

低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器

周旭彦^{1,2,3}, 赵少宇^{1,2,3}, 马晓龙^{1,2,3}, 刘云^{1,2,3}, 李伦华^{1,2,3}, 林羽喆^{1,2,3},
齐爱谊^{1,2,3}, 王宇飞^{1,2,3}, 渠红伟^{1,2,3}, 郑婉华^{1,2,3}

¹中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083;

²中国科学院半导体研究所固态光电信息实验室, 北京 100083;

³中国科学院大学未来技术学院, 北京 101400

摘要 针对现有边发射半导体激光器远场发散角大、光束质量差等问题,引入光子晶体人工微结构实现模式扩展和模场分离,改善了单芯片半导体激光器的性能,实现了高亮度高光束质量的激光输出。理论分析并模拟了光子晶体半导体激光器对光场的调控机制,并介绍了几种典型的光子晶体半导体激光器。在光子晶体激光器实现低垂直发散角的基础上,设计了不同的结构实现了大功率、单模、高亮度等特性的输出。实验验证了光子晶体能带效应在提高半导体激光光束质量、提高亮度等方面的调控作用,其能够突破普通半导体激光器面临的限制,有助于半导体激光更有效地应用在光纤激光器抽运和激光加工等领域,为半导体激光的直接应用奠定了基础。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光子晶体; 低垂直发散角; 高亮度

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201010

Low Vertical Divergence Angle and High Brightness Photonic Crystal Semiconductor Laser

Zhou Xuyan^{1,2,3}, Zhao Shaoyu^{1,2,3}, Ma Xiaolong^{1,2,3}, Liu Yun^{1,2,3}, Li Lunhua^{1,2,3},
Lin Yuzhe^{1,2,3}, Qi Aiyi^{1,2,3}, Wang Yufei^{1,2,3}, Qu Hongwei^{1,2,3}, Zheng Wanhua^{1,2,3}

¹State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 10083, China;

²Key Laboratory of Solid-state Optoelectronics Information Technology, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 10083, China;

³School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China

Abstract In order to solve the problem of large vertical divergence angle of semiconductor laser and poor beam quality, the photonic crystal is introduced to realize mode extension and separation, which improves the properties of laser diode and realizes high brightness and high beam quality laser output. Photonic crystal working principle is theoretically analyzed and simulated as well, and some photonic crystal semiconductor lasers with different properties are introduced. Based on the photonic crystal semiconductor laser, some structures are integrated to get high power, low vertical divergence angle and high brightness output beam. Experimental results prove that the band gap effects of the photonic crystal improve the quality and brightness of laser beam, and break through the limitation of normal semiconductor, which help the semiconductor laser effectively used in the fiber laser pump and laser processing, and establish the foundations for the direct application of semiconductor laser.

收稿日期: 2016-11-30; 收到修改稿日期: 2016-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61025025, 61137003)

作者简介: 周旭彦(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事高亮度光子晶体半导体激光器方面的研究。

E-mail: zhouxuyan@semi.ac.cn

导师简介: 郑婉华(1966—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事基于光子晶体的光子集成芯片, 光子晶体光量子调控新现象、新原理方面的研究。E-mail: whzheng@semi.ac.cn

Key words lasers; semiconductor laser; photonic crystal; low vertical divergence; high brightness

OCIS codes 140.5960; 230.5298; 300.6300; 260.3800

1 引 言

半导体激光器是目前电光转换效率最高的激光光源,且一直朝着高效率、高功率、高光束质量、高亮度、长寿命和低成本的目标发展。其主要应用领域均要求激光器同时具有较高的输出功率、光束质量和亮度。而商用半导体激光器的水平发散角通常控制在 10° 以内,虽然激光器垂直发散角一直在被压缩,但是大多数常用结构器件其半峰全宽(FWHM)值约 40° ,而包含95%能量值超过 60° 的水平,垂直方向较大的发散角使得半导体激光器同光纤等的直接耦合效率较低,限制了半导体激光器在工业领域的直接应用。

为改善垂直远场分布(FFP),早期研究者多采用大光腔(LOC)结构^[1],通过简单地扩宽上、下波导层的厚度或提高波导层的折射率扩展模式体积,获得了瓦量级的输出功率和高转换效率,垂直发散角也降低了 $10^\circ\sim 20^\circ$ ^[2-4],但该结构存在横模数目增多、折射率导引变弱等问题。非对称的大光腔结构能够使宽波导内的模式数目降低,但是垂直发散角的最低值在 $11^\circ\sim 12^\circ$ ^[5-7],美国空军实验室的Kaspi等^[8]利用光泵的非对称大光腔激光器获得了低于 10° 的垂直发散角。为了进一步降低垂直发散角,德国费迪南德-布朗研究所^[9]将大光腔结构的波导厚度扩大到 $8\ \mu\text{m}$,并与低折射率量子垒结构相结合(该结构可归为超大光腔结构^[10-11]),获得的输出功率为瓦量级,垂直发散角为 9° 左右。

2002年,德国柏林工业大学的Ledentsov等^[12]提出在半导体激光器N型一侧引入一维光子晶体波导的方案来实现垂直方向的模式扩展。激光器垂直发散角理论计算值和实测值分别为 6° 和 8° 。2005年,俄罗斯Ioffe物理技术研究所^[13]利用光子晶体波导的概念设计制作的激光器在可见光波长(646 nm)实现了20 W的脉冲功率输出,为同类型普通半导体激光器输出功率的2.5倍,且垂直发散角仅为 8° 左右。紧接着,德国柏林工业大学、俄罗斯Ioffe物理技术研究所和以色列的PBC laser公司三家单位进行合作,采用侧向引入一维光子晶体的波导结构,在多个波长(650^[14],850^[15],980^[16],1064 nm^[17])实现了低垂直发散角($5^\circ\sim 10^\circ$)的半导体激光,脉冲输出功率接近20 W,连续输出功率达到瓦量级,最高为9.5 W^[18]。

为有效增加发光尺寸并且保证单横模工作,降低半导体激光器的发散角,实现半导体激光器高亮度输出,提出缺陷光子晶体全能带设计,其有别于普通光子晶体波导的设计思想,核心思想为将有源区置于光子晶体缺陷层,使得激光器本振模式位于缺陷态中,降低激光主振模式的群速度,提高光模式场与增益物质的相互作用,由于垂直方向的模式扩展,保持激光器单横模激射的同时增加单横模的模式体积,进而保证输出更高功率,并减小腔面热效应,可在达到腔面灾变水平前,获得更大的输出功率。

基于上述设计思想,本文制作了改善远场背景光和远场拖尾的光子晶体激光器(PBC)^[19];设计了光子晶体准周期结构,优化了光子晶体缺陷层实现大功率窄发散角输出的光子晶体激光器^[20];同时改善了垂直和水平发散角的斜侧壁倾斜腔光子晶体激光器^[21];另外还报道了光子晶体taper激光器^[22]和光子晶体脊脊条激光器^[23]。

2 基本原理

2.1 激光器亮度

半导体激光器作为固体激光器和光纤激光器的抽运源,或直接应用在通信、医疗和加工等方面,这些领域均要求半导体激光器具有高亮度输出。亮度是指单位出光面积、单位立体角内的激光功率,可表示为

$$B = \frac{16P}{\pi^2 d_1 d_2 \theta_1 \theta_2}, \quad (1)$$

式中 B 为亮度, P 为输出功率, d_1 和 θ_1 分别为水平方向的束腰宽度和发散角, d_2 和 θ_2 分别为垂直方向的束腰宽度和发散角。可见,发散角越小,输出功率越大,亮度越高。

2.2 模式扩展

2014年美国Science Research Laboratory公司^[24]等研究机构的分析结果表明,即使在无光学灾变和热反转失效的理想情况下,半导体激光器的输出功率仍然受限于激光器内部的双光子吸收效应。而且双光子

吸收是半导体材料所固有的非线性特性,无法从根本上消除。对于输出功率为 40 W 的单管半导体激光器,由双光子吸收等非线性效应造成的能量损失甚至达到 20%。因为双光子吸收等非线性效应的强度与激光器内部功率密度成正相关,因此,为提升半导体激光器的输出功率水平,应该扩大激光器内的模式体积以减小功率密度。另外,从改善远场发散角的角度来看,如果输出光束为近衍射极限分布(快轴方向),模式体积越大,即近场尺寸 d 越大,远场发散角(λ/d)就越小。

由三层平板波导理论可知,在包层内模式呈指数衰减分布,且衰减指数为

$$\gamma = \sqrt{\beta_z^2 - k_0^2 n_1^2} = k_0 \sqrt{N_m^2 - n_1^2}, \quad (2)$$

式中 β_z 为传播常数, k_0 为真空波矢, n_1 为包层折射率, N_m 为模式有效折射率。 γ 越小,模场在包层中衰减速度也越慢,即模式体积越大。因此,为实现模式扩展,一方面可以增加芯层的厚度,扩大模式简谐振荡的体积;另一方面可以增加包层的折射率,从而降低模式的有效折射率。

2.3 模场分离

同样地,由三层平板波导理论可得

$$V\sqrt{1-b} = m\pi + 2\arctan\left(\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right), \quad (3)$$

式中 $V = k_0 d \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$ 和 $b = \frac{N^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_1^2}$ 为归一化常数, n_2 为芯层折射率, m 为模式阶数。

三层对称平板波导中 m 阶模式的截止条件为 $N_m = n_1$,此时芯层的厚度为 m 阶模式的截止厚度。 m 阶模式的截止厚度 $d_{c,m}$ 满足

$$d_{c,m} = \frac{m\lambda_0}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}, \quad (4)$$

而对应芯层厚度为 d 的总模式数也可由(4)式计算得到,即

$$m_1 = \text{Int}\left(\frac{2d}{\lambda_0} \sqrt{n_2^2 - n_1^2}\right), \quad (5)$$

式中 $\text{Int}()$ 为取整运算符号。

通过增加包层折射率和芯层厚度可扩展模式体积,然而,包层折射率不能无限制增加,因为包层和芯层的折射率差代表波导层的载波能力,并且随着折射率差的减小,容易受到外界如温度和载流子的影响,不利于器件的稳定性,所以通常通过增加包层厚度来实现模式扩展。

由(5)式可知,随着包层厚度的增加,波导中存在的模式数量增加,这些高阶模的出现会使得激光器横向模式特性变差,激光模式中,基模的远场为近高斯单瓣分布,其他高阶模的远场为多瓣分布,这就使得激光器的光束质量变差。

通过模场分离可以抑制增加波导厚度产生的高阶模式,从而选出基模,使其优先激射。对于多层平板波导结构,由于不同模式的折射率不同,各导波模式的能量集中于(有效)折射率略高于但接近该导波模式折射率的层中。因此,通过结构的优化设计,可以将各个模式在能量的空间分布上分离。如果在波导结构的不同区域引入不同的增益和损耗,即可优先支持分布集中在特定区域的理想模式,抑制其他区域的非理想模式,达到模式滤除的效果。

3 模拟和实验结果

3.1 光子晶体结构设计

基于缺陷光子晶体全能带概念,设计和调整了一维光子晶体结构,将有源区置于光子晶体缺陷层区域,降低基模群速度,增强基模与增益物质的相互作用,保证基模优先激射。优化设计光子晶体结构组分和厚度,实现高限制因子、基模模和低垂直发散角。图 1 为所设计的 980 nm 光子晶体激光器结构模式分布图,其中,黑线为折射率分布图,红线为基模分布,其他三种颜色曲线对应高阶模分布。图 2 为模式的限制因子和对应的远场角。

由图 1 和 2 可知,光场模式得到了有效扩展,基模中心峰值位置处于量子阱位置,其限制因子为一阶模

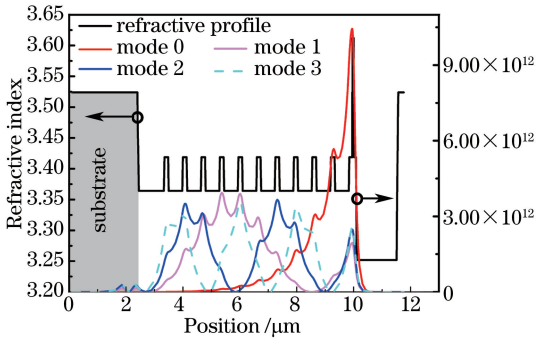


图 1 光子晶体激光器中的模式分布

Fig. 1 Distribution of laser mode in PBC

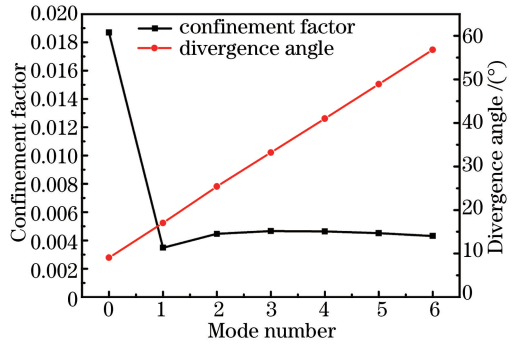


图 2 模式限制因子和远场发散角

Fig. 2 Mode confinement factor and far field angle

的 3.5 倍。基模的强度是其他高阶模式的 2.5 倍以上,这是因为有源区位于光子晶体缺陷中,相对于其他高阶模式可以获得更大增益和较小损耗的缘故;由于不同模式在光子晶体区域分布不同,高阶模式更接近衬底区域,因此,高阶模式向衬底的泄露更多,且模式的泄露损耗同模式阶数成正比。

另外,实验还优化了光子晶体结构的掺杂,靠近有源区的光子晶体部分掺杂较低,越远离有源区掺杂越高,通过优化掺杂水平,利用模式分离,增加高阶模的吸收损耗,达到模式选择的目的。因此,同基模相比,高阶模式限制因子较低,所获得的模式增益小,且其模式损耗较大,保证基模优先激射,使得激光器保持垂直单模工作。

模拟得到垂直发散角结果如图 3 所示。

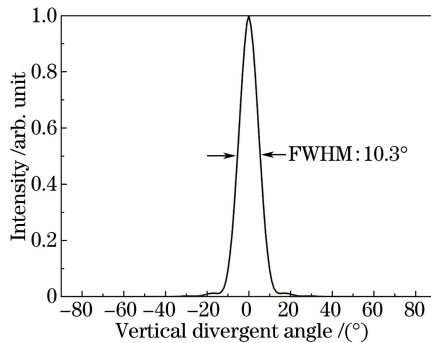


图 3 光子晶体激光器垂直发散角模拟值

Fig. 3 Simulation of vertical divergence angle of PBC

3.2 实验结果

3.2.1 外延方向不同结构的一维光子晶体激光器

1) 周期结构光子晶体激光器

设计制作周期光子晶体结构,在不同注入水平下,研究产生的能带带阶和对电子的局域,设计异质结面组分变化降低电子在异质结面的局域,增加注入效率,抑制阈值附近的高阶模式激射和泄漏,从而改善远场背景光和远场分布拖尾^[19]。

设计制作了波导宽度为 100 μm 、腔长为 1 mm、未镀膜的 905 nm 光子晶体激光器。图 4(a)~(d)分别为周期结构光子晶体激光器的导带带边能量分布、电子密度分布、光-电流-电压(LIV)曲线和垂直远场。图 4(a)比较了优化前后的结构,可见,优化的结构导带带阶变低,载流子输运过程中受到的阻挡减弱,异质结界面处载流子浓度降低;从图 4(b)可知,加入缓冲层后界面处局域电子密度为加入前的 1/3;图 4(a)和(c)中两个内附图分别为外延方向扫描电镜图(SEM)和在 3.12 A 的注入电流下的光谱图,测得的阈值电流和在 3.12 A 的注入电流下激光器输出总功率分别为 670 mA 和 2 W;由图 4(d)可知,随着注入电流的增加垂直远场 FWHM 值均在 10°以内,远场主瓣变化小,主瓣两边的侧瓣变化也不大。输出功率为 607 mW 的远场分布的侧瓣主要由高阶模的弱发光以及一部分基模能量向衬底方向泄漏导致,随着输出功率的增加,高阶模和基模泄漏强度变弱,两个侧峰也变得平滑。

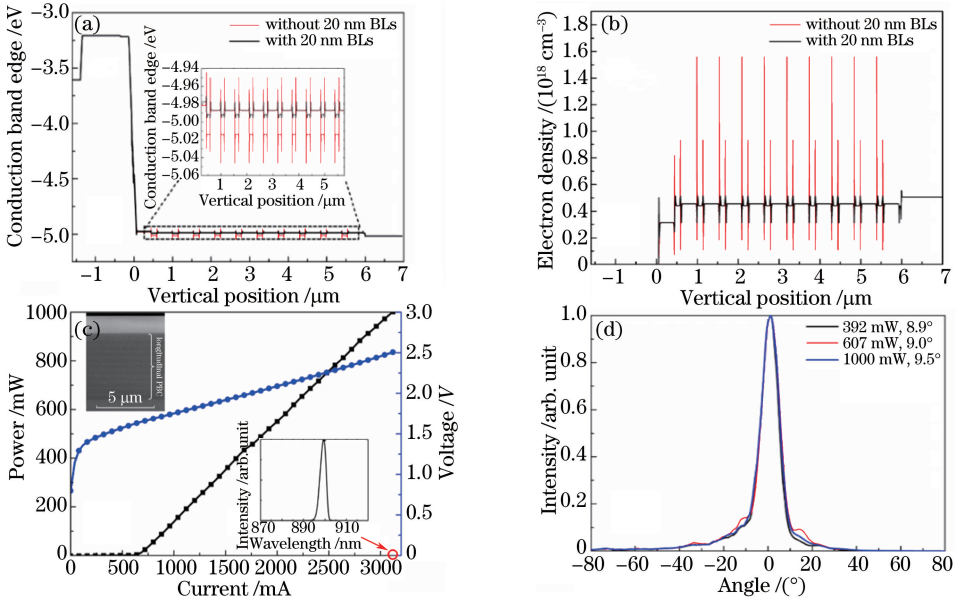


图 4 周期结构光子晶体激光器^[19]。(a) 导带带边能量分布；(b) 电子密度分布；(c) LIV 曲线；(d) 垂直远场
Fig. 4 Periodic structure PBC. (a) Conduction band edge profiles; (b) electron density; (c) LIV curves; (d) vertical FFP

2) 准周期结构光子晶体激光器

针对光子晶体结构所面临的远场拖尾和输出功率偏低的问题,国际上普遍采用增加光子晶体周期对数的方法,但其无法保证外延质量,并且可能会引入更多的缺陷和损耗,同时增加材料生长的难度,因此,实验中通过设计准周期结构,优化光子晶体缺陷层,并且细化掺杂分布来解决上述问题,降低了光子晶体结构的串联电阻和内损耗,制作了电流注入宽度为 $200\ \mu\text{m}$ 、腔长为 $1.3\ \text{mm}$ 的 $905\ \text{nm}$ 准周期横向光子晶体激光器,前、后腔面镀膜反射率分别为 95% 和 2% 。如图 5(a)~(c)分别为准周期结构光子晶体激光器的 LIV 曲线、连续远场分布和准连续远场分布。在室温条件下,得到了准连续激光功率 $10.3\ \text{W}$ 的输出,在连续注入下,由于热饱和的限制得到了 $5.75\ \text{W}$ 的功率输出,如图 5(a)所示;连续下快慢轴发散角的 FWHM 值分别为 5.7° 和 10.5° ,如图 5(b)所示,蓝色线为普通激光器垂直发散角曲线。可见,光子晶体激光器垂直发散角远优于普通结构激光器^[20]。

外延方向光子晶体结构设计主要基于缺陷光子晶体全能带结构,在扩展垂直方向上的模式光场,降低垂直发散角的同时,实现高阶模式滤除,保证垂直方向基模优先激射。通过光子晶体结构优化可以调整远场光斑形态。现阶段光子晶体半导体激光器可以做到小于 10° ,外延方向光子晶体结构的继续优化有助于得到

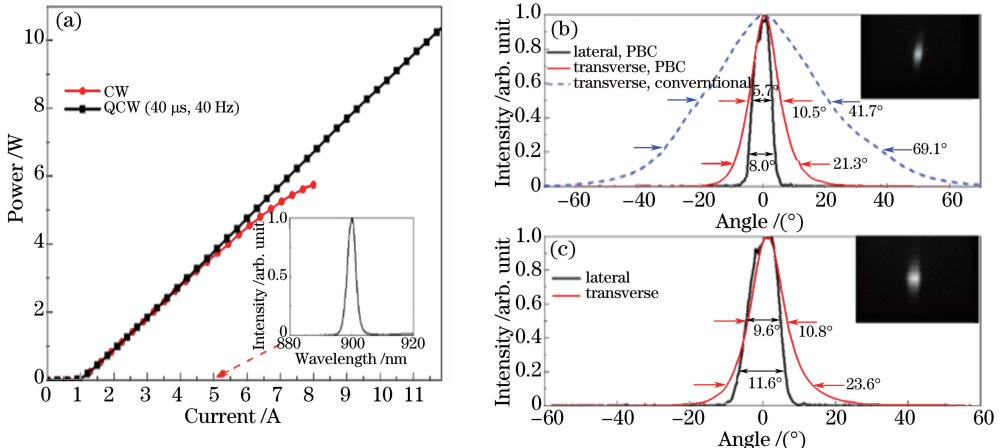


图 5 准周期结构光子晶体激光器^[20]。(a) LIV 曲线；(b) 连续远场分布；(c) 准连续远场分布
Fig. 5 Quasi-periodic structure PBC. (a) LIV curves; (b) continuous FFP; (c) quasi-continuous FFP

更小的垂直发散角,并且掺杂分布的调整和生长水平的提高有助于得到更低电阻、更高电光转换效率的光子晶体半导体激光器。

3.2.2 侧向不同结构的准三维光子晶体激光器

1) 斜侧壁倾斜腔光子晶体激光器

普通宽条激光器由于横向尺寸太大使得侧向存在高阶模,为改善横向的光场模式,设计倾斜侧壁斜波导光子晶体激光器,通过侧向模式在斜侧壁结构中的全反射,增加模式向衬底扩展实现远场发散角的改善。所设计的倾斜腔结构中只有基模能够实现谐振,而高阶模式会被滤除。此外,倾斜腔内模式存在侧向谐振,有助于降低自聚焦和光束束丝等非线性效应。图 6 所示为斜侧壁倾斜腔光子晶体激光器的连续注入下 LIV 曲线、SEM 图和光谱图,垂直远场分布和垂直发散角,侧向远场分布和水平发散角。实验制作了腔长为 2.2 mm,条宽为 100 μm 的 905 nm 未镀膜激光器,如图 6(a)所示,最终得到的输出功率为 1.26 W,斜率效率为 0.34 W/A,图中黑色点线为相同外延片的 100 μm 宽条激光器,最低快慢轴发散角分别为 5.7° 和 1.26° ;图 6(b)和(c)分别为垂直和侧向在不同输出功率下的远场分布,绿色点线为普通宽条激光器的远场分布,插图远场发散角随输出功率的变化图。可见,由于设计结构的作用,随着输出功率增加远场分布依旧能够基本保持稳定^[21],其远场发散角与普通横向光子晶体激光器的相比大幅提升,与国际上同类器件相比,不仅外延结构得到简化,而且具有较低电阻和热阻的优势。

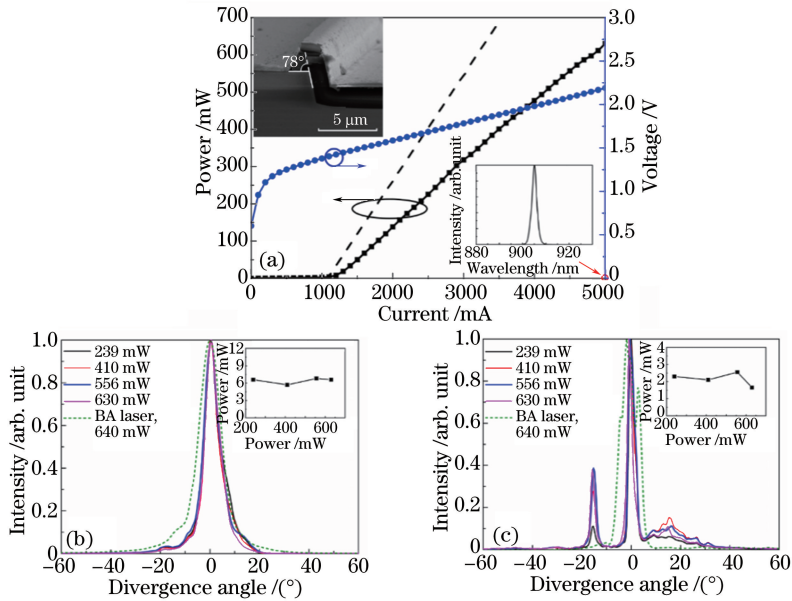


图 6 斜侧壁倾斜腔光子晶体激光器^[21]。(a) 连续注入下 LIV 曲线、SEM 图和光谱图;

(b) 垂直远场分布和垂直发散角; (c) 侧向远场分布和水平发散角

Fig. 6 Sidewall with angled-cavity PBC. (a) LIV curves in continuous mode, SEM picture and optical spectrum;

(b) vertical FFP and divergence angle; (c) horizontal FFP and divergence angle

2) Taper 光子晶体激光器

Taper 结构激光器可以同时得到大功率和高光束质量的输出,但是普通 Taper 结构半导体激光器面临垂直发散角太大的问题,限制了光束质量的进一步提高。光子晶体结构可以得到稳定和较窄的远场垂直发散角,有助于 Taper 结构得到更高亮度的激光输出。文献[22]报道了条宽为 100 μm 、腔长为 1.6 mm、波长为 980 nm 未镀膜的 Taper 光子晶体激光器在连续波(CW)下实现了输出功率 3 W、垂直发散角小于 16° 、水平发散角 4° 的目标,在 0.5 A 的注入电流下水平光束质量因子 $M^2 = 1.61$,垂直光束质量因子 $M^2 = 1.43$ ^[22]。图 7(a)为 Taper 光子晶体激光器的 LIV 曲线以及在连续 2 A 注入电流下的光谱图;图 7(b)为不同注入电流下的远场发散角,随着注入电流的变化发散角大小基本保持一致;图 7(c)为输出光束的 M^2 随注入电流的变化以及注入电流为 0.5 A 时的光束大小;图 7(d)为输出光束束腰随注入电流的变化以及 0.5 A 时的光斑图。

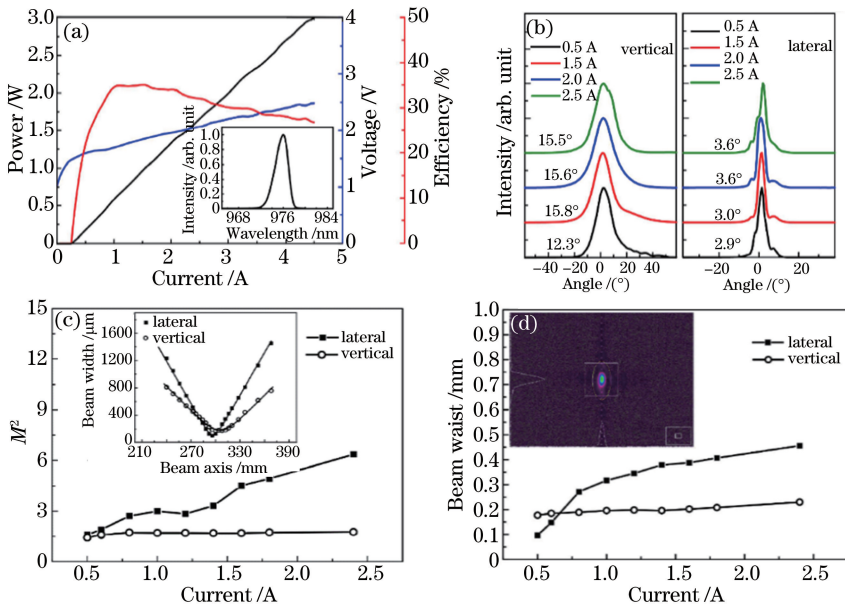


图 7 Taper 光子晶体激光器^[22]。(a) 连续波下的 LIV 曲线；(b) 远场发散角；(c) M^2 因子；(d) 束腰
Fig. 7 Taper PBC. (a) LIV curves in CW; (b) far field divergence angle; (c) M^2 factor; (d) beam waist

3) 宽条光子晶体激光器

宽条光子晶体半导体激光器可以实现大功率和低垂直发散角。图 8 所示为腔长为 3 mm、条宽为 90 μm 、前后腔面反射率分别为 4% 和 99% 的 980 nm 光子晶体激光器在室温情况下 (25 $^{\circ}\text{C}$) 直流 (DC) 测试得到的 LIV 曲线。其中, 红线为随电流变化的功率; 黑线为电压; 蓝线为功率转换效率, 并给出了室温下测定的工作电流为 8 A 时的光谱图。激射阈值为 0.56 A, 阈值电流密度 207 A/cm^2 , 斜率效率为 1.02 W/A ; 在电流为 8 A 时得到输出功率为 7.27 W, 功率转换效率为 37.3%; 在电流为 3.12 A, 输出功率为 2.6 W 时, 得到最大功率转换效率为 48.9%。在电流为 8 A 时光谱测试得到的激射峰值波长为 977 nm, 光谱 FWHM 为 3.2 nm。

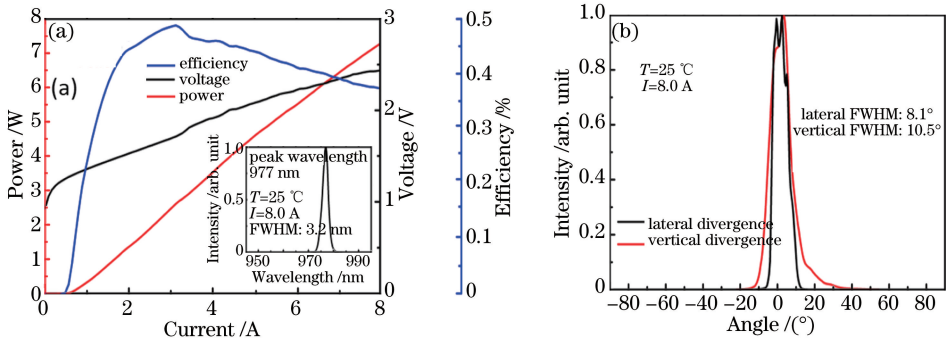


图 8 宽条光子晶体激光器。(a) 直流测试 LIV 曲线；(b) 垂直和水平远场分布以及发散角
Fig. 8 Broad area PBC. (a) LIV curves for DC testing; (b) vertical, horizontal FFP and divergence angle

通过 CCD 对激光器远场进行测量得到单瓣远场输出, 黑线为水平发散角曲线, 红线为垂直发散角曲线。水平和垂直发散角归一化强度如图 8 (b) 所示, FWHM 发散角分别为水平 8.1 $^{\circ}$, 垂直 10.5 $^{\circ}$ 。光子晶体激光器垂直和水平发散角比为 1.3, 而普通激光器一般大于 4, 普通边发射激光器为椭圆形输出, 光子晶体激光器为近圆形输出, 很好地改善了激光的输出光斑。图 8 (b) 中垂直远场包络为近高斯分布, 而水平远场包络线为双峰分布, 这是因为宽条激光器普遍存在侧向多模, 而侧向高阶模式的存在使得远场分布呈现非高斯分布。

4) 窄脊条光子晶体激光器

窄脊条光子晶体半导体激光器可以实现高亮度和低垂直发散角。图 9 (a) 为制作的脊条宽度为 6 μm 、腔长为 1.5 mm、前后腔面膜分别为 6% 和 99% 的窄脊条光子晶体激光器的 LIV 曲线, 为实现侧向单横模输出进行深刻蚀, 阈值电流 33.1 mA, 斜率效率 1.0 W/A , 在电流为 640 mA 时输出功率为 593 mW, 此时功率转换效率为

49.4%。同时给出了电流为 640 mA 时的光谱图, 激光中心波长为 973.2 nm, 光谱 FWHM 为 1.6 nm。由图 9(b) 可知, 电流 640 mA 时的远场快慢轴发散角分别为 3.75° 和 10.5°, 对应该结构窄脊条光子晶体激光器所测得的最大输出功率为 722.6 mW, 如图 9(b) 内附图所示, 在达到最大功率时发生光学灾变(COD)。

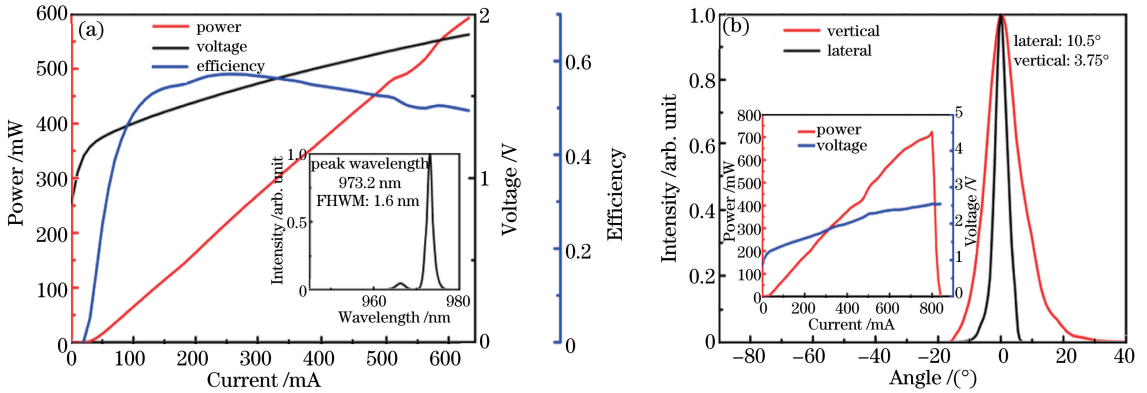


图 9 窄脊条光子晶体激光器。(a) 直流测试下 LIV 曲线以及 640 mA 时的光谱图;

(b) 垂直和水平远场发散角以及 COD 曲线

Fig. 9 Narrow stripe PBC. (a) LIV curves in DC testing and spectrum for 640 mA;

(b) vertical, horizontal FFP divergence angle and COD cures

从远场分布来看, 垂直和水平远场均为近高斯分布, 横向光子晶体结构和侧向刻蚀产生的折射率差保证激光器实现空间单模输出。同一批结构相关实验中, 快慢轴 M^2 分别为 1.28~1.64 和 1.39~1.68。由此得到窄脊条光子晶体激光器的最大亮度为 23.8 MW/(cm²·sr)。根据最新待发表的实验成果, 实验室得到了侧向 M^2 介于 1.28~1.64。垂直方向 M^2 介于 1.39~1.68。较小的水平和垂直 M^2 结果表明, 该窄脊条光子晶体激光器为单模输出, 并且在工作电流 800 mA 时得到了 34 MW/(cm²·sr) 的高亮度输出。

同垂直方向不同, 侧向发光区域较大, 虽然发散角较小, 但一般为多侧模工作, 大幅降低了侧向的光束质量, 因此, 以上的光子晶体半导体激光器集成了表面结构, 实现了对侧向模式的调控, 减小了侧向高阶模式激励, 提高了侧向光束质量。另外, 后续的工作将主要集中于设计集成更有效的结构抑制高阶侧模的激励, 得到水平方向 M^2 近于 1 的近衍射极限输出。

4 分析与讨论

介绍了周期结构和准周期结构的光子晶体激光器, 优化了缺陷光子晶体全能带结构设计, 得到了低垂直发散角、大功率的激光输出; 斜侧壁倾斜腔光子晶体激光器进一步压缩垂直发散角, 并且调控侧向激励模式; Taper 光子晶体激光器实现了较高的光束质量; 宽条光子晶体在窄垂直发散角的情况下可以得到大功率输出; 窄脊条光子晶体激光器可以实现高亮度和低远场发散角的输出。

低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器的实际应用意义重大。首先, 光子晶体激光近似圆斑输出, 减小了半导体激光器水平和垂直方向的像散, 提高了激光器与单模光纤和多模光纤的耦合效率。近圆斑输出时, 焦距光斑尺度更小, 易获得更高的聚焦能量密度, 有利于提高半导体激光抽运效率。对需要外腔准直的边发射激光器, 低垂直发散角光子晶体激光器能够提高对光学元件对准误差的容忍度, 降低对准直透镜数值孔径的要求, 减小耦合损耗, 从而达到简化系统、提高效率的目的。

5 结 论

报道了基于缺陷光子晶体全能带概念设计的光子晶体半导体激光器, 分析了其作为高光束质量高亮度激光器的优点, 并设计制作了一系列光子晶体激光器。在不降低激光输出效率的同时, 有效降低了水平和垂直发散角, 实现了近圆形光斑输出。

光子晶体半导体激光器低发散角、高亮度的特点有效解决了现有普通激光器面临的远场发散角大、光束质量差的瓶颈问题, 但其输出功率、亮度和效率还有待进一步提高。现阶段研究结果表明, 通过提高外延材

料生长质量、优化准三维光子晶体结构和优化载流子注入通道等相关设计和工艺技术,有望将光子晶体激光器的亮度提高到 $100 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 水平,为半导体激光光源的直接应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Lockwood H F, Kressel H, Sommers Jr H S, *et al.* An efficient large optical cavity injection laser[J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(11): 499-502.
- [2] Wenzel H, Bugge F, Erbert G, *et al.* High-power diode lasers with small vertical beam divergence emitting at 808 nm [J]. Electronics Letters, 2001, 37(16): 1024-1026.
- [3] Sebastian J, Beister G, Bugge F, *et al.* High-power 810-nm GaAsP-AlGaAs diode lasers with narrow beam divergence [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2): 334-339.
- [4] Erbert G, Beister G, Hulsewede R, *et al.* High-power highly reliable Al-free 940-nm diode lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2): 143-148.
- [5] Bogatov A P, Gushchik T I, Drakin A. E, *et al.* Optimisation of waveguide parameters of laser InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures for obtaining the maximum beam width in the resonator and the maximum output power[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(10): 935.
- [6] Xu Z T, Gao W, Siskavich B, *et al.* Low-divergence-angle 808-nm GaAlAs/GaAs laser diode using an asymmetric-cladding structure[C]. SPIE, 2004, 5363: 142-147.
- [7] Zhang J X, Liu L, Chen W, *et al.* Large spot size and low-divergence angle operation of 917-nm edge-emitting semiconductor laser with an asymmetric waveguide structure[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(6): 061401.
- [8] Kaspi R, Tilton M L, Dente G C, *et al.* Ultralow beam divergence and increased lateral brightness in optically pumped midinfrared laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 599-601.
- [9] Crump P, Pietrzak A, Bugge F, *et al.* 975 nm high power diode lasers with high efficiency and narrow vertical far field enabled by low index quantum barriers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(13): 131110.
- [10] Pietrzak A, Crump P, Wenzel H, *et al.* Combination of low-index quantum barrier and super large optical cavity designs for ultranarrow vertical far-fields from high-power broad-area lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1715-1722.
- [11] Pietrzak A, Wenzel H, Crump P, *et al.* 1060-nm ridge waveguide lasers based on extremely wide waveguides for 1.3-W continuous-wave emission into a single mode with FWHM divergence angle of $9^\circ \times 6^\circ$ [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(5): 568-575.
- [12] Ledentsov N N, Shchukin V A. Novel approaches to semiconductor lasers[C]. In Asia-Pacific Optical and Wireless Communications, 2002: 222-234.
- [13] Maximov M V, Shernyakov Y M, Novikov I I, *et al.* High power GaInP/AlGaInP visible lasers ($\lambda = 646 \text{ nm}$) with narrow circular shaped far-field pattern[J]. Electronics Letters, 2005, 41(13): 741-742.
- [14] Novikov I I, Karachinsky L Y, Maximov M V, *et al.* Single mode cw operation of 658 nm AlGaInP lasers based on longitudinal photonic band gap crystal[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(23): 231108.
- [15] Posilovic K, Kettler T, Shchukin V A, *et al.* Ultrahigh-brightness 850 nm GaAs/AlGaAs photonic crystal laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(22): 221102.
- [16] Novikov I I, Gordeev N Y, Shernyakov Y M, *et al.* High-power single mode ($>1 \text{ W}$) continuous wave operation of longitudinal photonic band crystal lasers with a narrow vertical beam divergence[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 103515.
- [17] Posilovic K, Kalosha V P, Winterfeldt M, *et al.* High-power low-divergence 1060 nm photonic crystal laser diodes based on quantum dots[J]. Electronics Letters, 2012, 48(22): 1419-1420.
- [18] Miah M J, Kettler T, Posilovic K, *et al.* 1.9 W continuous-wave single transverse mode emission from 1060 nm edge-emitting lasers with vertically extended lasing area[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(15): 151105.
- [19] Liu L, Qu H W, Liu Y, *et al.* Design and analysis of laser diodes based on the longitudinal photonic band crystal concept for high power and narrow vertical divergence [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 440-446.
- [20] Liu L, Qu H W, Liu Y, *et al.* High-power narrow-vertical-divergence photonic band crystal laser diodes with optimized epitaxial structure[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(23): 231110.
- [21] Liu L, Qu H W, Liu Y, *et al.* High-performance low-divergence angled laser diodes with two-dimensionally tilted sidewalls[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(6): 552-555.

-
- [22] Ma X L, Liu A J, Qu H W, *et al.* Nearly diffraction-limited and low-divergence tapered lasers with photonic crystal structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(21): 2403.
- [23] Zhao S Y, Qu H W, Liu Y, *et al.* High efficiency single transverse mode photonic band crystal lasers with low vertical divergence[C]. SPIE, 2016, 10019: 100190A.
- [24] Crump P A, Grimshaw M, Wang J, *et al.* 85% power conversion efficiency 975 nm broad area diode lasers at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 76% at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [C]. In Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2006: JWB24.