·特邀综述·

带边模式光子晶体面发射半导体激光器研究进展

陆寰宇[1,2]，佟存柱[1*]，王子烨[1,2]，田思聪[1]，汪丽杰[1]，佟海霞[1,2]，李儒颂[1,2]，王立军[1]

[1]中国科学院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；
[2]中国科学院大学材料科学与光电研究中心，北京 100049

摘要 光子晶体面发射激光器(PCSEL)是一种可以实现极低发散角(小于 1°)、高功率激光输出的新型半导体激光器，在激光雷达、空间通讯、传感和激光加工等领域有着重要的应用前景。由于产生谐振的方式不同，其可分为缺陷模式和带边模式两种类型，其中带边模式光子晶体面发射激光器具有更好的单模特性且易于二维集成等优点。鉴于此，简述带边模式光子晶体面发射激光器的基本原理与研究进展，在理论推导和几个实例的基础上，对如何提高带边模式光子晶体面发射激光器的输出功率进行论述，并提出一种新的功率增强方法，最后对带边模式光子晶体面发射激光器的发展趋势进行展望。

关键词 激光器；光子晶体；带边模式；面发射激光器；高功率

中图分类号 TN248.4 **文献标志码** A **doi**：10.3788/CJL202047.0701014

Research Advancement on Band-Edge Mode Photonic Crystal Surface-Emitting Semiconductor Laser

Lu Huanyu[1,2], Tong Cunzhu[1*], Wang Ziye[1,2], Tian Sicong[1], Wang Lijie[1,2], Tong Haixia[1,2], Li Rusong[1,2], Wang Lijun[1]

[1]*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;
[2]*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract Photonic crystal surface-emitting laser (PCSEL) is a new type of semiconductor laser, which can produce high-power laser emission with ultralow divergence (less than 1°). It has an important application prospect in light detection and ranging equipment, space communication, sensing and material processing. It can be divided into two types: defect mode and band-edge mode. The band-edge mode PCSEL has the following advantages: it has single-mode and easy two-dimensional integration. Therefore, the basic principle and research progress of band-edge mode of a PCSEL are briefly introduced in this study. Based on the theoretical derivation and several reported examples, how to improve the output power of a band-edge mode PCSEL is discussed and a new method of power enhancement is proposed. Finally, the development trend of a band-edge mode PCSEL is prospected.

Key words lasers; photonic crystal; band-edge mode; surface emitting laser; high power

OCIS codes 140.5965; 160.5298; 250.5960; 250.7260

1 引 言

随着人工智能时代的到来，人们对激光雷达、激光传感技术和高速激光通信的性能提出了更高要求，小体积、高效率和低成本的芯片级半导体激光器成为了很好的选择，并朝着更低发散角、更高功率和更快速率方向发展。传统半导体激光器存在发散角大、单色性差和亮度低等缺点，光子晶体

收稿日期：2020-02-12；**修回日期**：2020-03-03；**录用日期**：2020-03-24

基金项目：国家自然科学基金(61774156)、国家重点研发计划(2018YFB2201000)、中国科学院国际合作项目(181722KYSB20160005)

* **E-mail**：tongcz@ciomp.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的引入则可以弥补这些不足。从原理上讲，光子晶体在激光器上的应用主要分为两种：一种是基于光子禁带原理在二维光子晶体结构中引入光缺陷，由于缺陷对光子的限制作用，可以使其成为激光器的谐振腔；另一种是利用光子晶体在布里渊区边界的特殊点处（能带边缘）形成驻波，使得光子态密度增强，从而大大提高模式增益。这种基于能带边缘形成驻波的带边模式的光子晶体面发射激光器（PCSEL）通过衍射实现自模式锁定，位于布里渊区中心强损耗的色散确保了单模，且具有大的光场面积。基于上述特点，带边模式的PCSEL具有易于测试、集成度高和光斑质量好的优点，但其在通讯波段的输出功率普遍较低，这成为制约其在某些领域中应用的一个主要原因。本文对带边模式PCSEL的研究进展进行介绍并对提高其输出功率的方法进行讨论。

2　PCSEL的原理

2.1　光子晶体的禁带与带边

光子晶体（Photonic Crystal）的概念在1987年由Yablonovitch和John分别独立提出[1-2]。对于介电系数呈周期性排列的介电材料[3]，图1分别为一维（1-D）、二维（2-D）和三维（3-D）呈周期性变化的介电材料。电磁波在介电材料中经过介电函数散射后，某些波段的电磁波强度会因相消干涉而呈指数衰减，使其无法在系统内传递，相当于在频谱上形成能隙，如图2所示，其中横坐标 k 为波数，纵坐标 ω 为频率，h 为普朗克常数，v 为模式频率，于是色散关系也具有带状结构，即光子能带结构（Photonic Band Structures）。具有光子能带结构的介电物质被称为光能隙系统（Photonic Band-Gap System），简称为光子晶体。

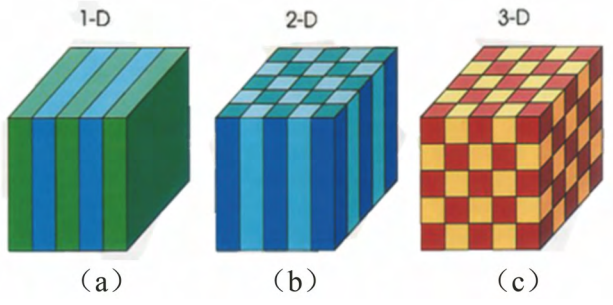

图1　三种介电系数呈周期性排列的介电材料[3]。（a）1-D；（b）2-D；（c）3-D

Fig. 1　Three kinds of dielectric materials with dielectric constants arranged periodically[3]. (a) 1-D; (b) 2-D; (c) 3-D

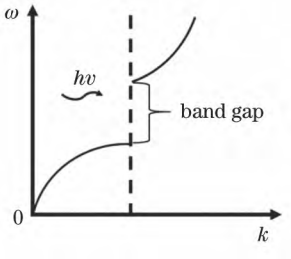

图2　光子带隙

Fig. 2　Photonic band gap

在光子晶体的能带结构中出现带隙，那么能量落于带隙的波就不能传播。带隙中不完全禁带是指对光子的限制作用只是存在于某些特定的方向或某一种偏振模式下，完全禁带是在所有方向和任意偏振模式下光子都无法传播（图3阴影部分）。利用这种特性，在二维光子晶体中引入缺陷，就可以获得一种缺陷模式的光子晶体激光器。此外，在光子晶体中某些较为平坦的带边位置（图3箭头位置），会产生群速度 V_g 为零的反常现象，利用这种特点可以制备带边模式的PCSEL。对光子晶体的基本概念与特性进行了解后，将在下一节对带边模式在半导体激光器中所起的作用与基本原理进行阐释。

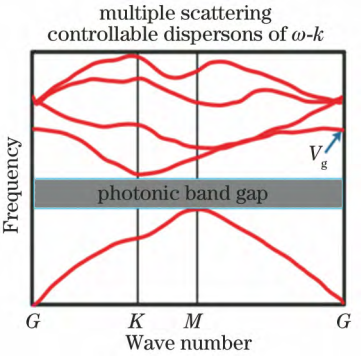

图3　光子晶体材料的波数与频率的关系

Fig. 3　Relationship between wave number and frequency of photonic crystal materials

2.2　带边模式PCSEL的基本原理

众所周知，对于激光器而言，谐振腔的作用表现在两个方面[4]：提供光学正反馈作用和对振荡光束

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的控制作用。以图 4 中长度为 L，两端为反射镜 M_1 和 M_2 构成的 F-P 腔为例，均匀平面波在平行平面光腔内沿腔的轴线方向传播，入射波和反射波会发生干涉，为了在腔内形成稳定的振荡，就需要光波因干涉而得到加强。发生相长干涉的条件：光波往返一周后所产生的相位差 $\Delta\Phi$ 为 2π 的整数倍。对于几何腔长为 L，内部介质折射率为 n 的谐振腔来说，光波在腔内往返一周后的光学长度为 $2L'=2nL$。由相差和光程差的关系式可得到相位改变量为

$$\Delta\Phi=4\pi nL/\lambda=2\pi q, \tag{1}$$

式中：q 为正整数；λ 为光波在真空中的波长。则谐振频率可写为

$$\nu_q=cq/2nL, \tag{2}$$

式中：c 为光速。

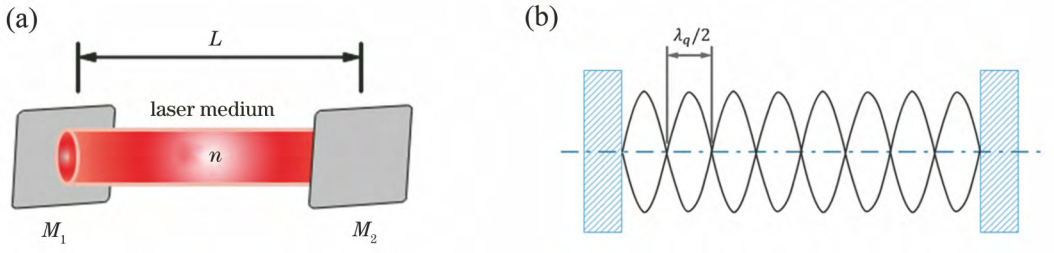

图 4　光腔。(a)光腔结构；(b)光腔中的驻波

Fig. 4　Optical cavity. (a) Optical cavity structure; (b) standing wave in optical cavity

由此可知，长度为 L，腔内折射率为 n 的平行平面腔只对频率满足(2)式的沿轴向传输的光波提供正反馈，谐振腔内传输方向相反、频率相同的光波通过叠加在腔内形成驻波。但对于激光器来说，提供反馈的不一定是平面反射镜，带边模式 PCSEL 就是利用布拉格衍射提供反馈，在光子晶体区域内形成驻波，从而提高光增益和控制模式。从原理上讲，利用带边模式的 PCSEL 与利用二阶光栅的分布反馈激光器相类似。二阶光栅的分布反馈激光器中的光子受到光栅的反射而形成反馈，满足布拉格衍射条件 $m_g\lambda=2n_{\mathrm{eff}}\times\Lambda$（$n_{\mathrm{eff}}$ 为基模的有效折射率，m_g 为光栅的衍射阶次，Λ 为光栅周期）的波长可通过相干耦合实现模式选择。二阶光栅的分布反馈激光器的横截面与衍射特性[5]，如图 5 所示。由于二阶光栅特定的衍射性质，其满足

$$\sin\phi=\sin\theta+m\lambda_i/(n_{\mathrm{eff}}\times\Lambda), \tag{3}$$

式中：λ_i 为入射波的波长；θ 为入射角；ϕ 为衍射角，m 为衍射的阶数。结合布拉格衍射条件与(3)式可以得到 $\sin\phi=\sin\theta+m$，当 θ 值为 $-90°$ 时可以获得角度为 $0°$ 的衍射光，由此实现光的垂直输出[5]。

光子晶体可以视为二维光栅结构，这里以三角晶格的光子晶体结构为例并结合能带结构，对光子晶体中的谐振和垂直出光特性进行分析。二维三角晶格光子晶体能带结构如图 6 所示[6]。从图 6 可以看到，高对称点处的斜率几乎为 0，由群速度公式 $V_g=\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}k$ 可以认为其群速度几乎为 0，这些模式的光局域在高对称点处形成驻波振荡。对于二维光子晶体平板来说，其平行于界面方向的波矢分量 $k_{\parallel}$ 守恒。

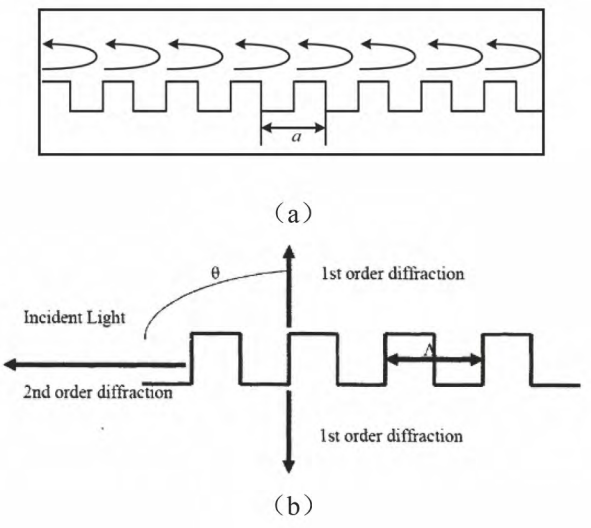

图 5　二阶光栅分布反馈激光器[5]。(a)横截面；(b)衍射特性

Fig. 5　2nd order grating distributed feedback laser[5]. (a) Cross section; (b) diffraction characteristics

空气的色散关系式为 $\omega=c\sqrt{|k_{\parallel}|^2+|k_{\perp}|^2}$，当 $k_{\perp}$ 为 0 时，得到 $\omega=c|k_{\parallel}|=c\sqrt{|k_x|^2+|k_y|^2}$ 的关系式，可画出一个以 Γ 点为顶点的倒置圆锥面，称这个圆锥面为光锥，如图 7 所示。处于光锥内部（$\omega\geqslant c\sqrt{|k_x|^2+|k_y|^2}$）的模式在垂直于光子晶体平板的方向上存在能量传播，光锥下的模式则被限制在光子晶体平板内不能泄漏到空气中，其在二维三角晶格的光子晶体能带图中的区域如图 8 所示，所以处于在能带图中阴影光锥区域的模式为光子晶体平板的泄漏模式[6]。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

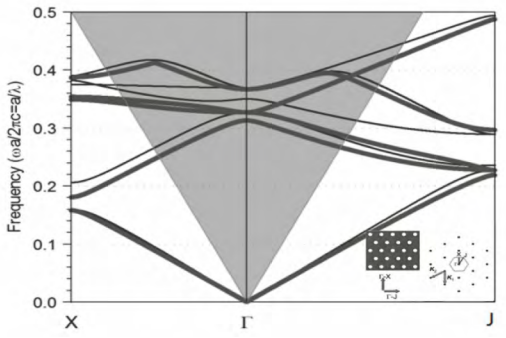

图 6　二维三角晶格光子晶体的能带结构[6]

Fig. 6　Band structure of two-dimensional triangular lattice photonic crystal[6]

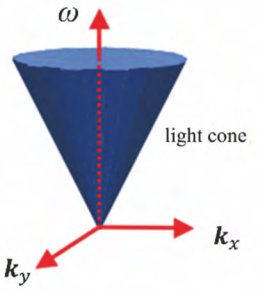

图 7　光锥结构

Fig. 7　Light cone structure

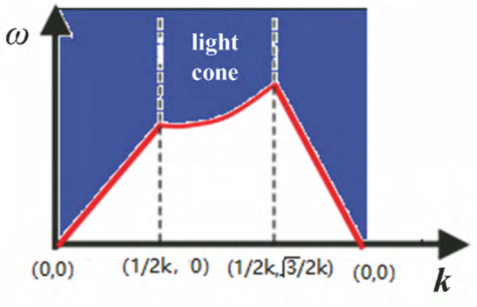

图 8　能带图中的光锥[6]

Fig. 8　Light cone in band diagram[6]

通过分析三角晶格光子晶体结构中的布拉格衍射，可以解释带边模式 PCSEL 中的垂直出光效应。二维光子晶体的倒易晶格如图 9 所示[7]，其中 $\boldsymbol{K}_1$、$\boldsymbol{K}_2$ 为布拉格光栅矢量，$|\boldsymbol{K}|=2\pi/a$，a 为晶格常数。当考虑结构中 TE（横电）模光波的布拉格衍射时，入射光波和衍射光波满足

$$\boldsymbol{k}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{k}_{\mathrm{i}}+m_1\boldsymbol{K}_1+m_2\boldsymbol{K}_2,(m_{1,2}=0,\pm1,\pm2,\cdots),\tag{4}$$

$$\omega_{\mathrm{d}}=\omega_{\mathrm{i}},\tag{5}$$

式中：k_{d}、k_{i} 为在平面内的衍射光波的波矢、入射光波的波矢；ω_{d} 和 ω_{i} 分别为衍射光和入射光的频率。(4)式给出了相位匹配条件（动量守恒），(5)式说明衍射光和入射光的频率不变（能量守恒）。

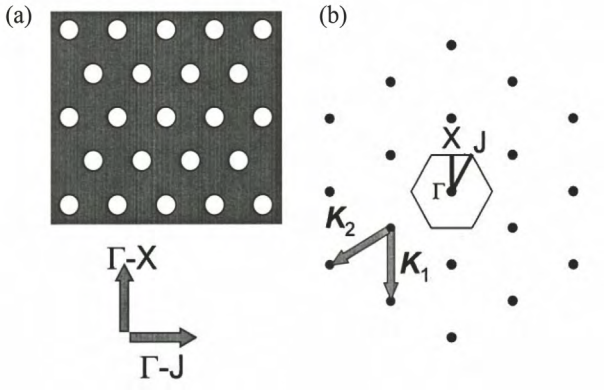

图 9　二维光子晶体[7]。(a)结构图；(b)倒易晶格

Fig. 9　Two-dimensional photon crystal[7]. (a) Structure chart; (b) reciprocal lattice

这里先对图 10 能带中光锥外的高对称点 I 和点 II 进行分析[7]，图 11 为点 I 和点 II 的波矢[7]。六角形结构为第一布里渊区，第一布里渊区内，当入射光波的波矢值为图中圆的半径时才能满足衍射条件，所以对于发生在点 I 的衍射，其衍射光波方向为其入射光的相反方向，对于发生在点 II 处的衍射光方向，则为两个不同的 Γ-J 方向。

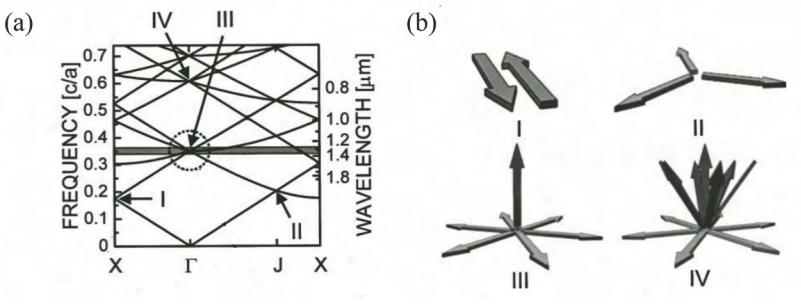

图 10　色散关系与耦合波传播方向[7]。(a)电磁波在二维光子晶体中传播的色散关系；(b)耦合波在点 I～IV 传播方向

Fig. 10　Dispersion relationship and coupling wave propagation direction[7]. (a) Dispersion relation of electromagnetic waves propagating in two-dimensional photonic crystal; (b) propagation direction of coupled waves at points I-IV

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

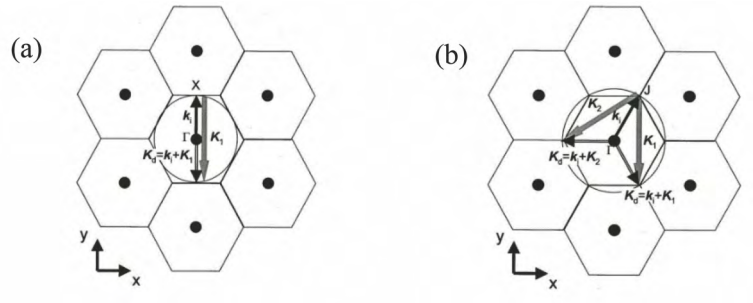

图 11　点 I 和点 II 的波矢[7]。(a)点 I 处波矢；(b)点 II 处波矢

Fig. 11　Wave vector diagrams of points I and II[7]. (a) Wave vectors at point I; (b) wave vectors at point II

图 12 为处于 X-Y 平面内点 III 处所发生的衍射，衍射波存在 5 个不同的 Γ-X 方向；并且衍射波 $\boldsymbol{k}_i+\boldsymbol{K}_1$ 同样由 Γ 点发出[7]。这种情况下，衍射波满足布拉格衍射条件，所以得到衍射光波垂直于光子晶体周期平面方向，如图 12 所示。这与传统光栅耦合表面发射激光器中的现象相同，由此可以利用这种现象制备出具有大面积出光且发散角很小的带边模式 PCSEL[8]。

图 13 为在点 IV 处发生在平面内和垂直于平面外的衍射[7]，与点 III 处发生的衍射情况类似，其存在 5 个 Γ-J 方向的衍射光和一个垂直于光子晶体周期平面方向的衍射光。与此同时，还存在沿底部 Γ-Γ' 方向倾斜的面外衍射。

综上可以得出结论，对于带边模式 PCSEL 而言，其没有传统意义上的谐振腔，但可以通过布拉格衍射使得特定模式的光波形成谐振，并获得垂直于光子晶体周期平面方向的激光输出。

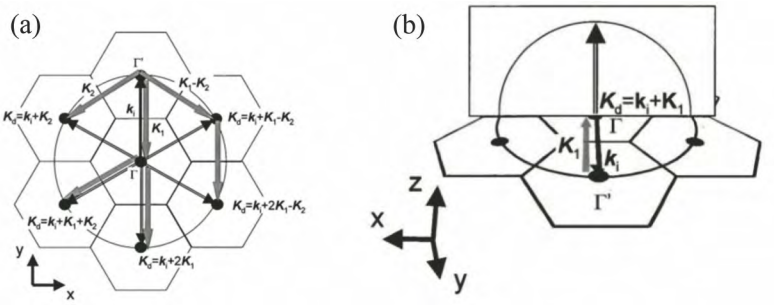

图 12　点 III 处发生的衍射波矢量[7]。(a)平面内的衍射波矢量；(b)垂直于光子晶体平面的衍射波矢量

Fig. 12　Diffraction wave vectors occurring at point III[7]. (a) Diffraction wave vectors in plane; (b) diffraction wave vectors perpendicular to plane of photonic crystal

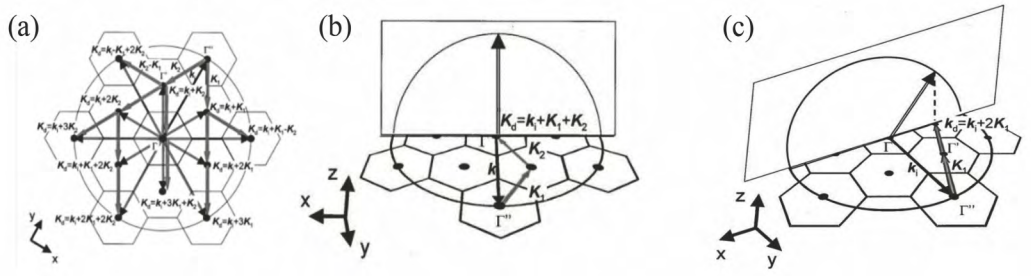

图 13　点 IV 在不同方向的衍射波矢量[7]。(a)光子晶体平面内；(b)垂直方向；(c)面外倾斜方向

Fig. 13　Diffraction wave vectors of point IV in different directions[7]. (a) In-plane of photonic crystal; (b) vertical direction; (c) out-of-plane tilt direction

3　带边模式 PCSEL 的研究进展

带边模式 PCSEL 无需生长布拉格反射镜(DBR)且具有单模工作、发散角小和易于集成的优点，在光纤通信波段的研究最先受到人们的重视。Imada 等[9]于 1999 年首次实现 1.3 μm 电泵浦光子晶体带边模式量子阱激光器的激射，在 1 kHz 脉冲电流下输出功率达到 20 mW。图 14 为利用晶圆融

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

合技术制备的二维三角晶格结构面发射激光器结构[9]，利用晶片熔融技术将量子阱有源区键合到有光子晶体结构的 n 型 InP 衬底上，成功地实现激光器在 1.3 μm 波段的面发射，阈值电流密度为 3.2×10^3 A/cm^2，其发散角仅为 1.8°。

PCSEL作为一种易于集成的袖珍版激光光源，在光纤耦合方面仍然具有巨大挑战。为了解决这一问题，2007 年，Park 等[10]提出了一种基于光纤耦合的 PCSEL 设计方案，通过 980 nm 波长的泵浦光实现了 1.55 μm 波段的光泵浦发射，其阈值功率为 200 μW。作为晶片融合的替代方案，在光子晶体上进行外延生长的技术得到了积极的发展，并且在电注入的 PCSEL 中取得了很好的应用。

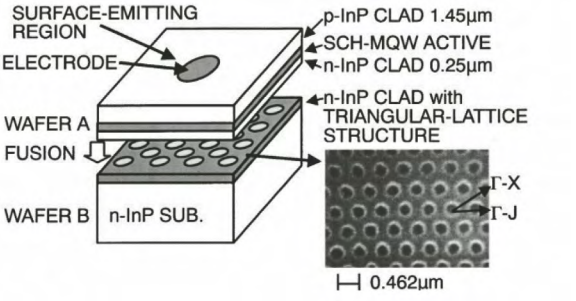

图 14　基于晶圆融合技术的二维三角晶格结构面发射激光器的结构示意图[9]

Fig. 14　Structure diagram of a two-dimensional triangular lattice surface emitting laser based on wafer fusion technology[9]

随着人们对光互联的需求进一步加大，具有阈值低和温度特性好等优点的量子点激光器再次进入人们视野，其与带边模式光子晶体相结合的器件在光纤通信中有着巨大优势。2017 年，台湾交通大学报道了一种基于 1.3 μm 量子点结构的电泵浦 PCSEL[11]，激光器结构如图 15 所示，使用较薄的上层结构设计，使得制备的二维光子晶体能够更贴近有源区，实现有效的相邻耦合。在二维光子晶体上沉积透明导电铟锡氧化物(ITO)，实现均匀电注入下的垂直激射，该激光器表征如图 16 所示，脉冲工作下的最大输出功率为 2 mW[11]。

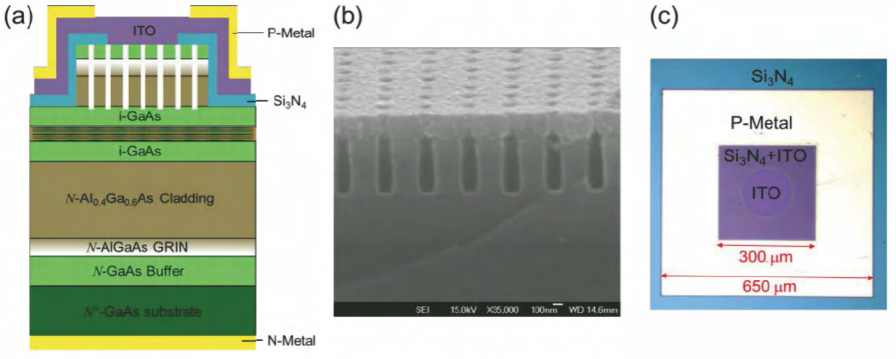

图 15　电注入 PCSEL 结构图[11]。(a)截面图；(b)扫描电镜斜角截面图像；(c)俯视图图像

Fig. 15　Structure of electrically injected PCSEL[11]. (a) Schematic of cross-section; (b) tilted-angle crosssectional image from scanning electron microscope; (c) top-view image

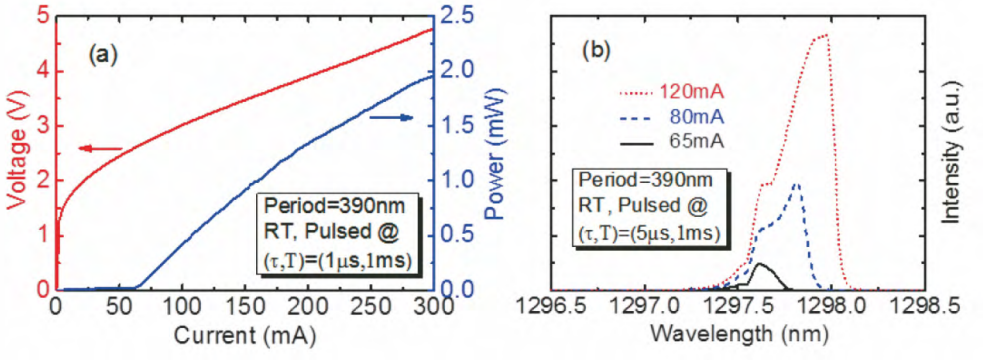

图 16　PCSEL 表征结果[11]。(a)量子点光子晶体激光器的功率-电流-电压曲线；(b)光谱特性图

Fig. 16　PCSEL characterization results[11]. (a) Power-current-voltage curves of quantum dot photonic crystal laser; (b) spectral characteristics

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基于成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺，硅基激光器以其更高的集成度和低功耗受到人们重视。带边模式 PCSEL 具有无需 DBR、窄线宽和高边模抑制比等优势，在硅基面发射激光器中有着巨大的应用前景。2017 年，美国德克萨斯大学报道了一种在硅基衬底上制备光子晶体并实现光泵浦的面发射激光器[12]，结构如图 17 所示。通过对不同尺寸器件的激光特性进行对比，对于带边模式 PCSEL 而言，尺寸越小其面内损耗越大且阈值越大，并提出可以通过增加光栅结构和底部金属反射器的设计以实现低阈值、小尺寸的光子晶体面发射器件[12]。

激光器加工方面，其较好的单模和小发散角特性同样有着极大优势。Noda 研究团队[13]在 2004 年首先报道了一种在 965 nm 波段工作的 PCSEL，该激光器表征如图 18 所示，室温连续电流条件下达到 4 mW 的输出，远场发散角为 1.1°。

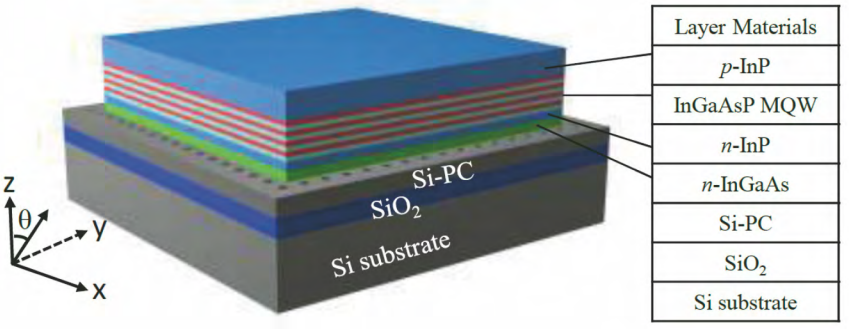

图 17　硅基 PCSEL 示意图[12]

Fig. 17　Schematic of silicon-based PCSEL[12]

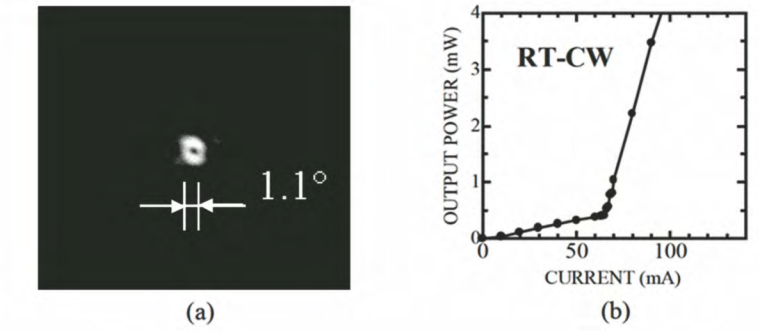

图 18　在 965 nm 波段下工作的激光器表征结果[13]。(a)远场发散角；(b)电流-功率特性曲线

Fig. 18　Characterization results of lasers operating under 965 nm band[13]. (a) Far-field divergence angle; (b) current-power caracteristic curve

由于有着大面积出光、窄线宽和单模的特点带边模式 PCSEL 在基于中红外和蓝紫光波段的生医感测和激光光源方面有着很大优势。但用于氮化物材料所需的光子晶体晶格常数较小，制作难度大，直到 2008 年，京都大学的 Yoshimoto 和 Noda 等[14]首次报道了一种在蓝紫光波段的 GaN 基 InGaN 量子阱 PCSEL，如图 19 所示。图 20 为室温和脉冲电流条件下，当电流为 9 A 时，输出功率为 0.67 mW，阈值电流和等效电流密度分别高达 6.7 A 和 6.7×10^4 A/cm^2[14]。

2014 年，台湾交通大学洪国彬等[15]报道了一种 GaN 基 PCSEL，研究了光子晶体的晶格常数、边界形状及晶格种类对激光器特性的影响，如图 21～23 所示。实验研究结果证明，可通过改变光子晶体的晶格常数实现激光器操作模态的改变，发现光子晶体的边界形状对激光器波长和半高宽没有显著影响，但圆形边界的阈值激发能量密度低于六边形边界。对六角晶格、四角晶格和蜂巢晶格进行比较时，得到蜂巢晶格的激发能量密度和发散角较小、四角晶格的激发能量密度和发散角最大，对今后发展高功率蓝紫光 GaN 光子晶体激光器具有较大的指导意义[15]。

中红外波段，2015 年台湾交通大学首次报道了一种在室温以上工作的基于 GaSb 的光泵浦半导体激光器，在 2.3 μm 波段实现室温条件下阈值电流密度为 0.3 A/cm^2，线宽为 0.3 nm 的激射[16]。

绿光波段，2020 年 1 月加拿大麦吉尔大学首次报道了一种利用光子晶体带边模式实现无反射层的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

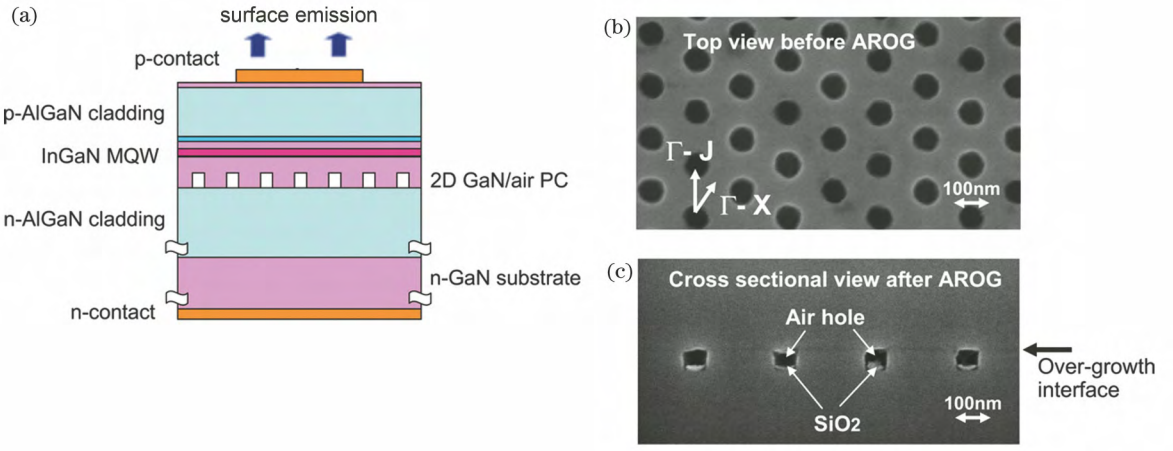

图 19　GaN 基 InGaN 量子阱 PCSEL 结构[14]。(a) GaN 基 PCSEL 的结构示意图；(b)三角形晶格空气孔；(c) PCSEL 横截面扫描电镜图像

Fig. 19　GaN-based InGaN quantum well PCSEL structure[14]. (a) Schematic structure of GaN-based PCSEL; (b) triangular lattice air holes; (c) scanning electron microscope image of PCSEL cross section

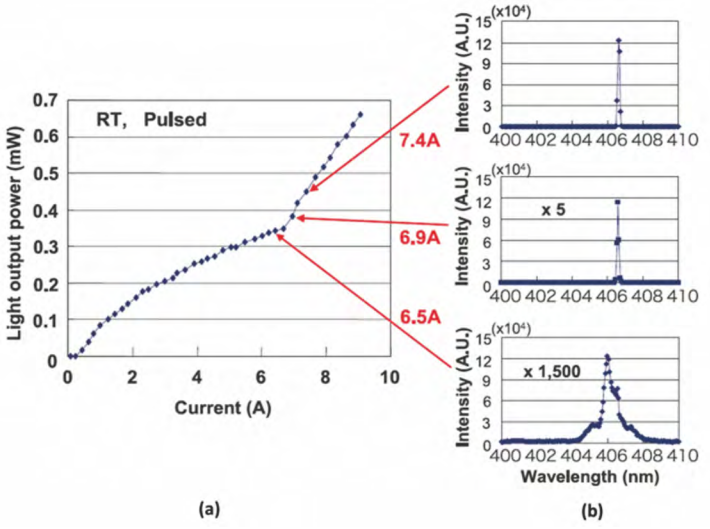

图 20　GaN 基 InGaN 量子阱 PCSEL 表征结果[14]。(a)室温下的电流与光输出功率特性；(b)不同阈值电流下的发射光谱

Fig. 20　GaN-based InGaN quantum well PCSEL characterization results[14]. (a) Current and optical output power characteristics at room temperature; (b) emission spectra at different threshold currents

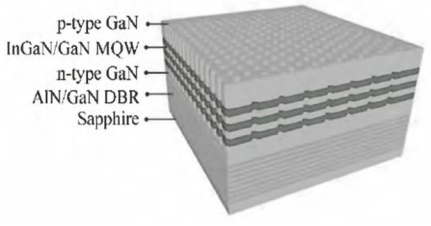

图 21　PCSEL 结构示意图[15]

Fig. 21　PCSEL structure diagram[15]

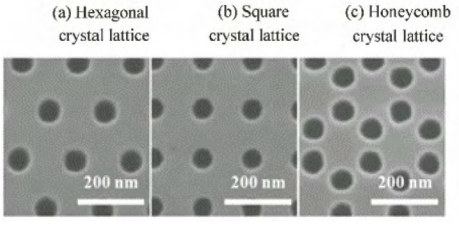

图 22　不同光子晶体结构的扫描电镜图像[15]

Fig. 22　Scanning electron microscope images of different photonic crystal structures[15]

523 nm 激光器，其阈值电流密度为 400 A/cm²，结构与特性曲线如图 24 所示。室温连续电流条件下，当电流密度为 1×10^3 A/cm² 时，输出功率达到 12 μW[17]。

综上，带边模式 PCSEL 有着相当广泛的应用，如表 1 所示。其中 QW 为量子阱，QD 为量子点，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

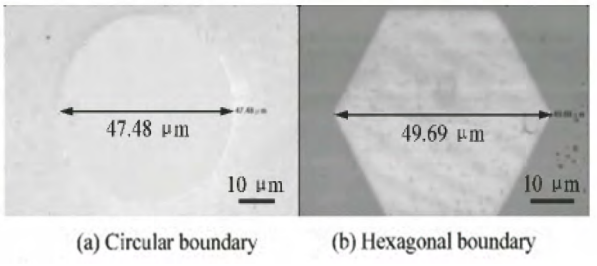

图 23　不同边界形状的光子晶体示意图[15]

Fig. 23　Schematic of photonic crystals with different boundary shapes[15]

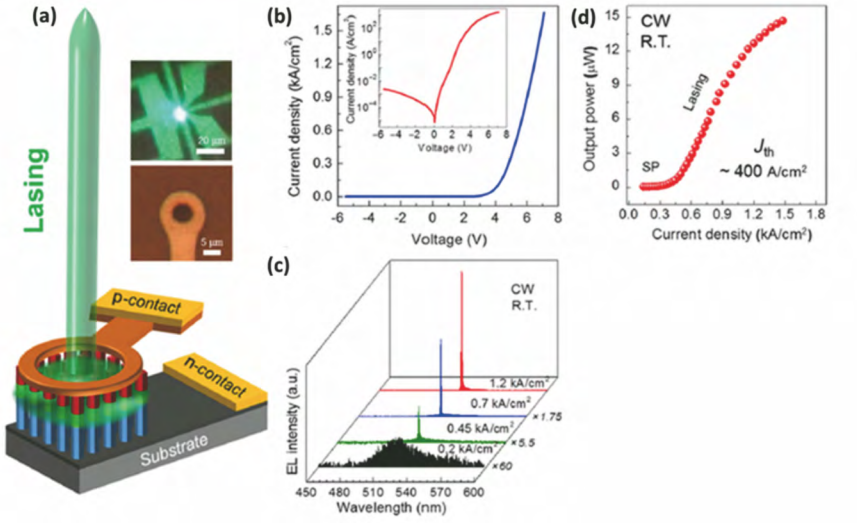

图 24　InGaN 的纳米晶体表面发射激光二极管的结构与表征[17]**。(a)纳米晶体面发射激光二极管结构；(b)激光器的伏安特性曲线；(c)室温连续电流条件下不同注入电流的电致发光光谱；(d)输出功率与注入电流变化曲线**

Fig. 24　Fabrication and characterization of InGaN nanocrystal surface-emitting laser diodes[17]. (a) Nanocrystal surface-emitting laser PCSEL; (b) current-voltage characteristics of laser; (c) electroluminescence spectra of different injection currents under continuous current conditions at room temperature; (d) variation curve of output power and injection current

表 1　几种典型的电泵 PCSEL 的主要参数

Table 1　Main parameters of several typical electrically pumped PCSEL

Year	λ/nm	Electric current density /(10^3 A/cm^2)	Maximum output power /mW	FWHM /nm	Divergence angle /(°)
1999	1300(QW)	3.20	RT-PC: 25.000	*	1.8
2017	1300(QD)	0.35	RT-PC: 2.000	0.36	*
2005	965	2.60	RT-CC: 4.000	0.35	1.1
2008	406	67.00	RT-PC: 0.670	0.15	1.0
2015	2300	0.30	*	0.13	*
2020	523	0.40	RT-CC: 0.015	0.80	*

RT-PC 为室温脉冲电流条件，RT-CC 为室温连续电流条件。但从表 1 不难看到，单纯依靠简单光子晶体结构的带边模式实现垂直出光和谐振的激光器，虽然具有发散角小和单模窄线宽的优点，但普遍难以达到较高的输出功率。为了解决这一问题，下一节将对带边模式 PCSEL 的功率增强方法进行简要的理论分析和举例。

4　带边模式 PCSEL 的功率增强方法

第 3 节主要对光子晶体种类、特点和带边模式 PCSEL 的研究进展进行简要介绍。虽然带边模式 PCSEL 具有大面积出光[7,17]、单模、可偏振控制[18]、良好的光斑形貌[19]和方向性等优点[20-21]，但完全依赖简单的光子晶体结构的带边模式 PCSEL，其输出

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

功率普遍不高。下面将对提高带边模式 PCSEL 输出功率的机理和方法进行阐述。

对于带边模式 PCSEL 而言，其光输出功率 P_{out} 与注入电流 I 关系为[22]

$$P_{out}=\frac{h\nu}{e}\eta_i\frac{\alpha_\perp}{\alpha_\perp+\alpha_\parallel+\alpha_i}\eta_{up}(I-I_{th}),\quad(6)$$

式中：e 为单位电荷；η_i 为内量子效率；$\alpha_\perp$ 为总的垂直辐射损失；$\alpha_\parallel$ 为平面辐射损失；α_i 为本征损耗，其主要由波导材料所引起的载流子吸收和粗糙的波导壁引起的散射损耗构成；$\eta_{up}=\alpha_{\perp up}/\alpha_\perp$ 为通过输出窗口向上的辐射损耗和总垂直辐射损耗的比值；I_{th} 为阈值电流。当谐振波长 λ_r（单位：μm）为已知时，斜率效率 η 可以表示为

$$\eta=\frac{1.24}{\lambda_r}\eta_i\frac{\alpha_\perp}{\alpha_\perp+\alpha_\parallel+\alpha_i}\eta_{up}。\quad(7)$$

由(7)式可知，对于波长一定和波导材料一定的 PCSEL 而言，一个大的垂直辐射常数 $\alpha_\perp$ 是获得高斜率效率的关键，同时也要尽可能减少面内损失 $\alpha_\parallel$。下面结合具体实例对如何提高带边模式 PCSEL 的功率进行介绍。

4.1　垂直方向加入 DBR

从 2.2 节可知，带边模式 PCSEL 是通过二阶光栅的衍射来实现垂直出光，如图 23 所示，其在垂直于光子晶体周期方向上存在上、下两个方向的衍射。若能有效利用方向向下的衍射光，进一步提高面发射功率是完全可能的。

研究发现，光子晶体激光器的输出功率与腔内光约束的垂直分量有很强的相关性，用垂直质量因子（Q_v）表示。通过在器件底部引入反射镜来控制光子晶体腔上下发射光的相位关系来改变 Q_v[23-24]。2009 年，京都大学 Noda 等[23]制备的 PCSEL，如图 25 所示，在器件底部引入 DBR，该激光器的效率由直接向上衍射光与向下衍射后再向上反射光之间的相位差控制。当两种光波的相位相匹配时，产生了相长干涉，使得 Q_v 值最小，从而输出功率最大。相反，当两束光波完全不同步时，由于相消干涉，Q_v 值达到最大，输出功率最小[23]。激光器在脉冲电流条件下的输出功率达到 700 mW，在此基础上 Noda 等[23]又制备了以单个面积为 0.02 mm² 的光子激光器组成的总面积为 0.4 mm² 的激光器面阵，室温和脉冲电流条件下实现 986 nm 波长、35 W 的极高输出功率，且半高全宽为 0.2 nm，发散角仅为 1°[23]，如图 26 所示。

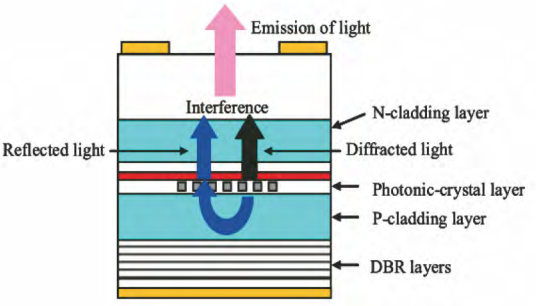

图 25　具有 DBR 的 PCSEL 结构示意图[23]

Fig. 25　Schematic of PCSEL structure with DBR[23]

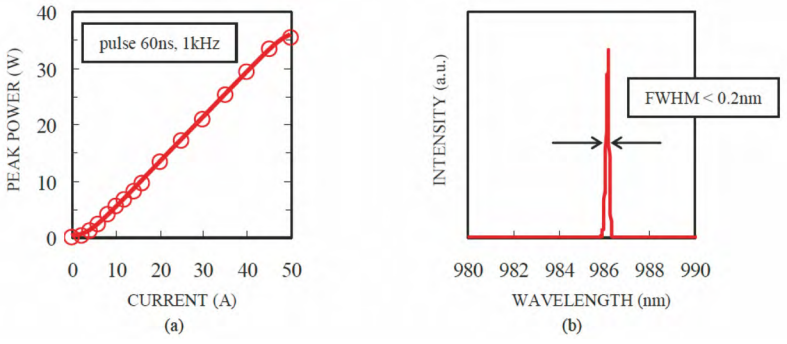

图 26　DBR 的 PCSEL 表征结果[23]。(a) PCSEL 阵列的功率-电流特性；(b) PCSEL 光谱图

Fig. 26　PCSEL characterization results of DBR[23]. (a) Power-current characteristic of PCSEL array; (b) spectrum of PCSEL

4.2　非对称空气孔增强垂直辐射常数

2014 年，日本京都大学 Noda 团队[25]通过对比直通型空气孔和垂直方向上不对称的空气孔结构的辐射常数（Radiation constant）[(7)式 η_{up} 值]，发现垂直方向不对称空气孔结构可以显著提高 PCSEL 的垂直输出功率[25-26]，有无垂直不对称空气孔结构的辐射常数对比如图 27 所示。

利用这种特性实现了一种采用在垂直方向上不对称空气孔组成的带边模式 PCSEL[25]，其结构如图 28 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

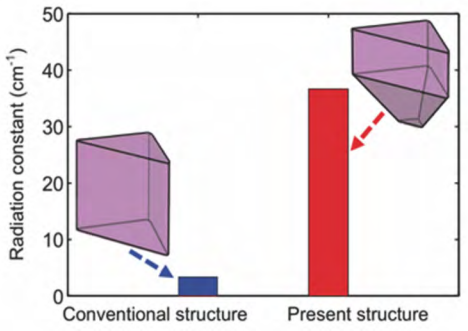

图 27　有无垂直不对称空气孔结构的辐射常数对比[25]

Fig. 27　Comparison of radiation constants with or without vertical asymmetric air hole structure[25]

先通过金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）在n型GaAs衬底上按顺序生长n-AlGaAs盖层、InGaAs/AlGaAs多量子阱构成的有源区、AlGaAs载流子阻挡层和GaAs层，利用电子束光刻技术和干法刻蚀技术在GaAs层表面制备光子晶体结构。该二维光子晶体结构为一个正方形晶格，其中每个晶格点为一个直角等腰三角形形状的三棱柱状空气孔[25]，如图29所示。再通过二次外延生长GaAs材料薄膜，直到光子晶体的空气孔被完全覆盖。由于空气孔内不同晶面的GaAs生长速率不同，所以形成了特殊空气孔结构[24]，最后生长p-AlGaAs盖层和p-GaAs接触层。该激光器实现了980 nm波段的单模高功率激射，其发散角小于3°，室温连续输出功率达到1.5 W[25]。

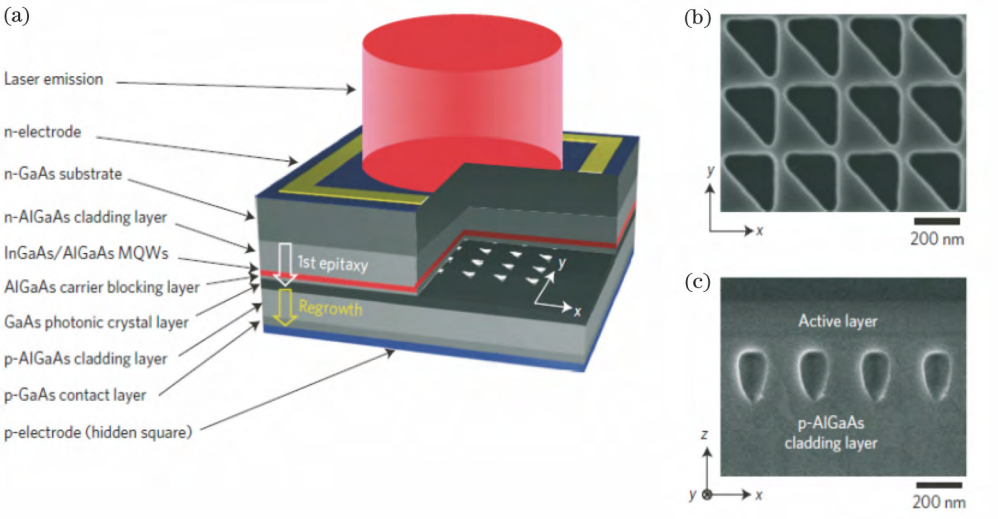

图 28　PCSEL结构示意图与光子晶体的扫描电镜图像[25]。(a) PCSEL结构示意图，箭头表示第一次外延和第二次外延的生长方向；(b)正方形晶格的光子晶体在使用MOCVD进行二次外延前的顶部俯视电镜图；(c)二次外延后光子晶体空气孔的截面扫描电镜图

Fig. 28　Schematic of PCSEL structure and scanning electron microscope images of photonic crystal[25]. (a) Schematic of PCSEL structure, arrows indicate rowth direction of first and second epitaxy; (b) top view electron micrograph of square lattice photonic crystal before using MOCVD for second epitaxy; (c) second cross-sectional scanning electron micrograph of photonic crystal air hole after epitaxy

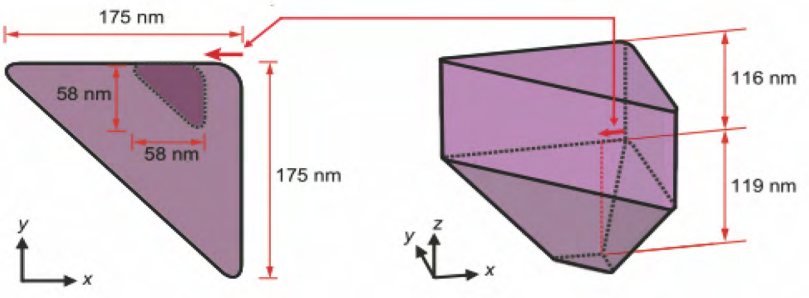

图 29　单个空气孔的上试图和左视图，空气孔结构近似为一个三棱柱和一三棱锥的组合[25]

Fig. 29　Upper attempt and left view of single air hole structure approximating triangular prism and triangular pyramid[25]

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.3　双晶格光子晶体结构

2007 年，日本京都大学 Noda 等[24]通过增大二维光子晶体的面积达到减少面内损失$\alpha_{\parallel}$的目的，从而改善斜率效率。当二维光子晶体的面积变大时，其面内的电磁场分布会变得不均匀，系统的稳定性变差，如图 30(a)所示。如果引入双晶格空气孔，中心位置的场分布均匀性得到很大改善，图 30(b)所示[24]。

双孔结构衍射结果如图 31(a)所示，其双晶格空气孔由大、小两个空气孔组成，各自的大孔和小孔阵列均满足光程差为 $\lambda/2$，在光子晶体平面方向上满足相消干涉的条件，反馈效应变弱。另一方面，大孔和小孔的位置在垂直和水平方向上的光程差均为 $\lambda/4$，不满足相消干涉的条件，所以光的提取效率不变[24]。因此，双晶格结构在避免光局域化的同时可增加激光发射面积，实现低发散角光子晶体激光器在室温环境下连续工作[24]，二维光子晶体激光器结构如图 32 所示。实验证明器件的功率约为 60 mW[24]，如图 33 所示。

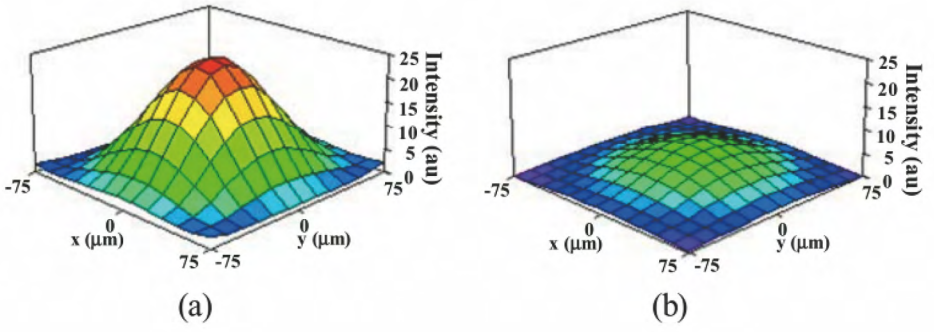

图 30　光子晶体腔内的光强分布[24]。(a) 比实验装置面积大 10 倍的单空气孔单元装置；(b)面积与(a)相同的双孔单元结构

Fig. 30　Light intensity distribution in photonic crystal cavity[24]. (a) Single air hole unit with area 10 times larger than experimental device; (b) double-hole cell structure with the same area as (a)

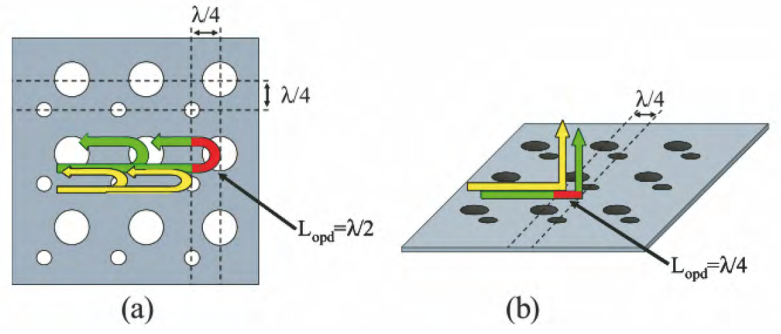

图 31　双孔结构衍射[24]。(a)平面衍射；(b)垂直衍射

Fig. 31　Double pore structure diffraction[24]. (a) Plane diffraction; (b) vertical diffraction

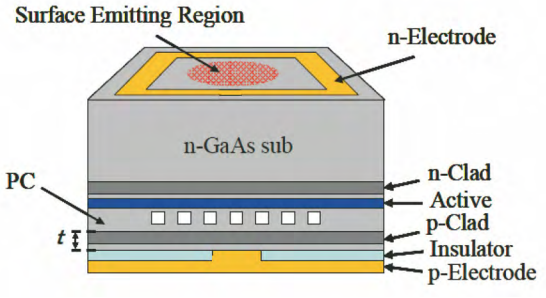

图 32　二维光子晶体激光器结构示意图[24]

Fig. 32　Schematic of two-dimensional photonic crystal laser structure[24]

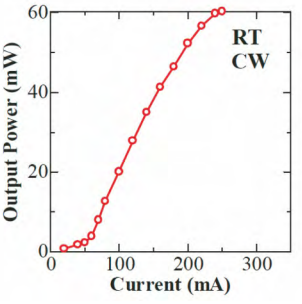

图 33　电流-功率特性曲线[24]

Fig. 33　Current-power characteristic curve[24]

为了进一步降低发散角，提高功率，2017 年 Noda 等[27]将双晶格圆形空气孔改成椭圆孔，再二次外延使得其在垂直方向上形成不对称结构，最终

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实现了在室温和脉冲条件下(脉冲宽度为 100 ns,频率为 1 kHz)最高功率为 4.5 W 的激光器,如图 34 和图 35 所示。该激光器的光子晶体面积为 300 μm×300 μm,阈值电流525 mA,斜率效率为 0.6 W/A,光束发散角降低到 0.2°以下[27],如图 36 所示。

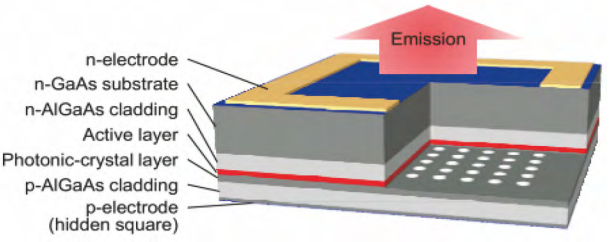

图 34　PCSEL 结构示意图[27]

Fig. 34　PCSEL structure diagram[27]

2018 年,该团队采用椭圆孔与圆形孔组合的方式构成双晶格光子晶体,使其面积增大到 800 μm×800 μm,光在光子晶体平面的分布变得均匀的同时保留了光学谐振腔的二维平面衍射特性[28],如图 37 所示。此外还在器件底部生长了 DBR 来提高面发射输出功率,最终在 939.5 nm 波段实现室温连续 5 W功率的输出,5 ℃时其最高输出功率达到 7 W[28],如图 38 所示。

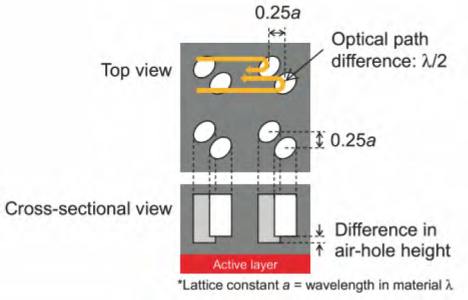

图 35　椭圆双晶格结构示意图[27]

Fig. 35　Schematic diagram of elliptic double lattice structure[27]

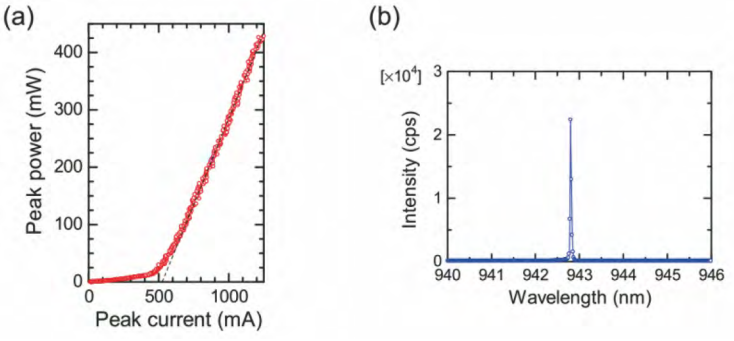

图 36　不对称结构的激光器表征结果[27]。(a)电流-功率特性曲线;(b)电流为 1000 mA 的光谱

Fig. 36　Laser characterization results of asymmetric structure[27]. (a) Current-power characteristic curve; (b) spectrum of current at 1000 mA

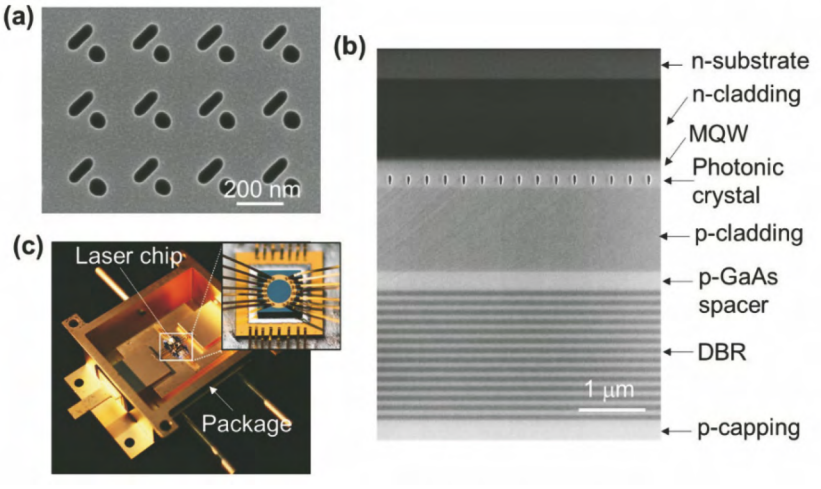

图 37　双晶格光子晶体激光器结构[28]。(a)双晶格光子晶体扫描电镜图像;(b) PCSEL 横截面扫描电镜图;(c)封装后实物图

Fig. 37　Double lattice photonic crystal laser structure[28]. (a) Scanning electron microscope image of double lattice photonic crystal; (b) scanning electron microscope image of PCSEL cross-section; (c) physical picture after packaging

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

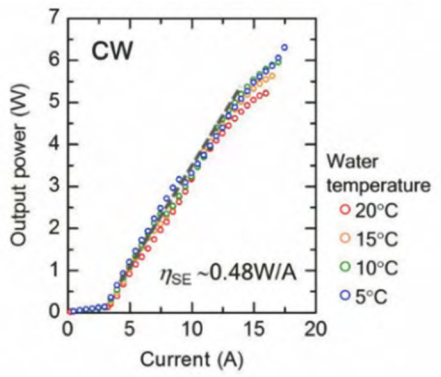

图 38　不同温度下激光器的电流-功率特性曲线[28]

Fig. 38　Current-power characteristic curves of laser at different temperatures[28]

4.4　耦合腔

对于面积有限的 PCSEL 而言，其光子晶体区域边缘会存在一定的能量损耗，如图 39(a)所示，这种损耗会随着边界的光滑程度的提高而减小。通常 PCSEL 的光子晶体边界是通过刻蚀所得到，无法提供较高的反射率。考虑到工艺的简便性，可以通过引入 Fabry-Perot(FP)腔的方式来减少光子晶体边缘处光的泄漏，增强横向谐振[29-31]，如图 39(b)所示。

2011 年，中国科学院半导体研究所郑婉华课题组[32]报道了一种在无 DBR 结构的商业外延波导上实现了电泵横向腔 PCSEL(LC-PCSEL)，结构如图 40 所示。图 41 为利用深孔刻蚀技术使光子晶体深达2.6 μm，穿透了有源区，对有源区的模式进行直接调制[32]。通过较小区域的光子晶体与 FP 腔的融合集成，利用光子晶体带边模式的横向振荡与垂直输出特性，室温下获得了 1553.8 nm 的面发射激光，谱宽为 0.4 nm，阈值电流密度为 667 A/cm^2，纵向和横向的远场发散角分别为 7.5°和 5.5°[29,32]，但输出功率仅有百微瓦量级，如图 42 所示。

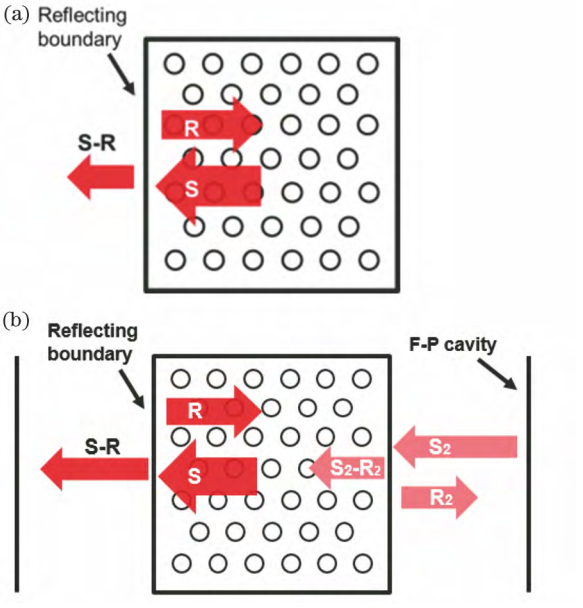

图 39　光子晶体腔与 FP 耦合腔表征[31]。(a)光子晶体区域边缘能量的损耗；(b)引入 FP 腔的结构

Fig. 39　Photonic crystal cavity and coupling cavity with FP[31]. (a) Loss of energy at edge of photonic crystal region; (b) structure introduced into FP cavity

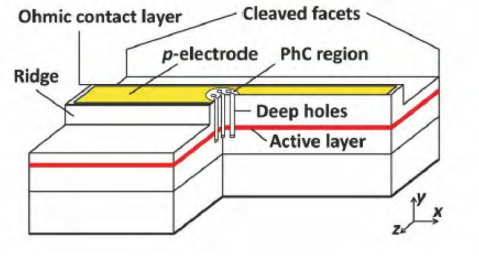

图 40　LC-PCSEL 的结构示意图[32]

Fig. 40　Schematic structure of LC-PCSEL[32]

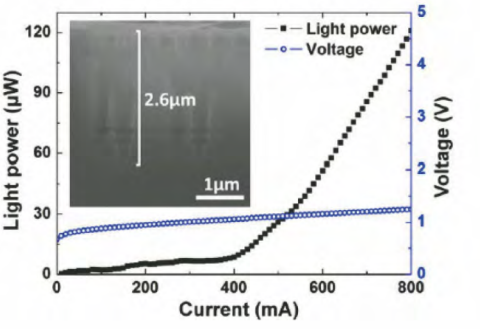

图 41　LC-PCSEL 器件的功率-电流-电压曲线和深孔横截面[32]

Fig. 41　Power-current-voltage curves and deep hole cross section of LC-PCSEL device[32]

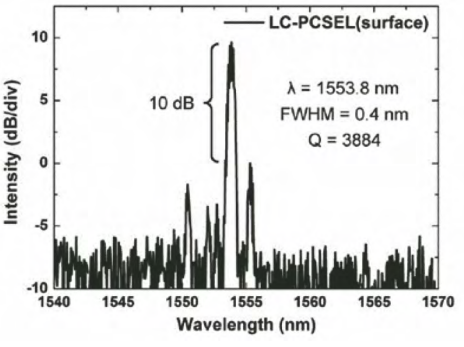

图 42　LC-PCSEL 的面发射光谱[32]

Fig. 42　Surface-emitting spectrum of LC-PCSEL[32]

2013 年，该团队通过优化光子晶体结构，对 FP 腔端面蒸镀高反射介质膜，在室温 400 mA 的电流下，实现 1575 nm 波段的输出功率为 1.8 mW，光谱半高全宽为 0.1 nm[33]，如图 43 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

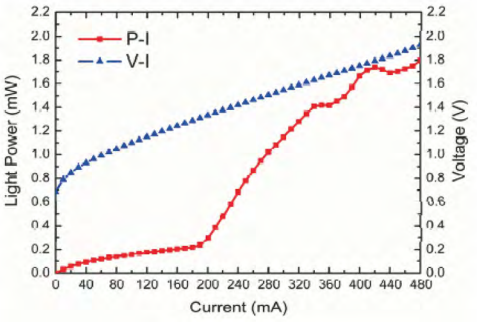

图 43　LC-PCSEL 的功率-电流-电压曲线[33]

Fig. 43　Light-current-voltage curves of LC-PCSEL[33]

除了 FP 腔以外，光栅或光子晶体结构同样可以对面内损耗进行限制[34]。2019 年，美国德州大学报道了一种以光子晶体横向为限制，能够在室温环境下使光泵浦工作的基于单层二硫化钨的 PCSEL，其光子晶体腔由边长仅为 8 μm 的正六边形光子晶体区域构成[35]，如图 44 所示。

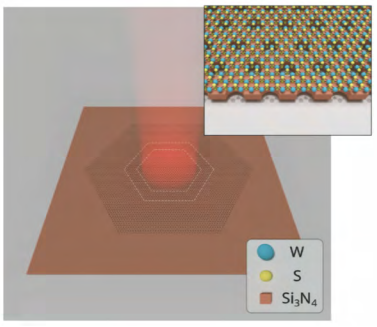

图 44　基于二硫化钨的 PCSEL[35]

Fig. 44　PCSEL based on WS_2[35]

4.5　引入平带

2015 年，麻省理工学院报道了一种具有特殊能带结构的正方晶格圆形气孔组成的光子晶体。通过调整空气孔的半径，得到了一个具有特殊狄拉克锥和平带结构的能带[36]，如图 45 所示。由 $V_g = d\omega/dk$ 可知，当能带结构中出现平带时，意味着对于处在其频率的光来说产生驻波的位置，从特殊的高对称点拓展到高对称点周围的区域，光增益得到增强，出光区域扩大。

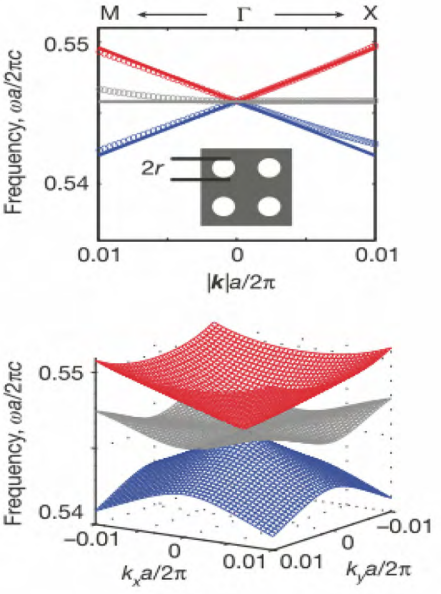

图 45　正方形晶格圆形气孔组成的二维光子晶体的带结构[36]

Fig. 45　Band structure of two-dimensional photonic crystal composed of square lattice and round pores[36]

2019 年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所佟存柱等[31]将这种具有平带结构的光子晶体引入 PCSEL 中，用以提高其输出功率。图 46 为计算的三角晶格空气孔组成的光子晶体能带，通过调整空气孔半径获得了如麻省理工学院所述的平带（能带 B 中 B_1 到 B_2 部分）[31]。对其群速度进行表征，表征结果如图 47 所示，可以清楚地看到处于平带位置的群速度为零[31]。

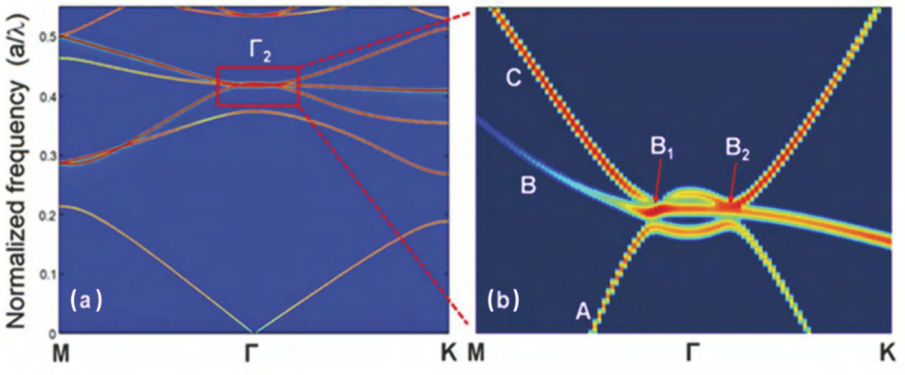

图 46　二维光子晶体的能带结构[31]。(a)调整半径获得平带结构的三角晶格光子晶体能带；(b)点 Γ_2 附近能带结构图

Fig. 46　Band structure of two-dimensional photonic crystal[31]. (a) Photonic band of triangular lattice with flat band structure is obtained by adjusting radius; (b) near point Γ_2 band structure

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

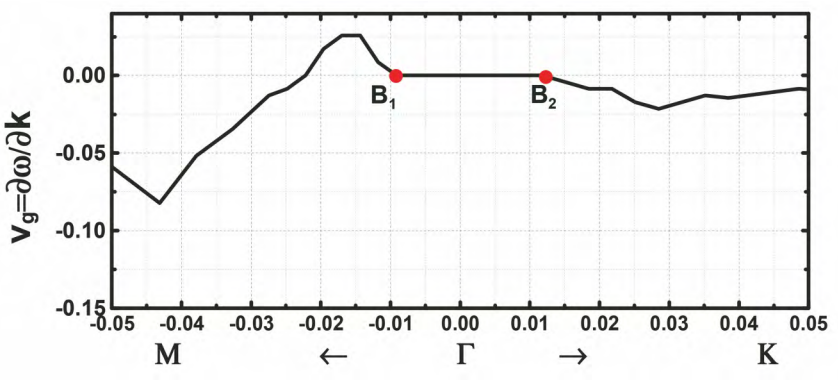

图 47　能带 B 的群速度[31]

Fig. 47　Group velocity of band B[31]

所看到的能带图为在第一布里渊区中高对称点处能级的展开图。为了更直观的体现，将其还原成三维，如图 48 所示，图中 Γ、M、K 为第一布里渊区中高对称点，这里可以近似认为由 Γ，B_1，B_2 所圈定区域内对指定波长的光子来说群速度为零。由于其具有高度对称性，可以推出在第一布里渊区内其对应频率光子的零群速度区域，如图 49 所示包含 Γ 点的中心圆形部分[31]。与一般的带边模式 PCSEL 相比，提出的结构在第一布里渊区产生谐振与出光区域由零维的点变成二维的面[31]。

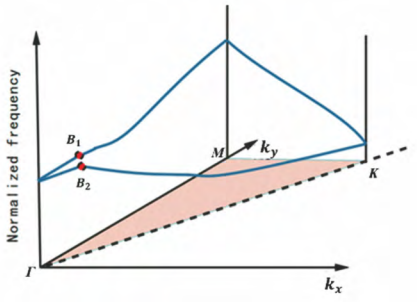

图 48　三维能带图

Fig. 48　Three-dimensional band diagram

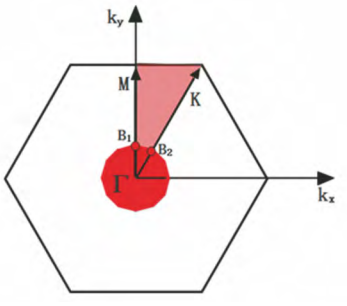

图 49　二维三角晶格光子晶体的第一布里渊区[31]

Fig. 49　1st Brillouin region of two dimensional triangular photoniccrystal[31]

根据带边模式 PCSEL 功率增强的原理，所在团队利用光子晶体的平带特性（增强光子晶体态密度以增强光与物质的相互作用）在实验上实现了高功率的 1.3 μm InAs/GaAs 量子点 PCSEL[31]，如图 50 所示。脉冲电流条件和连续电流条件下 PCSEL 的特性曲线[31]，如图 51 和图 52 所示。该激光器在室温环境下，连续波输出功率达到 13.3 mW，这高于此前报道过的任何 1.3 μm InAs 量子点面发射激光器。该激光器在室温环境下的最高脉冲功率为 150 mW，也可以在 90 ℃高温下工作。连续工作温度最高可达 60 ℃，整个光子晶体区域面积为 200 μm×200 μm，在大规模长距离光互连的应用上具有较大前景[31]。

4.6　引入拓扑光子晶体

2020 年，北京大学物理学院马仁敏研究员课题组[37]发现了拓扑能带反转光场限制效应，将拓扑态的应用由拓扑边缘态扩展至拓扑体态，并基于此实现了一种高性能的拓扑体态面发射激光器。这种新型激光器的直径只有几微米，具有良好的垂直发射方向性、窄线宽、单横模和单纵模的特性，能够在室温下以千瓦每平方厘米的阈值稳定工作，单模输出边模抑制比超过 36 dB。该类激光器的实现有赖于实验中发现的一种新型光反射和限制机制：能带反转光场限制效应。图 53 为能带反转光场限制效应和基于其实现拓扑体态激光器的原理，拓扑体态激光器出射方向垂直于光学腔反馈平面[37]。实验中先对二维光子晶体进行变形操作，分别获得了具有拓扑态和拓扑平庸态的能带结构；相较于拓扑平庸态，拓扑态的光子晶体能带结构中可发生偶极子和四极子能带间的能量反转。实验和理论计算发现，频率靠近能带边缘的光场虽然在拓扑态和拓扑平庸态中都可以自由传输，但在两者的界面处会发生由能带反转引起的光场发射。该能带反转引起的光场反射和限制效应仅发生在布里渊区中心附近，越靠

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

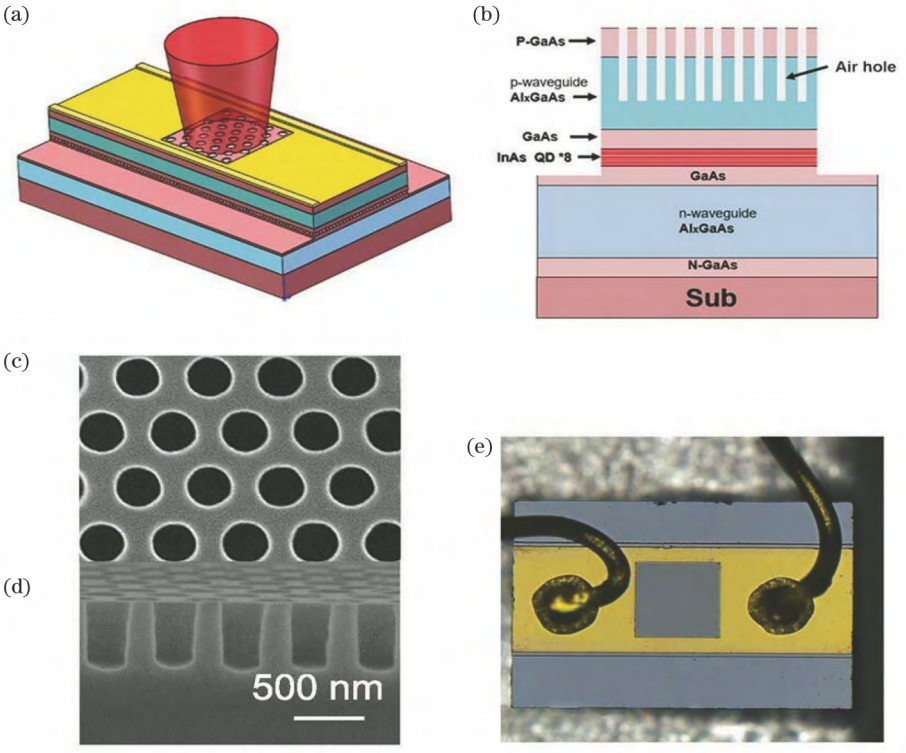

图 50　1.3 μm InAs/GaAs 量子点 PCSEL 的结构示意图以及光子晶体的扫描电镜图像[31]。(a)结构原理示意图；(b)结构的剖面；(c)光子晶体的俯视图；(d)光子晶体的剖面图；(e)实物图

Fig. 50　1.3 μm InAs/GaAs quantum dot PCSEL structure diagram and scanning electron microscope image of photonic crystal[31]. (a) Schematic of structure principle; (b) plan view of structure; (c) top view of photonic crystal; (d) top view and plan view of photonic crystal; (e) physical diagram of laser

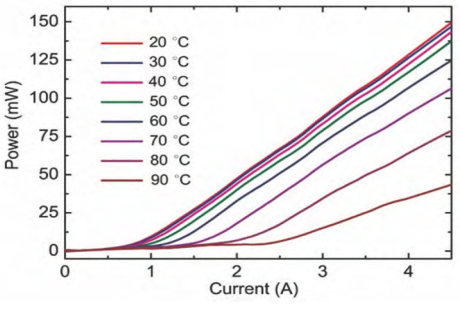

图 51　脉冲电流条件下 PCSEL 的变温电流-功率特性曲线[31]

Fig. 51　Varying temperature current-power characteristic curves of PCSEL under pulse current condition[31]

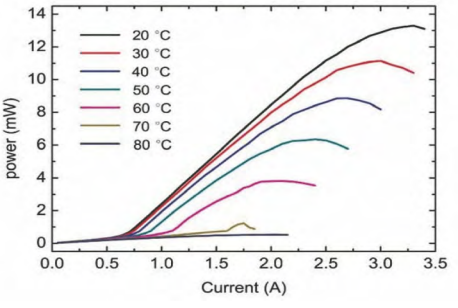

图 52　连续电流条件下 PCSEL 的变温电流-功率特性曲线[31]

Fig. 52　Variable temperature current-power characteristic curves of PCSEL under condition of continuous current[31]

近布里渊区中心，光场反射和限制越有效，使得利用该类型反射机制构建的拓扑体态激光器具有单横模、单纵模、面内反馈和垂直出射等优异特性[37]。

能带反转光场反射和限制效应为激光物理提供了一种新颖的激光模式选择和出射光场调控机制，基于该原理构建的新型拓扑激光器的各项性能均达到了可商业化应用水平[37]，如图 54 所示。新的光场反射和限制机制将拓扑态的应用由拓扑边缘态扩展至拓扑体态，同时该原理可以拓展到电子学、声学和声子学等领域。

本课题组给出利用不同器件结构对输出功率进行加强的电泵浦激光器，其在室温脉冲电流条件下的单位面积最大输出功率对比，如图 55 所示。从图 55 可以看到，增加 DBR 和不对称空气孔结构对输出功率的提高最为明显；但 DBR 的引入有违于采用带边模式光子晶体的初衷，垂直方向不对称空气孔构型又大大增加了工艺的复杂性；FP 耦合腔对功率提升最弱，这是因为其对光的横向限制不够强所导致，若采用其他强限制结构可对输出功率有更大提

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

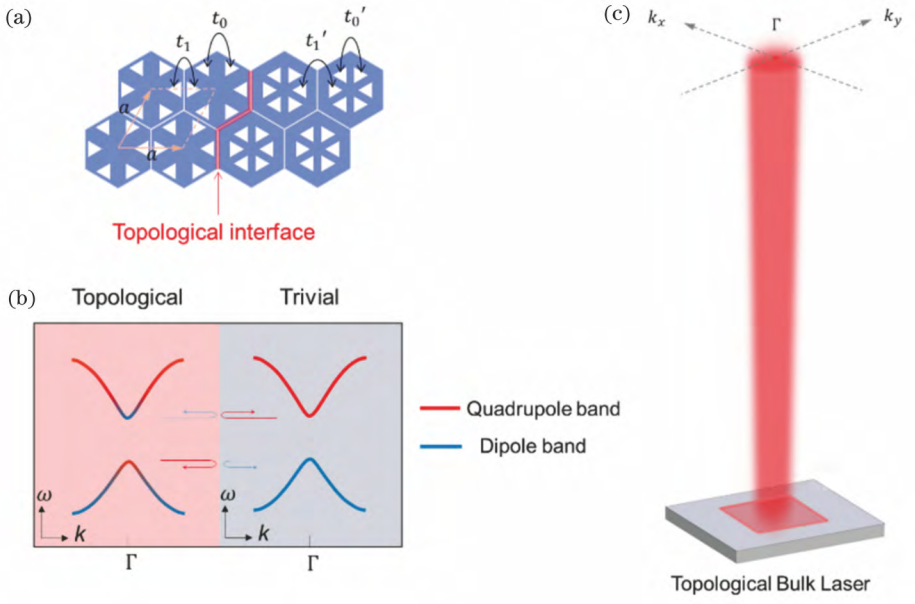

图 53　拓扑体态激光器的原理示意图[37]。(a) 三角形纳米孔被移离或移向各结构个中心，分别形成拓扑和平凡的光子能带；(b) 拓扑和平凡光子晶体在实际空间中接触时的能带；(c) 垂直发射拓扑体态激光器

Fig. 53　Schematic of topological posture laser[37]. (a) Triangular nanopoires are moved away from or towards centers of each structure to form topological and trivial photon energy bands, respectively; (b) bands of topological and trivial photonic crystals when they contact in real space; (c) vertically emitting topological posture lasers

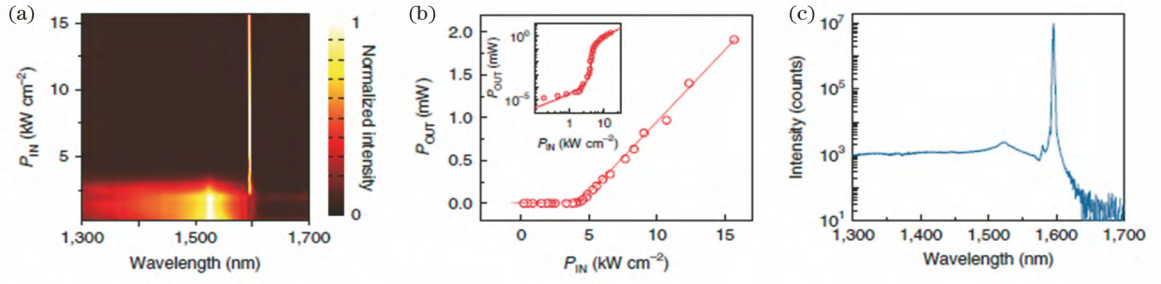

图 54　拓扑体态激光器的性能[37]。(a)波长随功率变化的光谱；(b)输出功率与泵浦强度关系的拟合曲线；(c)激射光谱

Fig. 54　Performance of topological posture laser[37]. (a) Spectrum of wavelength varying with power; (b) fitting curve of relationship between output power and pump strength; (c) maser spectrum

升；双晶格结构和平带模式对输出功率的提升有很大作用，但平带结构从原理上会带来发散角增大的缺陷，需要进一步的改进和研究。除此之外，最近对于拓扑光子晶体在激光器的应用引起了人们的广泛关注，其在原理上对横向谐振和边缘泄漏有着更好的增强和限制作用，值得进一步研究。

5　总结与展望

对带边模式 PCSEL 的发展进行简要介绍，通过其与传统边发射激光器和 DFB 激光器的谐振方式进行比较，对其产生谐振的原理和垂直于出光的特性进行细致的论述。从理论上对如何提高带边模式 PCSEL 的功率进行分析。结合实例，列举几种提高 PCSEL 功率的具体实施方法。最后对平带理论进行了理论分析，提出一种新的提高带边模式 PCSEL 输出功率的方式。

带边模式的 PCSEL 作为一种新型的单模大功率和低发散角光源在光传感、通讯、工业与军事领域中有着广泛的应用前景。目前的发展趋势是将具有狄拉克锥与拓扑结构的光子晶体引入到该类激光器中，利用其特殊的能带结构与物理特性进一步提高激光器的性能。

但其未来发展还面临两个难点：其一是在进行光子晶体的理论设计中，由于出光面积不断扩大，计算量巨增，耗时长，效率低，目前还难以精确模拟几百微米尺度 PCSEL 的远场特性；另一点是在光子晶体规模化制备方面，由于微纳加工手段的限制，还难以快速、低成本和精确地制备大面积小周期和小

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

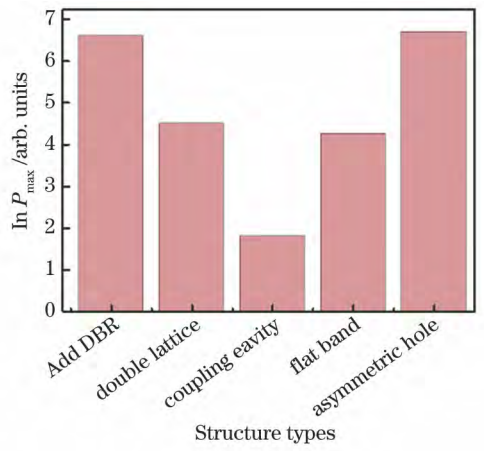

图 55　不同器件结构的电泵浦激光器在室温脉冲电流条件下的单位面积最大输出功率对比

Fig. 55　Comparison of maximum output power per unit area of electro-pumped lasers with different device structures under pulsed current at room temperature

原胞尺寸的光子晶体结构，而且光子晶体刻蚀后，粗糙的侧壁会导致载流子界面复合，降低激光器的量子效率。这些问题都有待于在目前的研究基础上进一步解决。

参　考　文　献

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.

[2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.

[3] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic crystals molding the flow of light[M]. 2nd ed. New Jersey: Princeton University Press, 2008.

[4] Chen Y Q, Wang J H. Laser principle [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992.
陈钰清，王静环. 激光原理[M]. 杭州：浙江大学出版社，1992.

[5] Streifer W, Scifres D, Burnham R. Coupled wave analysis of DFB and DBR lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1977, 13(4): 134-141.

[6] Tong L M. Nanophotonics research frontier [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2014.
童利民. 纳米光子学研究前沿[M]. 上海：上海交通大学出版社，2014.

[7] Imada M, Chutinan A, Noda S, et al. Multi directionally distributed feedback photonic crystal lasers[J]. Physical Review B, 2002, 65(19): 195306.

[8] Noda S, Kojima K, Kyuma K, et al. Reduction of spectral linewidth in AlGaAs/GaAs distributed feedback lasers by a multiple quantum well structure [J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(14): 863-865.

[9] Imada M, Noda S, Chutinan A, et al. Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(3): 316-318.

[10] Park Y, Kim S, Moon C, et al. Butt-end fiber coupling to a surface-emitting Γ-point photonic crystal band edge laser[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(17): 171115.

[11] Hsu M Y, Lin G, Pan C H. Electrically injected 1.3-μm quantum-dot photonic-crystal surface-emitting lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32697-32704.

[12] Liu S C, Zhao D Y, Yang H J, et al. Lateral size scaling of photonic crystal surface-emitting lasers on Si[C]// 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 14-19, 2017, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 17311500.

[13] Ohnishi D, Okano T, Imada M, et al. Room temperature continuous wave operation of a surface-emitting two-dimensional photonic crystal diode laser [J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1562-1568.

[14] Hideki M, Susumu Y, Hirohisa S, et al. GaN photonic-crystal surface-emitting laser at blue-violet wavelengths[J]. Science, 2008, 319(5862): 445-447.

[15] Hong G B, Yang J J, Lu T C, et al. Blue-violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers [J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 559-571.
洪国彬，杨钧杰，卢廷昌，等. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器[J]. 中国光学，2014, 7(4): 559-571.

[16] Pan C H, Lin C H, Chang T Y, et al. GaSb-based mid infrared photonic crystal surface emitting lasers [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11741-11747.

[17] Ra Y H, Rashid R T, Liu X H, et al. An electrically pumped surface-emitting semiconductor green laser [J]. Science Advances, 2020, 6(1): eaav7523.

[18] 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.

[19] Miyai E, Sakai K, Okano T, et al. Lasers producing tailored beams[J]. Nature, 2006, 441(7096): 946.

[20] Kurosaka Y, Iwahashi S, Liang Y, et al. On-chip beam-steering photonic-crystal lasers [J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 447-450.

[21] Iwahashi S, Kurosaka Y, Sakai K, et al. Sophisticated vector beams produced by photonic-crystal lasers[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

United States. Washington, D. C.: OSA, 2010: CTuO1.

[22] Chuang S L. Physics of photonic devices[M]. 2nd ed. Singapore: Wiley Publishing, 2012.

[23] Sakaguchi T, Kunishi W, Arimura S, et al. Surface-emitting photonic-crystal laser with 35 W peak power [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/ International Quantum Electronics Conference, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland United States. Washington, D.C.: OSA, 2009: CTuH1.

[24] Otsuka K, Sakai K, Kurosaka Y, et al. High-power surface-emitting photonic crystal laser[C] // LEOS 2007-IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, October 21-25, 2007, Lake Buena Vista, FL, USA. New York: IEEE, 2007: 562-563.

[25] Hirose K, Liang Y, Kurosaka Y, et al. Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 406-411.

[26] Iwahashi S, Sakai K, Kurosaka Y, et al. Air-hole design in a vertical direction for high-power two-dimensional photonic-crystal surface-emitting lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(6): 1204-1207.

[27] Yoshida M, de Zoysa M, Hatsuda R, et al. Elliptical double-hole photonic-crystal surface-emitting lasers [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE, 2017: 17391778.

[28] de Zoysa M, Yoshida M, Ishizaki K, et al. 7 W CW operation of double-lattice photonic-crystal lasers [C] // 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), September 16-19, 2018, Santa Fe, NM, USA. New York: IEEE, 2018: 18243144.

[29] Zheng W H, Wang Y F, Zhou W J, et al. Ultralow threshold lateral cavity photonic crystal surface-emitting laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3198-3201.

郑婉华, 王宇飞, 周文君, 等. 超低阈值横向腔光子晶体面发射激光器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3198-3201.

[30] Watanabe A, Sugiyama T, Kurosaka Y, et al. Single mode operation of edge-emitting semiconductor lasers with 2D photonic crystal[C] // 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2013: 13769169.

[31] Lu H Y, Tian S C, Tong C Z, et al. Extracting more light for vertical emission: high power continuous wave operation of 1.3-μm quantum-dot photonic-crystal surface-emitting laser based on a flat band[J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 108.

[32] Zheng W H, Zhou W J, Wang Y F, et al. Lateral cavity photonic crystal surface-emitting laser with ultralow threshold [J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4140-4142.

[33] Wang Y F, Qu H W, Zhou W J, et al. Lateral cavity photonic crystal surface emitting laser based on commercial epitaxial wafer [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8844-8855.

[34] Baumann K, Stöferle T, Moll N, et al. Organic mixed-order photonic crystal lasers with ultrasmall footprint [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(17): 171108.

[35] Ge X C, Minkov M, Fan S H, et al. Laterally confined photonic crystal surface emitting laser incorporating monolayer tungsten disulfide [J]. Nature Partner Journals 2D Materials and Applications, 2019, 3: 16.

[36] Zhen B, Hsu C W, Igarashi Y, et al. Spawning rings of exceptional points out of Dirac cones[J]. Nature, 2015, 525(7569): 354-358.

[37] Shao Z K, Chen H Z, Wang S, et al. A high-performance topological bulk laser based on band-inversion-induced reflection [J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(1): 67-72.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net