

文章编号: 1000-7032(2024)03-0484-09

高速光子晶体面发射激光器研究进展

潘绍驰^{1,2}, 田思聪^{1*}, 王品尧^{1,2}, 王子焯^{1,2}, 陆寰宇³, 佟存柱³,
王立军³, BIMBERG Dieter^{1,4}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, Bimberg中德绿色光子学研究中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 柏林工业大学 固体物理研究所, 纳米光学中心, 德国 柏林 D-10623)

摘要: 光子晶体面发射激光器(PCSEL)利用二维光子晶体光栅的布拉格共振实现面发射激光,具有其独特的优势,包括单模性能、在片测试、高功率、低发散角等。相比垂直腔面发射激光器(VCSEL),PCSEL有将近两倍的有源区光限制因子,展现出高速运行的潜力。本文探讨了PCSEL的基本结构和工作原理,并详细分析了影响PCSEL激光器实现高速性能的关键因素。随后,文章系统地介绍了近年来研究者们为实现PCSEL高速性能所做的努力,重点聚焦于通过增强PCSEL的面内限制来缩小激光腔,并提供了相关的研究方向和指导。

关键词: 光子晶体; 高速; 面发射激光器

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240006

Research Progress on High-speed Photonic Crystal Surface-emitting Lasers

PAN Shaochi^{1,2}, TIAN Sicong^{1*}, WANG Pinyao^{1,2}, WANG Ziyue^{1,2}, LU Huanyu³,
TONG Cunzhu³, WANG Lijun³, BIMBERG Dieter^{1,4}

(1. Bimberg Sino-German Green Photonics Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Institute of Solid State Physics, Center for Nano-Optics, Technical University of Berlin, Berlin D-10623, Germany)

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

Abstract: The photonic crystal surface-emitting laser(PCSEL) achieves surface-emitting laser operation by utilizing the Bragg resonance of a two-dimensional photonic crystal grating. It possesses unique advantages, including single-mode performance, on-wafer testing, high power output, and low divergence angles. Compared to vertical-cavity surface-emitting lasers(VCSELs), PCSELs have nearly double the active region confinement factor, showcasing their potential for high-speed operation. This paper explores the fundamental structure and working principles of PCSEL and provides a detailed analysis of the key factors influencing the achievement of high-speed performance in PCSEL lasers. Subsequently, the article systematically introduces the efforts made by researchers in recent years to achieve

收稿日期: 2024-01-04; 修订日期: 2024-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2801000, 2023YFE0111200); 国家自然科学基金(62174159, 62061136010, 62121005); 国家自然科学基金委与德国研究联合会-中德中心国际合作项目(M0386); 吉林省科技发展计划(20210402055GH, 2023SYHZ0024, SKL202302028); 在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目(HZ2021007); 中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y2022067); 青年科学基金项目(62105329)

Supported by National Key R&D Program of China(2021YFB2801000, 2023YFE0111200); National Natural Science Foundation of China(62174159, 62061136010, 62121005); Sino-German Center for Research Promotion (Joint Mobility Program of DFG, NSFC M0386); The Scientific and Technological Development Program of Jilin Province(20210402055GH, 2023SYHZ0024, SKL202302028); Cooperation Project between Undergraduate Universities in Chongqing and Institutes Affiliated with The Chinese Academy of Sciences(HZ2021007); Outstanding Member of the Youth Innovation Promotion Association of The Chinese Academy of Sciences(Y2022067); Youth Science Foundation Project(62105329)

high-speed performance in PCSEL, with a particular focus on enhancing in-plane confinement in PCSELS. Relevant research directions and guidance are also provided.

Key words: photonic crystal; high-speed; surface-emitting laser

1 引言

随着人工智能和数据中心的迅速发展,对更高数据传输速率和更广泛光通信应用的需求不断增加。在当前光通信市场,为满足城域网、接入网、数据中心网络等短距离传输的需求,垂直腔面发射激光器(VCSEL)和分布式反馈激光器(DBF)成为主流。VCSEL在850,980,1060 nm波段广泛应用,其传输速率已超过50 Gbps^[1]。然而,VCSEL由于受到材料选择的限制,难以在更长波长范围内应用,并在寄生与热效应的限制下,传统氧化限制VCSEL的带宽难以突破35 GHz^[2]。DFB激光器^[3]适用于1.3 μm和1.55 μm波段,具有高功率,但由于制备过程中的切割封装问题,其可靠性和量产性受到挑战。因此,迫切需要一种新型激光器技术,既能够实现高速操作,又能够在长波段通信中发挥优势。

近年来,光子晶体面发射激光器(PCSEL)以其卓越的性能逐渐受到关注,并已实现了高达50 W的输出功率^[4]。PCSEL是一种利用光子晶体结构作为二维相干谐振腔的半导体激光器,其关键特性在于光子晶体层,它是具有由两种折射率差异较大的材料(例如空气和半导体)形成的晶格结构,如图1(b)。在这种高折射率对比晶格内,一阶布洛赫波和高阶布洛赫波(如图1(c)所示)之间会发生耦合。由于这种相互作用,PCSEL能够进行大面积的二维相干激光振荡,在其能带Γ点的光还会衍射到垂直方向,形成垂直面输出激光。PCSEL具有大面积相干激光腔,能实现极低发散角的面发射输出,而且其能带结构也带来了丰富的光场调控特性。目前,PCSEL主要应用高亮度激光^[5-8],也能实现二维光束扫描^[9]等多种功能,不仅能工作在438 nm的紫光波段^[10],也可应用于2 μm红外波段^[11],其波长设计具有灵活性。相较于传统VCSEL,PCSEL的光限制因子较高,具备更高的调制带宽潜力。然而,尽管PCSEL在高速领域展现出潜力,但其具体应用仍然是一个待开发的领域。

在这一背景下,本文将深入探讨高速PCSEL

的设计原理、性能影响因素以及研究者们近年来为实现其高速性能所做的努力。通过对PCSEL和VCSEL的比较,揭示PCSEL在高速应用中的优势,讨论了当前PCSEL实现高速操作的挑战并提出解决办法。

2 高速调制激光器的带宽限制

在介绍PCSEL在高速调制方面的潜力时,我们首先需要分析其高速调制激光器的传递函数,该函数是理解激光器调制动态行为的基础。通过计算半导体速率方程在平衡态附近对小信号调制的响应^[12],我们可以得到传递函数 $H(f)$ 的表达式:

$$H(f) = C \times \frac{f_r^2}{\left(f_r^2 - f^2 + i \frac{\gamma}{2\pi} f\right)} \times \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_p}}, \quad (1)$$

其中, C 是一个常数, γ 代表阻尼系数, f_r 是寄生截止频率, f_i 是弛豫振荡频率。其中 f_r 描述了激光腔内载流子和光子之间的本征振荡频率,是激光器内在动态行为的体现,对调制响应的影响最为显著。 f_r 与激光器的 D 因子以及注入电流有关,可以通过下式来计算:

$$f_r = D \sqrt{I - I_{th}}, \quad (2)$$

其中, I_{th} 为阈值电流, D 因子的表达式为:

$$D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma_{act} v_g}{e V_{act}} \cdot \frac{\partial g / \partial n}{\chi}}, \quad (3)$$

其中 η_i 为内量子效率, v_g 为腔内光传播的群速度, Γ_{act} 为有源区光学限制因子, $\partial g / \partial n$ 即微分增益, I_{th} 为阈值电流, e 为电子电荷, V_{act} 为有源区体积, χ 为载流子传输因子。当忽略寄生和阻尼时,半导体激光器的3 dB调制带宽 f_{-3dB} 与 f_r 的关系为:

$$f_{-3dB} \approx \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_r \approx 1.55 f_r, \quad (4)$$

因此,分析 f_r 的表达式,我们可以得到增大带宽的方法:(1)增加有源区光学限制因子,通过设计使得有源层与腔内模式有更多的交叠区域,比如VCSEL的半波长腔设计;(2)减小有源区体积 V_{act} ,比如DFB激光器可以减小腔长,VCSEL通过氧化层限制载流子的流经区域;(3)增加微分增益

$\partial g/\partial n$, 利用应变量子阱来增加微分增益已经成为基本的高速设计思路。此外, 也可以通过对腔进行设计来引入额外的增益色散, 如失谐负载效应^[13]。

3 PCSEL在高速调制方面的优势

通过上一部分分析可知, 如果能够实现高限制因子和小尺寸的激光腔设计, 则可以进一步提高带宽, 而PCSEL可以满足这两点。高速PCSEL的外延结构可参照图1, 当PCSEL受到泵浦时, 在光子晶体的作用下形成横向激光腔, 在面内不断谐振放大, 并通过垂直衍射输出激光。为了发挥面发射激光器在片测试这一优势, 采用共面电极, 衬底面出光能降低光学损耗, 且利用了P面电极作为反射层, 有效利用了向上出射的光。

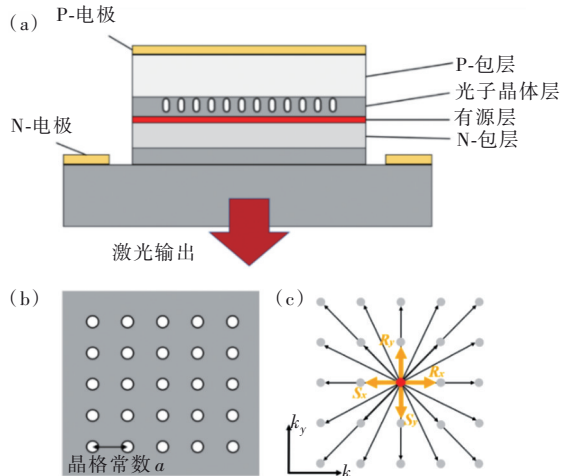


图1 (a)高速PCSEL截面示意图;(b)正方晶格光子晶体示意图;(c)倒空间中的布洛赫波矢

Fig.1 (a) Cross section of high-speed PCSEL. (b) Top-view of square lattice photonic crystal. (c) Bloch wave vector in reciprocal space

由于VCSEL利用数十对DBR层来实现垂直限制, 导致其相对较低的有源区光限制因子 Γ_{act} (3%~4%); 而PCSEL因利用有源层与包层之间较大的折射率差作为垂直光限制, 其 Γ_{act} 可达8.5%^[14], 因此PCSEL在高速调制方面有着天然的优势。基于此, Peng等^[15]验证了通过提高 Γ_{act} 来提高带宽的可行性, 如图2所示。在20倍阈值电流下, 光限制每增加2%, 带宽可以增加3~4 GHz左右。

然后, 他们对940 nm商用PCSEL (200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 谐振腔) 进行小信号测量与误码率测试, 得出最大带宽为2.32 GHz, 据此可以预估

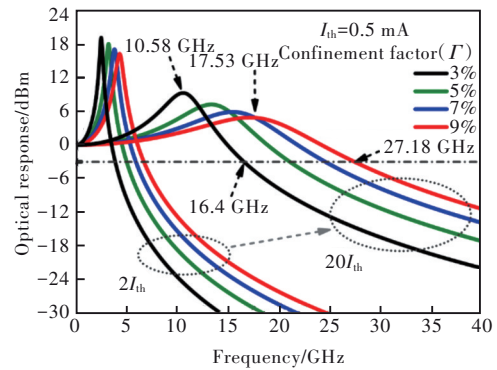


图2 有源区光限制因子对PCSEL的本征响应的影响(分别在2倍和20倍阈值电流下)^[15]

Fig.2 Intrinsic responses of a PCSEL biased at 2 and 20 times threshold currents, respectively^[15]

50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 大小谐振腔的PCSEL带宽约为9.2 GHz。此外, Taylor组^[16]同样测量了200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 谐振腔的PCSEL的小信号特性, 得到高达4.26 GHz的带宽。他们据此建模分析, 认为通过进一步缩小腔长至25 μm 可以将带宽提升至40 GHz以上。

由以上分析可知, 为了使PCSEL具有良好的高速性能, 我们需要研究如何减小PCSEL的有源区尺寸 V_{act} (即PCSEL的谐振腔)。PCSEL的损耗可以用图3的模型来表示, 其阈值条件可以表示为:

$$g_{th} = \alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel} + \alpha_i, \quad (5)$$

其中 α_{\perp} 为垂直衍射损耗, 即垂直输出的激光; α_{\parallel} 为面内水平损耗, 是由于部分光传播到谐振腔边缘后不再受光子晶体的反馈作用而产生的; α_i 为内损耗。当腔尺寸不断缩小时, 面内损耗 α_{\parallel} 将不断增大, 导致难以实现激光。因此, 如何降低面内损耗是目前追求PCSEL高速性能的关键。我们可以从两方面来研究解决这一问题的方法。首

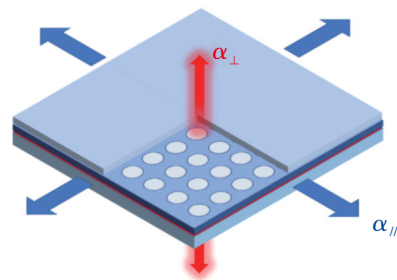


图3 PCSEL损耗示意图, 包括四个方向的面内损耗以及两个垂直方向的面外辐射损耗

Fig.3 Schematic diagram of losses in PCSEL, including in-plane losses in four directions and out-of-plane radiation losses in two perpendicular directions

先,我们要对光子晶体的结构进行特殊设计,最大化其面内耦合强度,尽可能地将光场局域在光子晶体区域,从而降低面内损耗。其次,我们可以在光子晶体区域外引入额外的反射机制,将横向损耗的光反射回光子晶体区域。

4 减小 PCSEL 腔尺寸的方法

4.1 双晶格光子晶体

为了降低 PCSEL 的面内损耗,首先要考虑的是如何增强面内耦合。如图 3,当光传播到光子晶体边界外就会耗散掉。因此,增强一维耦合系数(κ_{1D}),即前向波和后向波之间的耦合(图 1(c)中 R_x 与 S_x 、 R_y 与 S_y 之间的耦合),能将模式限制在更小区域,从而降低了面内损耗。波矢之间的耦合由光子晶体的晶格设计所决定,由 Noda 团队提出的双晶格光子晶体是目前最有潜力的设计^[7]。如图 4,双晶格光子晶体的一个晶胞内有两个空气孔,可以看作两套光子晶体嵌合在一起,两个空气孔在 x 和 y 方向分别偏移一定距离 d 。

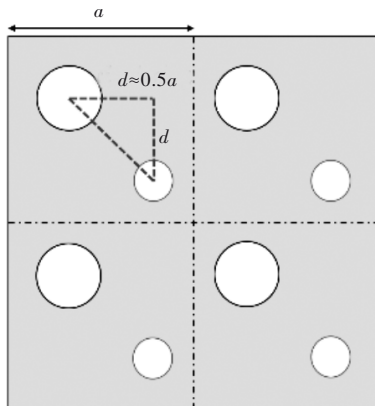


图 4 双晶格光子晶体示意图,它由两个晶格点群组成,分别在 x 和 y 方向都偏移 $d \approx 0.5a$

Fig. 4 Schematic diagram of double-lattice photonic crystal composed of two lattice point groups, one is shifted by $d \approx 0.5a$ in the x and y directions from the other one

假设一个晶胞内单个空气孔的介电常数分布可以表示为 $\varepsilon(x,y)$,晶格常数为 a ,由于光子晶体的周期性, $\varepsilon(x,y)$ 可以展开为傅立叶级数:

$$\varepsilon(x,y) = \sum_{m,n} F_{m,n} \exp\left[j\left(\frac{2\pi m}{a}x + \frac{2\pi n}{a}y\right)\right], \quad (6)$$

其中, $F_{m,n}$ 是傅立叶系数,可以通过介电常数分布函数 $\varepsilon(x,y)$ 得到。对于另一个空气孔,考虑 x 和 y 方向上的偏移量 d ,那么双晶格晶胞的介电常数

分布函数可以表示为:

$$\varepsilon(x,y) + \varepsilon(x-d,y-d) = \sum_{m,n} \left\{ 1 + \xi_{m,n} e^{-j\left(\frac{2\pi m}{a}d + \frac{2\pi n}{a}d\right)} \right\} F_{m,n} e^{j\left(\frac{2\pi m}{a}x + \frac{2\pi n}{a}y\right)}, \quad (7)$$

其中 $\xi_{m,n}$ 为两个空气孔的傅立叶系数之比。

对比单孔的介电常数分布函数(6),双晶格介电常数分布函数的傅立叶展开中额外引入了一项 $\left\{ 1 + e^{-j\left(\frac{2\pi m}{a}d + \frac{2\pi n}{a}d\right)} \right\}$,它描述了两个晶格间的相互作用,其值由两个晶格之间的偏移量 d 决定,在 0~2 之间变化。当 $\left(\frac{2\pi m}{a}d + \frac{2\pi n}{a}d\right)$ 为偶数,则傅立叶系数变为两倍,光在两个孔之间形成相长干涉。反之,若为奇数则为相消干涉,傅立叶系数为 0。

根据布洛赫定理,在光子晶体区域传播的光可以展开为布洛赫波,在倒空间我们可以用倒格矢 $G_{m,n} = \left(\frac{2\pi m}{a}, \frac{2\pi n}{a}\right)$ 来表达波矢,倒格矢之间的耦合正比于 $F_{m,n}$ 。那么 R_x 与 S_x 和 180° 直接耦合由 $G_{\pm 2,0}$ 引起,在 R_y 与 S_y 的直接 180° 耦合由 $G_{0,\pm 2}$ 引起,即对应一维耦合系数 κ_{1D} 。为了获得尽量大的耦合系数 κ_{1D} ,我们需要令两个孔之间的偏移量 $d \approx 0.5a$ 。

Noda 组在 2020 年^[14]提出异质 PCSEL 结构,在理论上证明,通过把双晶格光子晶体的双孔偏移量设置为 $d = 0.56a$ (为了兼顾足够的垂直耦合系数以保证面发射激光输出,需要略微偏离 $0.5a$),可有效增强一维耦合系数 κ_{1D} ,相比于单孔光子晶体 κ_{1D} 增大了 1.34 倍。图 5 展示了异质 PCSEL 示意图,PC1 的带边位于 PC2 的带隙内,在 PC1 内部传播的波在异质边界处被反射回来,因此进一步增强了模式的面内约束。通过对该结构进行三维 FDTD 建模仿真,通过模式分析计算出此时垂直辐射常数仍然在 20 cm^{-1} 左右,基模的总损耗大概为 42 cm^{-1} ,一阶模式则 $>70 \text{ cm}^{-1}$ 。相比垂直辐射损耗,虽然面内损耗仍然不小,但能实现基模和一阶模式之间差异较大的损耗差异,证明了异质 PCSEL 可以在 $9 \mu\text{m}$ 直径内实现单模激射。据此预估弛豫振荡频率 f_r 为 27 GHz , 3 dB 带宽 f_{3dB} 可达 40 GHz 以上。虽然这是并未考虑寄生效应与热效应的计算结果,可以预估,PCSEL 的带宽比同等直径下的 VCSEL 大很多。这是因为 PCSEL 有更大的有源区光限制,而且保证单模的特性也证明了 PCSEL 在高速性能方面的潜力。

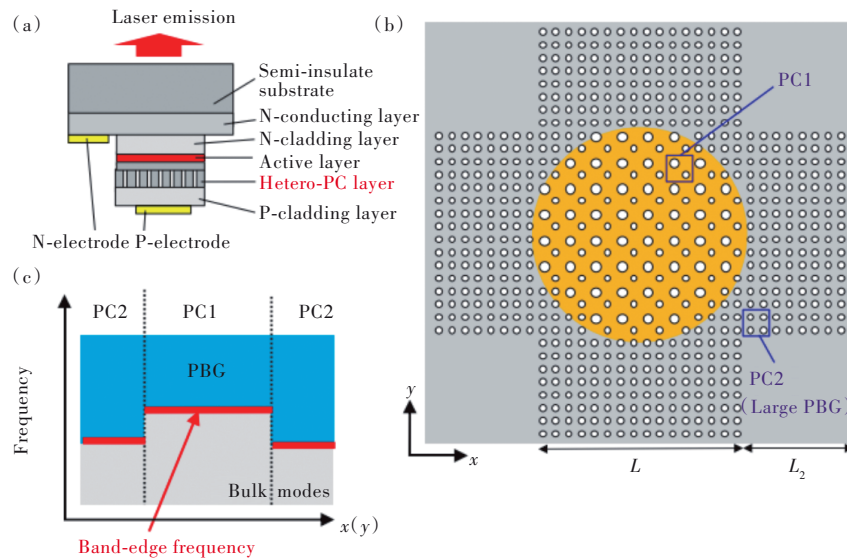


图 5 (a)异质 PCSEL 截面图;(b)由两种光子晶体晶胞组成的面内异质结构俯视图;(c)所异质 PCSEL 中的带边缘频率的空间分布^[14]

Fig. 5 (a)Cross section of hetero-PCSELs. (b)Top-view of in-plane heterostructure composed of two photonic crystals with different lattice points. (c)Spatial distribution of the band-edge frequency in the proposed hetero-PCSEL^[14]

此外,2022年,Bian等^[17]展示了利用一维光栅(DBR)环绕光子晶体来增强面内限制,其本质也是一维光子晶体与二维光子晶体之间形成异质结构,在中心光子晶体区域的模式位于DBR的禁带内,以形成较强的反射。他们在准连续条件下测试了DBR对PCSEL器件的影响,发现该结构能够降低阈值电流并提高斜率效率,证明DBR确实降低了面内损耗。

4.2 侧壁反射增强面内限制

Noda组开发了适用于PCSEL的三维耦合波理论(3D-CWT)^[18-19],大大减少了仿真PCSEL的计算资源。2015年,他们利用3D-CWT首次研究了引入外反射对PCSEL模式的影响,发现外反射的引入除了降低各个模式的阈值外还会导致额外模式的产生^[20],这是因为边界处反射与光子晶体的相干散射相互作用形成的。尤其在强外反射条件下,引入的新模式会令光场局域在外反射面附近,也有可能和基模竞争。

Taylor^[21]基于三角孔正方晶格的PCSEL,分析了外反射对模式的影响。他们首先对无外反射情况下进行模式分析,然后通过解理,如图6,利用在光子晶体区域边界形成的解理面作为外反射面(预估解理面的反射率为0.559),测试结果显示阈值电流从112 mA降低到88 mA,同时提升了斜率效率,证明外反射面的存在能有效减少面内光学损耗。虽然仅引入了单边外反射面,但实验结

果证明,存在两个解理面与单个解理面的测试结果并无较大变化。但由于腔的不对称性,单个解理面的远场图案不再对称,双解理面则保持对称,但都导致了更大的发散角。

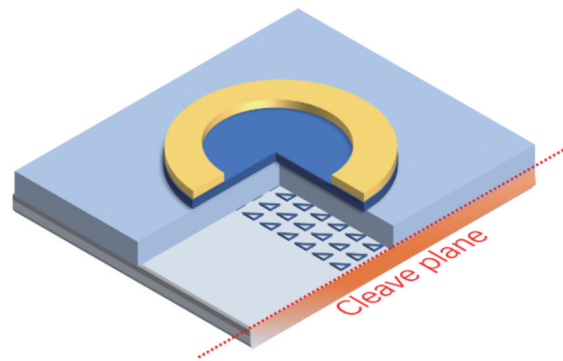


图 6 通过解理面引入外反射,解理面位于光子晶体区域边界处

Fig. 6 Cleaved facets serving as external mirrors, located at the boundary of the photonic crystal region

郑婉华等^[22]在2023年提出了一种利用PCSEL来实现主动光束控制的方法,他们认为小光子晶体腔会导致能带的离散化,通过有源区增益峰偏移不同模式,实现了二维光束扫描。他们先制备出光子晶体台面,然后在侧壁镀上金属层作为外反射面来降低损耗,加上深度高达 $1.58\ \mu\text{m}$ 的表面光子晶体,最终实现了小腔($45\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$)脉冲激射。

4.3 能带反转限制的拓扑腔

2020年,马仁敏等创新性地利用光子晶体能带的拓扑性质,通过具有拓扑平庸态和拓扑非平庸态的两种光子晶体构建激光腔^[23],在其界面通过新颖的能带反转光场限制效应实现激光振荡,实现了边长仅为7.4 μm的光泵浦单纵模、单横模面发射激光器。其原理如图7所示,拓扑结构基于六方晶格,其中正常晶胞中空气孔到六方晶格中心的距离为1/3的晶格常数,通过对空气孔进行收缩或外扩操作,分别得到拓扑平庸态或拓扑态,两种结构在能带结构上表现为偶极子态与四极子态之间发生能带反转。如图7(c),拓扑态光

子晶体被拓扑平庸态光子晶体所包围,二者拼接处构成闭合边界,由于边界两端不同的能带结构,在空间上表现为频率处于Γ点附近的光在边界处被反射,在内部形成谐振,通过这种方法对光场进行横向的限制,即可构成谐拓扑振腔。这种由于拓扑结构实现的光场调控机制有如下优点:(1)拓扑结构具有鲁棒性^[24],对局部缺陷免疫,增强可靠性;(2)极小的谐振腔,有助于高速操作;(3)具有独特的模式选择机制,保证基横模具有最高的品质因子。虽然光泵浦下已经证明了拓扑结构的优越性,然而由于三角孔较小,加工难度较大,难以实现电泵浦。

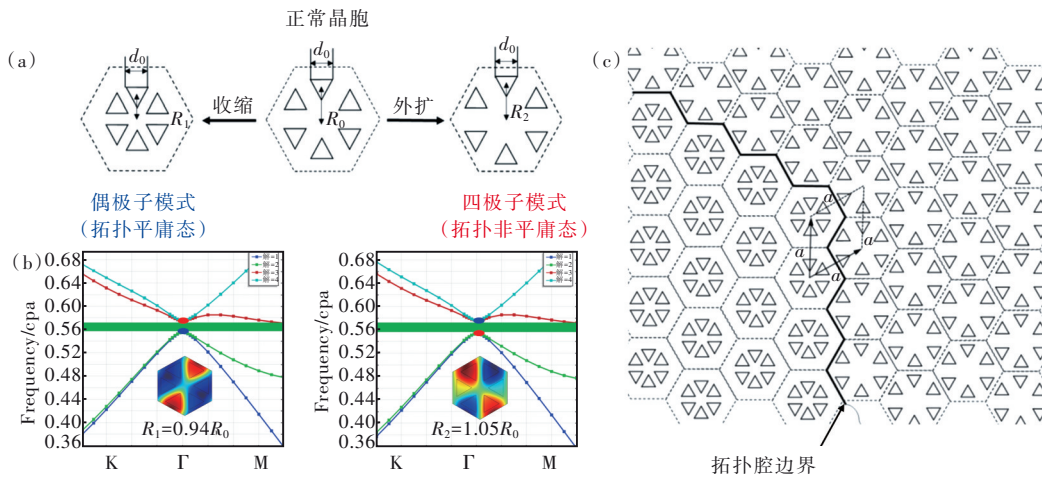


图7 (a)拓扑态光子晶体和拓扑平庸态光子晶体示意图;(b)拓扑光子晶体能带图;(c)拓扑激光腔示意图

Fig. 7 (a)Schematic diagrams topological photonic crystals and topologically trivial photonic crystals. (b)Band structure of topological and trivial photonic crystals. (c)Schematic diagrams of topological laser cavity

4.4 垂直设计增强耦合强度

利用麦克斯韦方程组求解周期性介电结构中的电场分布可以发现,PCSEL中光场仅在光子晶体区域被耦合,因此,耦合强度与光子晶体区域的光限制因子 Γ_{PC} 成正比,故PCSEL的导波模式分布十分重要。 Γ_{PC} 表示为与光子晶体区域交叠的光场与整个腔内的光场之比:

$$\Gamma_{PC} = \frac{\int_{PC} |E|^2 \cdot dv}{\int_{cavity} |E|^2 \cdot dv}, \quad (8)$$

因此,为了尽可能增大 Γ_{PC} ,光子晶体层应当尽量靠近有源区。1999年,Noda首次展示的PCSEL利用晶圆键合将光子晶体层粘合到有源区附近以提高耦合强度^[5],然而经过晶圆键合后,会在两个晶圆晶间形成多余的界面层,从而引入缺陷。为了能够实现连续电流下高功率激光输出,他们随后

在2014年开发了一种掩埋光子晶体结构的PCSEL^[6],如图8。掩埋光子晶体PCSEL的制备流程为:首先,用MOCVD在n-GaAs衬底上依次生长n-AlGaAs包层、InGaAs/AlGaAs多量子阱(MQW)有源层、AlGaAs载流子阻挡层和GaAs层;然后,用电子束光刻和干法刻蚀在顶部GaAs层上制备光子晶体结构;之后进行第二次生长工艺,在光子晶体层上依次生长p-AlGaAs作为包层和p-GaAs接触层;最后利用光刻工艺完成电极制备。由于不同晶面的生长速率不同,第二次生长过程中,空气孔表面会逐渐闭合,从而成功地在有源层附近保留了掩埋空气孔。此外,为了进一步提高 Γ_{PC} ,令n包层含更高的Al组分来降低其折射率。以上Noda组所提出的外延结构设计已经成为目前主流的设计思路。

除了通过减少有源层和光子晶体层之间的距离来增强耦合,还可以使用厚光子晶体层来增强 Γ_{PC} 。2020年,Noda组提出了具有深刻蚀气孔的

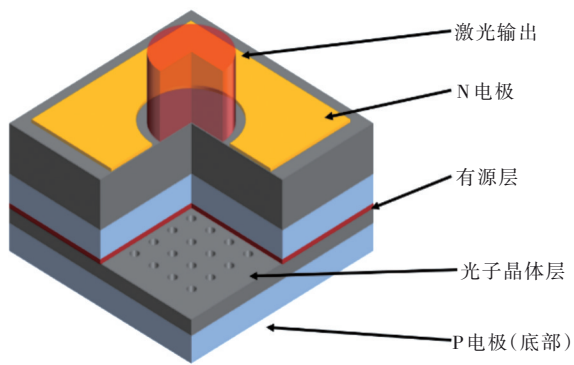


图 8 掩埋光子晶体的 PCSEL 结构示意图

Fig. 8 Schematic of the PCSEL with buried photonic crystals

PCSEL 设计^[25],如图 9 所示。与以往不同,该设计将光子晶体层制备在 n 面,先刻蚀光子晶体结构,后进行外延二次生长。该设计不仅可以避免干法刻蚀工艺对有源区带来的额外损伤,将光子晶体层放在 n 面也有利于降低空穴的吸收,进一步降低损耗。由于二次外延中包括有源层,需要先生长间隔层 (Spacer 层)来填平,以免影响有源区的质量。同时,该设计利用了较薄的间隔层(100 nm)来填平,以尽可能令光子晶体层贴近有源层。基于该设计,Noda 组实现了谐振腔尺寸低至 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 的室温连续激光,这是目前报道的谐振腔最小的 PCSEL。

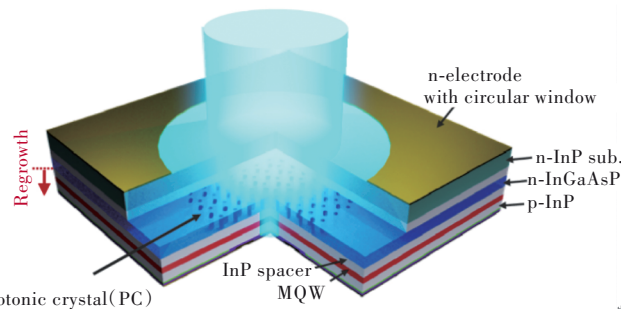


图 9 深刻蚀气孔的 PCSEL 结构示意图,先在 n 型 InP 衬底上生长光子晶体层,之后在其上制备深刻蚀的光子晶体空气孔,然后再生长 InP 过度生长层 (Spacer 层)、多量子阱有源层和分离限制异质结构 (SCH) 层。再生长后,使用标准光刻和蒸发工艺制备 p 电极和 n 电极^[26]

Fig. 9 Schematic diagram of a deeply etched air-hole PCSEL structure. The process involves growing a photonic crystal layer on an n-type InP substrate, followed by the fabrication of deeply etched photonic crystal air holes. Subsequently, an InP spacer layer, multiple quantum well active layer, and separate confinement heterostructure (SCH) layer are grown. After the growth process, standard lithography and evaporation techniques are used to form the p-electrode and n-electrode^[26]

5 结 论

本文综述了光子晶体面发射激光器在高速应用方面的最新进展。为了实现 PCSEL 的高速操作,我们着重考虑了优化面内限制,降低面内损耗,目的是降低有效谐振腔尺寸,以提高带宽。首先,我们深入介绍了通过晶胞设计来增强面内耦合,特别是双晶格光子晶体,有极高的一维耦合系数,能有效降低面内损耗;进一步讨论了其他关键的面内限制方法,包括引入禁带限制的异质 PCSEL 和 DBR 限制以及侧壁反射;最后,我们关注了外延结构的设计,其中通过掩埋光子晶体来增强耦合效果是关键。

尽管高速 PCSEL 的设计仍在持续探索中,但

与传统的 VCSEL 相比,PCSEL 具备更高的有源区光限制因子且不受限与波长。这使得 PCSEL 在光通信领域(尤其长波长通信)具有显著的优势和巨大的潜力。随着光通信技术的不断发展,PCSEL 有望在高速、高效、长距离传输等方面发挥更大的作用。同时,随着材料和制造工艺的进步,PCSEL 的性能和可靠性也将不断提升,为光通信技术的发展带来新的可能性。因此,我们相信 PCSEL 将成为未来光通信技术中的重要组成部分,为实现更快速、更可靠的光通信系统做出贡献。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240006>.

参 考 文 献:

- [1] TIAN S C, AHAMED M, LARISCH G, *et al.* Novel energy-efficient designs of vertical-cavity surface emitting lasers for

- the next generations of photonic systems [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2022, 61(SK): SK0801.
- [2] 杨卓凯, 田思聪, LARISCH Gunter, 等. 基于PAM4调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 399-413.
- YANG Z K, TIAN S C, LARISCH G, *et al.* High-speed vertical-cavity surface-emitting lasers based on PAM4 modulation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(4): 399-413. (in Chinese)
- [3] MATSUO S, KAKITSUKA T. Low-operating-energy directly modulated lasers for short-distance optical interconnects [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2018, 10(3): 567-643.
- [4] YOSHIDA M, KATSUNO S, INOUE T, *et al.* 50 W continuous-wave operation of a 3 mm-diameter photonic-crystal surface-emitting laser [C]. *CLEO: Science and Innovations 2023, San Jose*, 2023: SF1Q. 5.
- [5] IMADA M, NODA S, CHUTINAN A, *et al.* Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(3): 316-318.
- [6] HIROSE K, LIANG Y, KUROSAKA Y, *et al.* Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2014, 8(5): 406-411.
- [7] YOSHIDA M, DE ZOYSA M, ISHIZAKI K, *et al.* Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams [J]. *Nat. Mater.*, 2019, 18(2): 121-128.
- [8] 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.
- [9] SAKATA R, ISHIZAKI K, DE ZOYSA M, *et al.* Photonic-crystal surface-emitting lasers with modulated photonic crystals enabling 2D beam scanning and various beam pattern emission [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(13): 130503.
- [10] EMOTO K, KOIZUMI T, HIROSE M, *et al.* Wide-bandgap GaN-based watt-class photonic-crystal lasers [J]. *Commun. Mater.*, 2022, 3(1): 72.
- [11] SHTERENGAS L, LIU R, KIPSHIDZE G, *et al.* Electrically pumped epitaxially regrown $\lambda > 2 \mu\text{m}$ GaSb-based photonic crystal surface-emitting lasers [C]. *Proceedings of SPIE 12021, Novel In-plane Semiconductor Lasers XXI, San Francisco*, 2022: 120210B.
- [12] TIAN S C, AHAMED M, BIMBERG D. Progress in short wavelength energy-efficient high-speed vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication [J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 410.
- [13] CHACINSKI M, SCHATZ R. Impact of losses in the Bragg section on the dynamics of detuned loaded DBR lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, 46(9): 1360-1367.
- [14] INOUE T, YOSHIDA M, ZOYSA M D, *et al.* Design of photonic-crystal surface-emitting lasers with enhanced in-plane optical feedback for high-speed operation [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(4): 5050-5057.
- [15] PENG C Y, CHENG H T, HONG Y H, *et al.* Performance analyses of photonic-crystal surface-emitting laser: toward high-speed optical communication [J]. *Nano. Res. Lett.*, 2022, 17(1): 90.
- [16] ORCHARD J R, IVANOV P, MCKENZIE A F, *et al.* Small signal modulation of photonic crystal surface emitting lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2023, 13(1): 19019.
- [17] BIAN Z J, ZHAO X Y, RAE K J, *et al.* Resonator embedded photonic crystal surface emitting lasers [C]. *2022 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC), Matsue, Japan*, 2022: 1-2.
- [18] LIANG Y, PENG C, SAKAI K, *et al.* Three-dimensional coupled-wave model for square-lattice photonic crystal lasers with transverse electric polarization: a general approach [J]. *Phys. Rev. B*, 2011, 84(19): 195119.
- [19] LIANG Y, PENG C, SAKAI K, *et al.* Three-dimensional coupled-wave analysis for square-lattice photonic crystal surface emitting lasers with transverse-electric polarization: finite-size effects [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(14): 15945-15961.
- [20] GELLETA J, LIANG Y, KITAGAWA H, *et al.* Influence of external reflection on the TE mode of photonic crystal surface-emitting lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2015, 32(7): 1435-1441.
- [21] TAYLOR R J E, LI G R, IVANOV P, *et al.* Mode control in photonic crystal surface emitting lasers through external reflection [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, 23(6): 4900208.
- [22] SI J H, WANG M J, CHEN Z H, *et al.* Active beam steering enabled by photonic crystal surface emitting laser [C]. *2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai*, 2023: 1-4.
- [23] SHAO Z K, CHEN H Z, WANG S, *et al.* A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-induced

- reflection [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2020, 15(1): 67-72.
- [24] BARCZYK R, PARAPPURATH N, ARORA S, *et al.* Interplay of leakage radiation and protection in topological photonic crystal cavities [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2022, 16(9): 2200071.
- [25] ITOH Y, KONO N, FUJIWARA N, *et al.* Low-threshold single-mode lasing from InP-based double-lattice photonic crystal surface emitting lasers with high-aspect-ratio air holes [C]. *2021 27th International Semiconductor Laser Conference (ISLC), Potsdam, Germany, 2021: 1-2.*
- [26] ITOH Y, KONO N, INOUE D, *et al.* High-power CW oscillation of 1.3- μm wavelength InP-based photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(16): 29539-29545.



潘绍驰(1997-),男,浙江台州人,硕士研究生,2020年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,主要从事光子晶体面发射激光器的研究。
E-mail: einwell@outlook.com



田思聪(1984-),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事高速VCSEL和光子晶体激光器的研究。
E-mail: tiansicong@ciomp.ac.cn