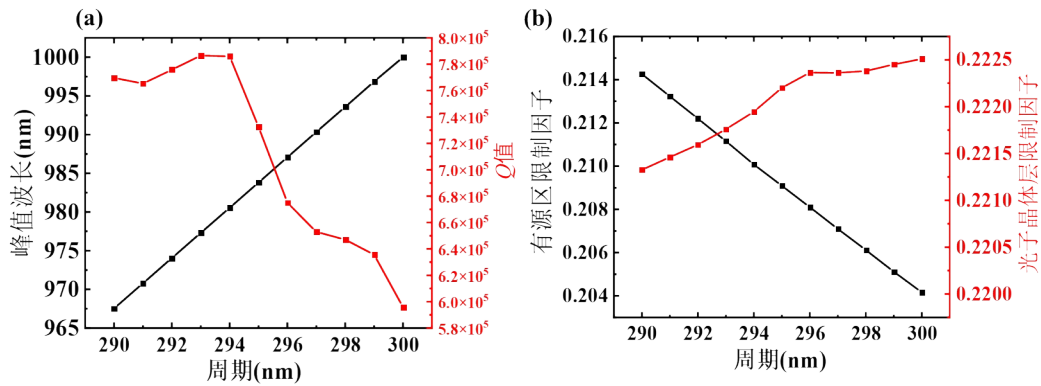


图6 PCSEL关键性能参数随光子晶体晶格周期的变化规律(a)峰值波长(黑色曲线)与品质因子Q(红色曲线)随晶格周期的变化关系;(b)有源层限制因子(黑色曲线)与光子晶体层限制因子(红色曲线)随晶格周期的变化关系

Fig.6 Variation patterns of key performance parameters of PCSEL with period of the photonic crystal lattice (a) Relationship between peak wavelength (black curve) and quality factor Q (red curve) as the period of the photonic crystal lattice changes; (b) Relationship between active layer confinement factor (black curve) and photonic crystal layer confinement factor (red curve) as the period of the photonic crystal lattice changes

微减弱。而红色曲线(右纵轴)表明光子晶体层限制因子 Γ_{pc} 总体变化区间也不大,总体呈现增大趋势,由约0.2213增加至约0.2225。以上结果表明光子晶体晶格周期对PCSEL的有源区和光子晶体层限制因子调控作用较弱,但反映出光场能量在有源区、光子晶体层与光子晶体晶格周期期间的依赖型再分配。与图5(b)的分析类似,上述变化同样主要归因于光子晶体晶格周期增大导致光子晶体的等效折射率轻微变大(依据公式(1)、(2)),进而改变光子晶体带边模式光场的纵向分布,光场能量在有源区与光子晶体层间的重新分配。尽管在研究的范围内光子晶体晶格周期变化对有源区和光子晶体层限制因子的调控作用相对较弱,但上述结果揭示了PCSEL器件的模式能量分布对晶格尺度的依赖性,对PCSEL设计中增益耦合效率与垂直辐射提取的平衡优化具有关键指导意义。

下面对当前微纳加工技术条件下该结构PCSEL实验制备的可行性进行简要分析。该结构的周期与最小特征尺寸完全在电子束光刻(EBL)与GaAs感应耦合等离子体刻蚀(ICP-RIE)的成熟工艺能力范围内,可实现高质量图形化和高保真各向异性刻蚀;尽管存在窄桥区域机械稳定性不足、刻蚀负载效应及工艺容差较窄等挑战,但通过邻近效应校正、分步刻蚀工艺优化、低应力后处理等针对性措施可有效缓解。在实际的半导体微纳加工过程复杂且尖锐的非对称六边形棱角确实会退化为“圆角”,然而,该几何形貌退化对激光器光电

性能的影响可忽略不计,实验结果与数值模拟结果高度吻合,这一结论已在既有文献中得到系统验证与广泛支持^[1,6,8,25]。因此,在科研级工艺控制条件下,该PCSEL结构具备可制造性;本研究不仅具备技术可行性,也具有明确的应用价值与实践意义。

4 结 论

本文以四方晶格“类C形”空气孔PCSEL为研究对象,基于有限元法开展周期结构仿真,揭示了其垂直面外激射物理机制,明确了占空比与晶格周期的调控规律并提出协同优化策略。结果表明,光子晶体能带中高对称点 Γ_2 点位于光锥区域内,其劈裂的四个带边模式中,A点因光场不对称性最弱、Q值最高(7.1×10^5),成为最优激射模式,波长980.6 nm。占空比从0.1增大至0.25增大使波长蓝移、Q值衰减,光子晶体层限制因子下降,有源层限制因子先上升再下降;晶格周期增大使波长红移,对Q值与限制因子影响较弱。晶格周期主导波长调控,占空比主导Q值与光场限制优化,二者协同可平衡器件光谱与激射性能。本研究证实了垂直衍射出光机制,为高性能单模高功率PCSEL设计提供理论支撑,后续可结合更多结构参数优化并开展实验验证。

本文(补充文件及)专家审稿意见和作者回复内容下载地址:<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.2026112.R1>

参 考 文 献:

- [1] SHIZAKI K, DE ZOYSA M, NODA S. Progress in photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Photonics*, 2019, 6 (3):96.
- [2] NODA S, KITAMURA K, OKINO T, *et al.* Photonic-crystal surface-emitting lasers: review and introduction of modulated-photonic crystals [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23 (6):4900107.
- [3] SHIMURA S, MORITA R, INOUE T, *et al.* Proposal and demonstration of free-space optical communication using photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41 (12):3688-3694.
- [4] 潘绍驰, 田思聪, 王品尧, 等. 高速光子晶体面发射激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2024, 45(03):484-492.
- [5] 刘启发, 曹宇翼, 黄远, 等. 片上微腔激光器发展概述[J]. *发光学报*, 2025, 46(12):2241-2264.
- [6] NODA S, INOUE T, YOSHIDA M, *et al.* High-power and high-beam-quality photonic-crystal surface-emitting lasers: a tutorial [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2023, 15 (4):977-1032.
- [7] IMADA M, NODA S. Two-dimensional photonic crystal laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, 5 (3): 376-383.
- [8] NODA S, YOKOYAMA M, IMADA M, *et al.* Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. *Science*, 2001, 293 (5532):1123-1125.
- [9] HIROSE K, LIANG Y, KUSUNOKI Y, *et al.* Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers [J]. *Nat. Photon.*, 2014, 8 (5):406-411.
- [10] INOUE T, YOSHIDA M, GELLETA J, *et al.* General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13 (1):3262.
- [11] YOSHIDA M, KATSUNO S, INOUE T, *et al.* High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser [J]. *Nature*, 2023, 618 (7966):727-732.
- [12] KATSUNO S, YOSHIDA M, INOUE T, *et al.* Design and experimental demonstration of photonic-crystal lasers with multijunction active layers [J]. *Appl. Phys. Express*, 2024, 17(12): 122004.
- [13] KALAPALA A, SONG A Y, PAN M, *et al.* Scaling challenges in high power photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2022, 58 (4):1-9.
- [14] BIAN Z, ZHAO X, LIU J, *et al.* Resonator embedded photonic crystal surface emitting lasers [J]. *npj Nanophotonics*, 2024, 1 (1):13.
- [15] CHEN L R, HONG K B, HUANG K C, *et al.* Improvement of output efficiency of p-face up photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Opt. Express*, 2021, 29 (7):11293-11300.
- [16] WANG Z, LIU X, WANG P, *et al.* Continuous-wave operation of 1550 nm low-threshold triple-lattice photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2024, 13 (1):44.
- [17] GUO X, WANG Y, QI A, *et al.* Lateral cavity photonic crystal surface emitting laser with narrow divergence angle [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2016, 28 (18):1976-1979.
- [18] 王超, 仲崇喜, 肖焱, 等. 基于电流分布调控的光子晶体激光器的性能研究[J]. *中国激光*, 2026, <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.tn.20260305.1406.134>.
- [19] 刘启发, 刘珂, 李皖晴, 等. 基于场分布调控和多孔氮化镓 DBR 的蓝光光子晶体面发射激光器设计[J]. *光学学报*, 2024, 44(20):165-173.
- [20] 唐英翔, 王超, 肖焱, 等. 大面积高功率 940 nm 光子晶体面发射激光器[J]. *发光学报*, 2025, 46(04):713-720.
- [21] GaAsAdachi S., AlAs, and GaAl x_1-x As: Material parameters for use in research and device applications [J]. *Journal of applied physics*, 1985, 58(3): R1-R29.
- [22] http://www.batop.com/information/n_InGaAs.html.
- [23] https://www.batop.de/information/n_GaAs.html
- [24] IMADA M, CHUTINAN A, NODA S, *et al.* Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers [J]. *Physical Review B*, 2002, 65(19): 195306.

- [25] KUROSAKA Y, SAKAI K, MIYAI E, *et al.* Controlling vertical optical confinement in two-dimensional surface-emitting photonic-crystal lasers by shape of air holes [J]. *Opt. Express*, 2008, 16 (22): 18485-18494.



张大勇(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,助理研究员,2022年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光子晶体面发射激光器及其传感应用研究。

E-mail: zhangdayong@cimop. ac. cn



张建伟(1985-),男,山东济宁人,博士研究生,研究员,硕士生导师,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事垂直腔面发射激光器及微腔激光器的模式调制特性的研究。

E-mail: zjw1985@ciomp. ac. cn