

布拉格反射波导光子晶体宽光谱量子阱激光器

李 珍^{1,2}, 汪丽杰², 侯冠宇², 王 涛², 卢泽丰²,
陆寰宇², 孙宝瑞³, 丁国龙³, 佟存柱^{2*}, 李洪祚¹

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 长春机械科学研究院有限公司, 吉林 长春 130103)

摘要: 半导体宽谱激光在传感、光谱学等领域有着重要的应用. 传统半导体宽谱激光器主要采用宽增益材料和全反射波导, 采用简单量子阱结构制备宽谱激光器一直是个难题. 作者首次证明了一种基于布拉格反射波导一维光子晶体的新型量子阱宽谱激光器, 其结构主要包括 InGaAs/GaAs 量子阱和上下布拉格反射镜, 通过偏离解理实现激光输出. 研究发现在偏离角 7° 时, 器件展现宽谱超辐射发光二极管特性, 4.4° 偏离角时实现了宽光谱激光输出, 光谱宽度达到 33.7 nm, 连续输出功率 36 mW. 本研究为探索新型量子阱宽谱激光器提出了一种新的技术途径.

关键词: 半导体激光器; 量子阱; 宽光谱; 光子晶体; 布拉格反射波导

中图分类号: TN365, TN248.4 **文献标识码:** A

Quantum well lasers with broad spectra based on Bragg reflection waveguide

LI Zhen^{1,2}, WANG Li-Jie², HOU Guan-Yu², WANG Tao², LU Ze-Feng², LU Huan-Yu²,
SUN Bao-Rui³, DING Guo-Long³, TONG Cun-Zhu^{2*}, LI Hong-Zuo¹

(1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;

3. Changchun Research Institute for Mechanical Science Co. Ltd, Changchun 130103, China)

Abstract: Semiconductor lasers with broad spectra are crucial for sensing, spectroscopy and biomedical imaging, etc. Currently, the broadband semiconductor lasers are majority based on the broad gain material and total interface reflection (TIR) waveguide. It is still a challenge to realize the broadband semiconductor lasers based on the simple and mature quantum well (QW) material. In this paper, a new type broadband QW laser using Bragg reflection waveguide with a deviation angle from cleaving crystal faces was demonstrated. The device consists of the InGaAs/GaAs QWs, top and bottom Bragg reflectors. It was found that it shows the characteristics of superluminescent diode (SLD) with a spectrum width of 135 nm for the device with a deviation angle of 7° . The spectrum width of 33.7 nm was achieved with an emission power of 36 mW from one facet for a deviation angle of 4.4° . This work supplies a new possible approach for the development of high performance QW broadband lasers.

Key words: semiconductor lasers, quantum well, broad spectrum, photonic crystal, Bragg reflection waveguide

PACS: 42.55.Px, 68.65.Fg, 42.55.Tv, 42.79.Gn

收稿日期: 2016-10-20, 修回日期: 2016-11-15

Received date: 2016-10-20, revised date: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61404138, 61474119); 吉林省自然基金(20140101203JC, 20150520105JH)

Foundation items: Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (61404138, 61474119); Natural Science Foundation of Jilin Province (20140101203JC, 20150520105JH)

作者简介 (**Biography**): 李 珍 (1978-), 男, 朝鲜族, 吉林长春人, 在职博士, 主要研究领域为激光器及驱动电路. E-mail: lizhen_2016@sohu.com

* 通讯作者 (**Corresponding author**): E-mail: tongcz@ciomp.ac.cn

引言

高功率宽谱半导体激光器在光纤通讯、传感、成像、光谱学、超短脉冲的产生等方面有着重要的应用^[1-3]. 传统的宽光谱半导体激光器主要是通过具有较宽增益谱的材料, 如量子点^[4-6]、量子带^[7], 利用量子尺寸效应实现展宽的增益谱, 获得超宽谱激光输出. 相比于量子点、量子带材料, 量子阱材料在生长上更简单也更成熟, 但利用它去实现宽谱激光器一直比较困难. 2014 年中科院半导体所 Pan 等人^[8]通过在量子阱与上波导层间加入隧穿结实现了第一支宽光谱 InGaAs/GaAs 量子阱激光器, 谱宽达到 38 nm, 该结果被 Nature Photonics 作重点报道^[9], 随后通过将隧穿结加在两个量子阱之间^[10], 器件功率被提高到 790 mW. 上述方法主要是围绕增益介质或者有源区进行, 而器件光限制结构都是全反射波导. 显然, 要实现高性能宽谱激光器, 波导结构也是一个需要深入研究和优化的部分. 首次证明了一种基于布拉格反射波导一维光子晶体结构的 InGaAs/GaAs 量子阱宽光谱激光器, 器件激射谱宽达到 33.7 nm, 连续功率 36 mW.

布拉格反射波导是一种具有光学线缺陷的一维光子晶体波导结构, 光在这种周期性介质中传输会发生布拉格反射, 产生光子禁带, 当光传输常数位于光子禁带内时, 光将不能沿着某种特定方向传输^[11-12]. 因此, 布拉格反射波导可以替代传统的全反射波导来实现光场限制, 能够获得比传统器件高一个数量级的光模式尺寸, 并具有大的模式间增益损耗差^[13-14]. 已经证明了高功率极低发散角激光^[15]、圆形光束激光^[16]、双光束激光^[17]、腔内非线性^[18]、以及基于光子晶体的探测器^[19-20]等, 而且该类波导器件还存在特殊的周期性调制光谱^[21], 即工作模式存在小的周期性的波长间隔, 表明该类波导很适合用于宽光谱器件.

本文设计并制备了布拉格反射光子晶体宽谱激光器, 通过解理倾斜角的控制, 获得了宽光谱超辐射发射和激光输出, 器件连续工作下的光谱特性被详细研究, 相关结果可望为研制新型量子阱宽谱激光器奠定基础.

1 布拉格反射波导理论模型

所研究的布拉格反射波导宽光谱激光器结构如图 1(a) 所示, 主要由量子阱有源介质、p 型和 n 型掺杂的上下布拉格反射镜构成的布拉格反射波导构

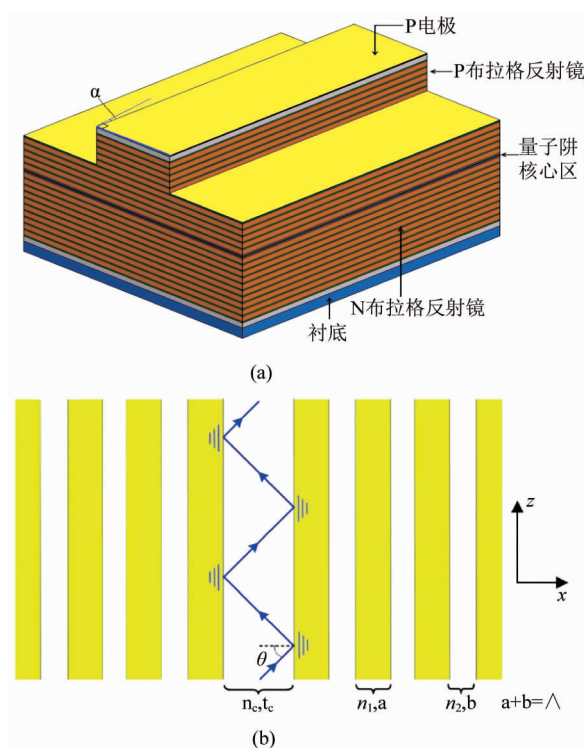


图 1 (a) 布拉格反射波导宽光谱激光器结构, (b) 布拉格反射波导导波示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) Bragg reflection waveguide lasers with broad spectra and (b) Bragg reflection waveguide

成. 布拉格反射波导导波原理如图 1(b) 所示, 光波在由双边布拉格反射镜组成的波长中呈 Z 型传播, 波导分为核心区 (折射率 n_c , 厚度 t_c), 布拉格反射镜由折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种材料周期性排列构成, 厚度分别为 a 和 b , 周期 $\Lambda = a + b$. 在光子晶体中, 由于介质材料的周期性排列, 在其中传输的光波的色散曲线将形成光子禁带, 这与电子在周期性固体晶格中运动具有能带类似, 因此可以借鉴固体物理中的布洛赫原理来分析光子在光子晶体中的传输规律. 根据布洛赫理论, 周期性介质中传播的波也具有周期性, 因此布拉格反射波导中的光传输矩阵也可表示为如下形式^[22]:

$$\begin{pmatrix} a_{n+1} \\ b_{n+1} \end{pmatrix}_{\text{TE}} = e^{iK_{\text{TE}}\Lambda} \begin{pmatrix} a_n \\ b_n \end{pmatrix}_{\text{TE}}, \quad (1)$$

式中 K_{TE} 为布洛赫波矢, 满足如下方程:

$$\begin{cases} K_{\text{TE}} = \frac{1}{\Lambda} \cos^{-1}(\chi) \\ \chi = \cos(k_1 a) \cos(k_2 b) - \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_1 a) \sin(k_2 b) \end{cases}, \quad (2)$$

当 $|\chi| < 1$ 时, 对应的布洛赫传输波矢 K_{TE} 为实数, 对

应于光子晶体的允带;当 $|\chi| > 1$ 时,对应的布洛赫传输波矢 K_{TE} 为虚数,表明色散关系不成立,即对应频率的光不能在介质中传播,这就是光子禁带区域. 因此由上式即可计算得到布拉格反射波导光子晶体的禁带分布. 取厚度为四分之一波长条件,即 $k_1 a = k_2 b = \pi/2$, 得到 $\exp(iK_{TE}A) = -k_2/k_1$, 代入布拉格反射波导色散方程:

$$\frac{1}{k_c} \cot\left(\frac{k_c t_c}{2}\right) = \frac{-i}{k_1} \cdot \frac{e^{iK_{TE}A} - A_{TE} + B_{TE}}{e^{iK_{TE}A} - A_{TE} - B_{TE}}, \quad (3)$$

其中 $A_{TE} = -\frac{1}{2}\left(\frac{k_2}{k_1} + \frac{k_1}{k_2}\right)$, $B_{TE} = \frac{1}{2}\left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2}\right)$. 可得

$$\frac{k_c t_c}{2} = \frac{(p+1)\pi}{\lambda}, \quad (p=0, 2, 4, \dots), \quad \text{即 } \sqrt{n_c^2 - n_{\text{eff}}^2} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot$$

$t_c = (p+1)\pi$ 从而波导导模有效折射率可以写成:

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{n_c^2 - \left[\frac{(p+1)\lambda}{2t_c}\right]^2} \\ = \sqrt{n_c^2 - \left[\frac{(2m-1)\lambda}{2t_c}\right]^2}, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

式中, $m = 1, 2, \dots$ 为导模阶数, 而布拉格反射镜高、低折射率层厚度为:

$$d_{1,2} = \frac{\lambda}{4} [n_{1,2}^2 - n_c^2 + \left(\frac{\lambda}{2t_c}\right)^2]^{-1/2}, \quad (5)$$

由此可以确定上下布拉格反射镜的结构参数. 简而言之, 布拉格反射波导只对满足模式角 $\theta_c = \arcsin(n_{\text{eff}}/n_c)$ 的模式有良好的限制, 而全反射波导对于满足全反射条件, 即 θ 大于等于临界角 θ_c 的所有模式均有限制.

2 器件结构

制备的布拉格反射波导宽光谱激光器其上下部分别选择为 p 型和 n 型掺杂的 6 对厚度分别为 100 nm/750 nm 的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 分布式布拉格反射镜, 增益介质为两个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱. 布拉格反射镜的界面为 20 nm 的组分渐变层, 目的是降低串联电阻. p 型重掺杂欧姆接触层到有源区厚度为 5.3 μm . 此外, 在量子阱有源区和上下布拉格反射波导之间有一层 750 nm 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层. 激光器外延片采用金属化学气相沉积 (MOCVD) 设备在 n+ 型 GaAs 衬底上生长得到. 材料生长结束后, 首先在样品 p 面沉积 300 nm 厚的 SiO_2 , 然后光刻、干法刻蚀制备 SiO_2 脊型掩膜, 然后采用电感耦合等离子 (ICP) 刻蚀设备刻蚀激光器台面, 刻蚀深度约为 4.6 μm , 脊宽 5 μm . 去除 SiO_2 掩

膜后, 再沉积 300 nm 厚的 SiO_2 电绝缘层, 并光刻、刻蚀制备电流注入窗口. 之后 p 面沉积 Ti-Pt-Au 作为 p 面电极; 对芯片 n 面衬底进行减薄抛光, 然后在 n 面生长 AuGeNi-Au 做为 n 面电极, 最后进行合金、解理和测试. 对于半导体激光器件, 由于是在 GaAs 等单晶衬底上制备, 在器件的制备过程中通过解理自然形成解理腔面, 腔面间的谐振及选模作用可以使激光器获得较大的增益和相干光输出. 而为实现宽光谱器件, 常用方法是通过偏解理面解理形成倾斜腔^[23], 减低腔面反馈. 如图 1(a) 所示, 故意使解理面与脊波导边缘有一个非 90° 的夹角, 实际偏离垂直方向 (解理面) 的角度 α 分别为 4.4° 和 7°. 制备后, 激光器腔面未进行任何钝化和镀膜, 激光器通过锡焊接到铜热沉上进行测试.

3 实验结果及讨论

图 2 给出 15°C 下测得的偏离解理角 7° 器件的电流-功率特性, 该器件腔长为 1.8 mm. 如图所示, 该器件显示出典型的超辐射发光特性, 不存在阈值, 最大功率超过了 12 mW. 内插图出示了不同电流下的发光谱线. 在 100 mA 时谱宽 90 nm, 分别在 952 nm 和 970 nm 处出现两个峰, 当电流达到 200 mA 以上时, 这两个峰趋于饱和, 并且在 900 nm 附近出现一个光谱峰, 对应谱宽达到 135 nm. 952 nm 和 970 nm 发光峰主要来自于导带底能级 C1 与重空穴能级 HH1 和 HH2 间的跃迁, 而 900 nm 的发光峰可能来自于 C2 与 HH1 间的跃迁^[24]. 上述结果表明, 7° 偏离解理角导致的谐振腔反馈量低, 足以抑制可能的相干振荡, 因此器件是超辐射发光. 如果要实现宽谱激光, 需要适当提高反馈量, 因此需要减小倾斜腔的偏角.

图 3 给出在约为 4.4° 偏离时器件单个端面的功率输出特性. 该器件展现了典型的激光输出特性, 20°C 下阈值电流为 18.4 mA, 斜率效率 0.229 W/A. 在 420 mA 处器件功率达到饱和, 约为 36 mW. 内插图分别给出电致发光 (EL) 谱、20 mA 和 370 mA 电流下的光谱. 可以看到 20 mA, 即略高于阈值情况下, 激光器展现了较好的窄线宽特性, 并且激光峰与 EL 谱峰较靠近. 随着注入电流的增加, 激光峰开始向长波展宽. 到 370 mA 时, -10dB 定义的谱宽达到 33.7 nm. 从内插图可以看到激光的宽谱要比阈值以下的电致荧光 (EL) 谱窄得多, EL 波长覆盖 930 ~ 1 050 nm, 而高电流下激光谱覆盖的是 990 ~ 1 030 nm 波段, 这主要可能与电流注入和自热情况下增益谱

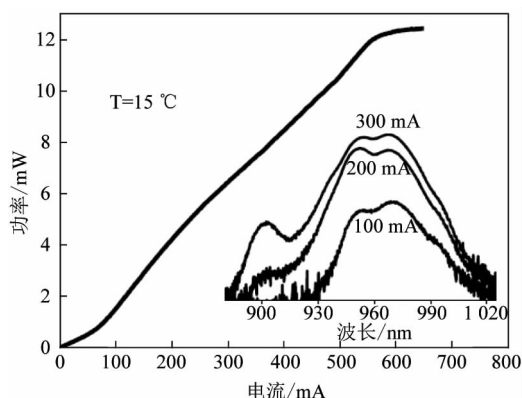


图2 具有超辐射出光特性的布拉格反射波导器件 (7° 解理偏角)

Fig. 2 Bragg reflection waveguide emitter with superluminescence characteristics at a 7° deviation of cleaving angle

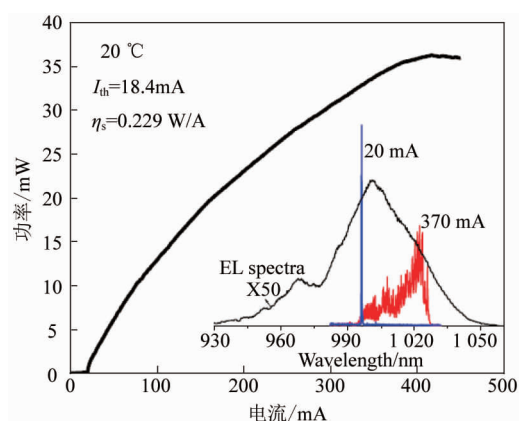


图3 布拉格反射波导宽光谱激光器功率特性 (4.4° 解理偏角), 插图为阈值以下、窄谱和宽谱工作特性

Fig. 3 Bragg reflection waveguide broad-spectrum lasers with a 4.4° deviation from the cleaving, inset shows the lasing spectra under threshold, at 20 mA and 370 mA

红移有关.

图4 给出更为详细的电流依赖的激光谱. 从中可以更清晰的看到光谱的扩展向长波和短波方向是都存在的, 但长波扩展占主要部分, 这是典型的量子阱宽谱激光器的光谱拓展特征^[8,10]. 这完全不同于量子点, 量子点宽谱激光器光谱主要是向短波方向扩展, 即向着激发态发光方向^[4,5], 因为其宽光谱的实现机理主要是利用量子点尺寸效应和激发态激射来拓展光谱. 值得注意的是, 在高电流下的激光谱展现了均匀波长间隔的谱峰, 对该器件间隔约为 0.76 nm. 这种间隔是布拉格反射波导的一个特性, 是由多层上下布拉格反射镜反射造成的, 先前工作^[21-22]

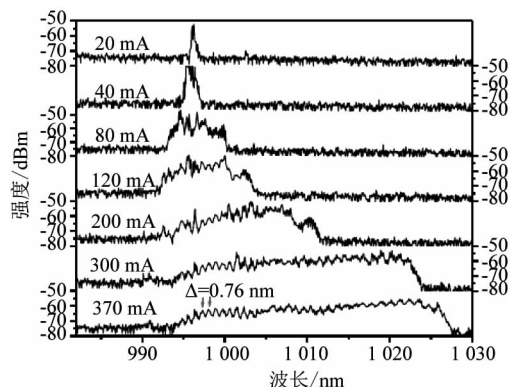


图4 布拉格反射波导宽光谱激光器光谱特性 (4.4° 解理偏角)

Fig. 4 Current dependent lasing spectra for the Bragg reflection waveguide lasers with 4.4° deviation from the cleaving

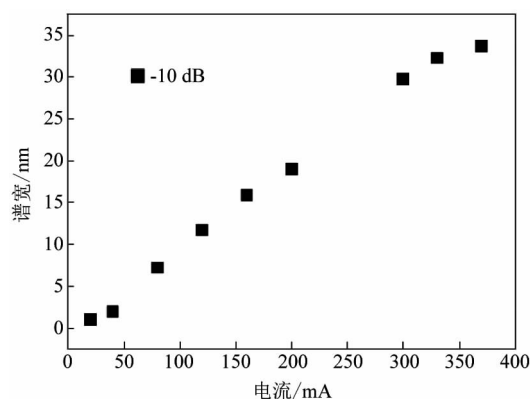


图5 谱宽与注入电流关系

Fig. 5 Width of lasing spectra vs. injection current

已经在实验上证明布拉格反射波导激光器存在这一特殊的均匀模式间隔现象, 即其工作的波长不是杂乱分布, 而是依次出现在均匀阶梯式间隔的波长值上. 本文恰是在此基础上, 利用了布拉格反射波导激光器两个纵向端面反射镜偏离解理面所导致的非完全平行谐振腔, 使得激光光谱能够近连续分布在这些波长上, 从而实现宽光谱激射. 图5 给出电流依赖的谱宽 (-10 dB 定义), 其基本上与电流成近线性关系, 这与先前报道的量子阱宽谱激光器结果相同^[8]. 对照图5 和图3, 也可以看出功率饱和与谱宽的对应关系, 即当功率趋于饱和时, 谱线展宽也变缓.

4 结论

首次从波导的角度证明了一种新型宽谱量子阱激光器, 它是基于布拉格反射波导一维光子晶体, 而

不是传统的全反射波导. 通过偏离解理面制备端面反射镜实现 33.7 nm 的宽光谱激光输出, 连续输出功率 36 mW. 更大的偏离角下, 器件展现超辐射发光二极管特性, 谱宽 135 nm. 如果在未来对量子阱结构进行优化, 并且利用布拉格反射波导可实现高功率、低发散角圆形光束激光的优势, 可望实现更高性能的宽光谱半导体激光器.

References

- [1] Gmachl C, Sivco D L, Colombelli R, *et al.* Ultra-broadband semiconductor laser [J]. *Nature*, 2002, **415**, 883–887.
- [2] Somers A, Kaiser W, Reithmaier J P, *et al.* InP-based quantum dash lasers for broadband optical amplification and gas sensing applications [C], *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 2005: 56–59.
- [3] Ooi B S, Djie H S, Wang Y, *et al.* Quantum dashes on InP substrate for broadband emitter applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2008, **14**(4):1230–1238.
- [4] Kovsh A, Krestnikov I, Livshits D *et al.* Quantum dot laser with 75 nm broad spectrum of emission [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 793–795.
- [5] Gao F, Luo S, Ji H M, *et al.* Flat-topped ultrabroad stimulated emission from chirped InAs/InP quantum dot laser with spectral width of 92 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **108**:201107.
- [6] Fedorova K A, Cataluna M A, Krestnikov I, *et al.* Broadly tunable high-power InAs/GaAs quantum-dot external cavity diode lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18):19438–19443.
- [7] Djie H S, Tan C L, Ooi B S, *et al.* Ultrabroad stimulated emission from quantum-dash laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**: 111116.
- [8] Wang H L, Zhou X L, Yu H Y, *et al.* Ultrabroad stimulated emission from quantum well laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**: 201101.
- [9] Graydon O. Broadband lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2014, **8**: 675.
- [10] Wang H L, Yu H Y, Zhou X L, *et al.* High-power InGaAs/GaAs quantum-well laser with enhanced broad spectrum of stimulated emission [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**: 141101.
- [11] Yeh A, Yariv A. Bragg reflection waveguides [J]. *Opt. Comm.*, 1976, **19**(3): 427–430.
- [12] Li J, Chiang K S. Guided modes of one-dimensional photonic bandgap waveguides [J]. *J. Opt. Soc. America B*, 2007, **24**(8): 1942–1950.
- [13] Liang W, Xu Y, Choi J M, *et al.* Engineering transverse Bragg resonance waveguides for large modal volume lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2079–2081.
- [14] Zhu L, Scherer A, Yariv A. Modal gain analysis of transverse Bragg resonance waveguide lasers with and without transverse defects [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(10): 934–940.
- [15] Novikov I I, Gordeev N Y, Shernyakov Y M, *et al.* High-power single mode (> 1 W) continuous wave operation of longitudinal photonic band crystal lasers with a narrow vertical beam divergence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(10):103515–103515–3.
- [16] Wang L J, Tong C Z, Tian S C, *et al.* High power, ultra-low divergence edge-emitting diode laser with circular beam [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2015, **21**(6):1501609.
- [17] Wang L J, Tong C Z, Zeng Y G, *et al.* Bragg reflection waveguide twin-beam lasers [J]. *Laser Phys.*, 2013, **23**: 105802.
- [18] Abolghasem P, Han J, Bijlani B, *et al.* Continuous-wave second harmonic generation in bragg reflection waveguides [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 9460–9467.
- [19] Liang J. Improved performance of HgCdTe infrared detector focal plane arrays by modulating light field based on photonic crystal structure [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **115**: 184504.
- [20] Hu W D. Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J], *J. Infrared Millim. Waves*. 2016, **35**: 25–36.
- [21] TONG Cun-Zhu, WANG Li-Jie, TIAN Si-Cong, *et al.* Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics* (佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究. *中国光学*), 2015, **8**(3): 480–498.
- [22] WANG Li-Jie 2013 Ph. D. Dissertation (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [汪丽杰 2013 博士学位论文, 布拉格反射波导光子晶体激光器的研究, 北京: 中国科学院大学].
- [23] LIU Yang, Zeng Yu-Ping, SONG Jun-Feng, *et al.* InGaAsP/InP integrated superluminescent light source with tilted structure [J]. *Chinese J. Lasers* (刘杨, 曾毓萍, 宋俊峰, 等. 倾斜结构 InGaAsP/InP 集成超辐射光源. *中国激光*), 2001, **A28**(5), 412–414.
- [24] SONG Yan-Rong, HUA Ling-Ling, ZHANG Peng, *et al.* Calculation of band structure of InGaAs/GaAs strained quantum wells [J]. *J. Beijing Univ. Technol.* (宋晏蓉, 华玲玲, 张鹏, 等. InGaAs/GaAs 应变量子阱能带结构的计算. *北京工业大学学报*), 2011, **37**(4): 565–569.