

光子晶体调制半导体激光器侧模

张建心^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 陈微^{1,2}, 渠红伟^{1,2}, 郑婉华^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现半导体激光器的单侧模稳定工作, 提出了一种在激光器的脊条两侧引入光子晶体结构滤除半导体激光器高阶侧模的方法。通过调整激光器上表面的刻蚀深度、光子晶体区域的条宽和间隔来改变激光器内部的模场分布, 同时结合选择性的载流子注入来增强基模的激射优势, 进而减少侧模的数量。实验上制作了主脊条宽度为 $6\ \mu\text{m}$, 光子晶体周期 $5\ \mu\text{m}$, 波长 $1550\ \text{nm}$ 的半导体激光器。测试结果表明: 在连续工作的情况下, 电流 $300\ \text{mA}$ 的时候, 高阶侧模受到抑制, 水平发散角变为 10.2° , 证实了光子晶体结构调制激光器侧模的可行性。

关键词: 光子晶体; 侧模; 半导体激光器

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)01-0069-04

Modulating lateral modes of semiconductor laser by photonic crystal structures

Zhang Jianxin^{1,2}, Liu lei^{1,2}, Chen Wei^{1,2}, Ou Hongwei^{1,2}, Zheng Wanhua^{1,2}

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. Nano-optoelectronics Lab, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve single lateral mode of the semiconductor laser, the method was proposed to filter high-order lateral modes by introducing photonic crystal structures on both sides of ridge semiconductor laser. By adjusting the etching depth of the laser on the surface of the laser, and ridge width and spacing of photonic crystal region, the mode field distribution inside the laser was changed, combined with selective carrier injection to enhance the fundamental mode lasing advantage, thereby the numbers of the lateral mode were reduced. $1550\ \text{nm}$ wavelength semiconductor lasers were produced experimentally, and the width of the main ridge was $6\ \mu\text{m}$, and the period of photonic crystal region was $5\ \mu\text{m}$. Test results show that when the current was $300\ \text{mA}$ in CW, the higher-order lateral modes were suppressed, and divergence angle was reduced to 10.2° . It is confirmed that it is feasible to modulate lateral modes of semiconductor laser by photonic crystal structures.

Key words: photonic crystal; lateral mode; semiconductor laser

收稿日期: 2012-05-07; 修订日期: 2012-06-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011CB922002, 2012CB933501); 国家自然科学基金(61025025, 61137003, 60838003)

作者简介: 张建心(1982-), 男, 博士生, 主要从事大功率半导体激光器方面的研究。Email: zhjx@semi.ac.cn

导师简介: 郑婉华(1966-), 女, 研究员, 博士, 主要从事微结构激光器、微纳光电子器件及集成方面的研究。

Email: whzheng@semi.ac.cn

0 引言

大功率半导体激光器已经取得了重大进展,广泛应用于材料处理、通讯、医疗以及泵浦固体热容激光器^[1]等领域。为了获得单侧模工作的半导体激光器,人们普遍采用脊型波导结构^[2-4]。激光器中要获得稳定的单模特性,首先必须具有稳定的内建波导,因此侧向的折射率差不能太小^[5]。为了满足单模工作,大的折射率差往往要求激光器脊条为深刻蚀,但是这容易增大激光器内部损耗。在中等刻蚀或浅刻蚀的情况下要实现单模则需要极窄的波导来补偿,侧向波导的宽度一般被限定在几个微米量级上,以使除基模外的其他高阶模式能够截止,但也使得最大光功率的输出水平受到了限制。如果要同时得到大功率输出,激光器就需要突破窄脊条的限制,增大脊条宽度,保证较大的光模面积,这时侧向脊型波导两侧就需要一个比较小的折射率差。为了同时满足这两个要求,需要采取一些措施来抑制高阶模的产生,如减小其限制因子、增加损耗等。国际上的一些研究小组已经提出了板耦合光波导^[6-7]、双曲弯折波导结构^[8]的具体方案,以求在宽条的基础上实现单侧模激射^[9-10]。

1 结构设计

光子晶体的折射率呈周期性变化,它能够对光场进行调制,并展现出很多特殊的光学性质,因此常作为模场调控的工具应用在半导体激光器中。文中在激光器的表面引入光子晶体结构,利用刻蚀深度、光子晶体区域的条宽和间隔来改变其中的模场分布,同时结合选择性的载流子注入来减少侧模的数量,以期实现单基模激射。图 1 给出了光子晶体波导结构的示意图,整个结构制作在有源区的上方,利用消逝场的耦合来实现模场的侧向调制。图中给出了基模和一阶模在光子晶体作用下的场分布,可以发现基模受光子晶体的影响很小,只有很少一部分光场进入到光子晶体区域;而一阶模则扩展到整个光子晶体结构中,明显区别于单脊条和图 2 所示双沟脊波导中的情况。如果将电流注入限制在中间宽条,基模的增益比一阶模大,因此在激射时更具优势。

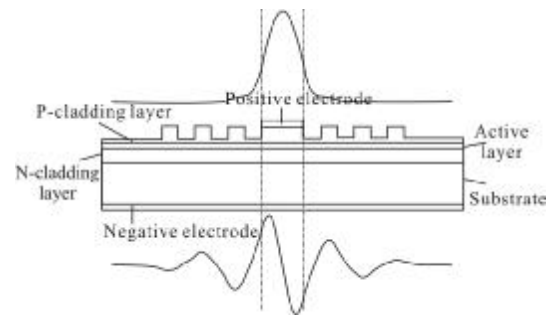


图 1 单脊条光子晶体波导结构,上下两条曲线分别为调制后的基模和一阶模的场分布

Fig.1 Single ridge photonic crystal waveguide structure, upper and lower curve are the modulated fundamental and the first order mode field distribution respectively

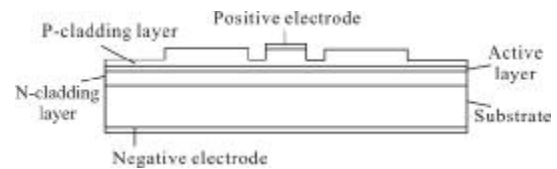


图 2 双沟脊波导结构,脊波导被限定在 2 μm 宽的沟槽内部

Fig.2 Double trenches ridge waveguide structure, the ridge waveguide were defined by pairs of 2 μm wide renches

2 结果与分析

图 3 为在有源材料的表面制作的单脊条光子晶

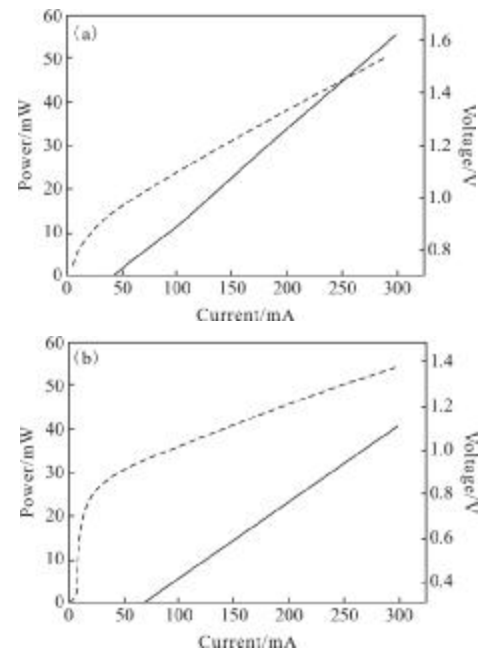


图 3 单脊条光子晶体耦合结构和双沟脊波导结构激光器的 L-I-V 曲线

Fig.3 L-I-V curves of single ridge coupled photonic crystal structure and double trenches ridge waveguide laser

体耦合波导结构和双沟脊波导结构^[11]的功率-电流-电压(L-I-V)曲线。中心脊条的宽度为 $6\ \mu\text{m}$, 光子晶体区域之间的间隔为 $2\ \mu\text{m}$ 。和普通的脊波导激光器相比, 双沟脊波导结构允许有较大的镜面输出面积和较少的模式数量。采用双沟脊波导是为了排除中心脊条两侧 SiO_2 、金的生长厚度等条件对结果的影响。两种结构都存在耦合和损耗机制来增强所要模式的激射优势, 因此具有比较强的对比性。实验上双沟脊波导结构的中心脊条宽度、沟的宽度和刻蚀深度与单脊条光子晶体耦合波导结构相同, 刻蚀深度为 $1\ \mu\text{m}$ 。有源片为 IQE 公司生产的 $1550\ \text{nm}$ 波长的商业外延片。从图中可以看出, 单脊条光子晶体耦合波导结构的激光器的斜率效率为 $0.2177\ \text{W/A}$, 略高于双沟脊波导结构的斜率效率 $0.1682\ \text{W/A}$ 。单脊条光子晶体耦合波导结构激光器的阈值电流为 $44\ \text{mA}$, 略低于双沟脊波导结构的 $68\ \text{mA}$ 。这说明相对于双沟脊波导结构, 单脊条光子晶体耦合波导结构引入了相对较小的模式损耗。

图 4、图 5 为实验观测到的两种结构激光器的水平发散角。单脊条光子晶体耦合波导结构激光器在 $100\ \text{mA}$ 和 $200\ \text{mA}$ 时, 水平光场侧向两边都有小侧峰, 但是当电流增加到 $300\ \text{mA}$ 时, 一侧的小侧峰开始消失, 另一侧的小侧峰也有减弱的趋势, 这就使得发散角从 15.6° 变到了 10.2° , 这表明, 在电流较小时, 激光器的多个模式同时激射。随着电流的增加, 激光器输出功率也增加, 中心区域的折射率因热效应的影响而变大, 补偿了刻蚀深度等因素与理论模拟结果的偏差, 基模开始往中心区域会聚, 高阶模式扩展到两侧的低折射率光子晶体区域, 光子晶体的滤波作用开始显现, 进而增强了基模的激射优势, 提高了光束的质量。为了保护激光器不会发生灾难性光学腔面损伤(COMD), 电流没有进一步加大。如果电流可以增加至主脊条中只有基模时, 滤波作用达到最大, 此时应为最佳电流。双沟脊波导结构激光器的发散角从 14.1° 变到了 15.9° , 水平发散角的变化并不是很大, 可能是由于热效应和高阶模式激射造成的。双沟脊波导结构激光器水平侧向两边的光场也有一些小的波动。从上面的实验结果可以看出, 相对于双沟脊波导结构, 单脊条光子晶体波导结构具备的可调节的参数更多。如果合理地调整参数, 基模在光子晶体区域可以有一定的扩展, 这样就会进一

步减小侧向发散角, 提高腔面输出光场的亮度和光束的质量, 这是双沟脊波导无法实现的, 因为脊波导两侧的台面只会给进入其中的基模带来损耗, 而对远场却没有太大的影响。

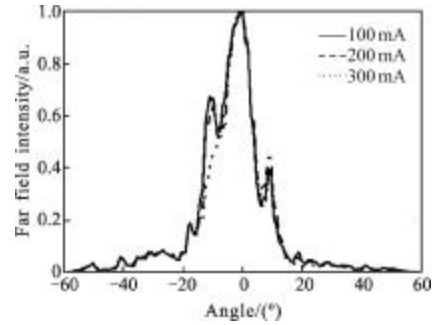


图 4 单脊条光子晶体结构水平方向发散角随电流的变化, 发散角从 15.6° 变到了 10.2°

Fig.4 Lateral divergence angle of single ridge photonic crystal structure changes from 15.6° to 10.2° with the current

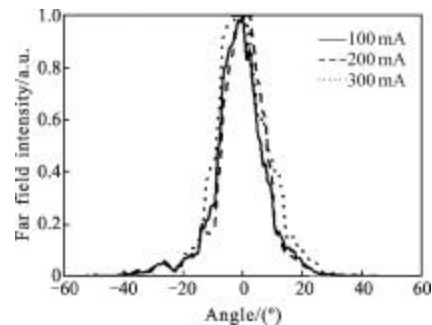


图 5 双沟脊波导结构水平方向发散角随电流的变化, 发散角从 14.1° 变到了 15.9°

Fig.5 Lateral divergence angle of double trenches ridge waveguide structure changes from 14.1° to 15.9° with the current

3 结论

为了获得单侧模大功率的半导体激光器, 文中提出了一种在激光器的脊条两侧引入光子晶体结构滤除半导体激光器高阶侧模的方法。通过调节光子晶体脊条的条宽、间隔和周期数等参数来改变激光器中各个模式的场分布, 使得高阶模式在光子晶体中得到扩展, 增大其在激光器中的损耗, 同时结合选择性的载流子注入来增强基侧模的激射优势, 进而减少侧模的数量。在实验中制作了脊条宽度为 $6\ \mu\text{m}$, 光子晶体周期 $5\ \mu\text{m}$, 波长 $1550\ \text{nm}$ 的半导体激光器, 随着电流的增加, 高阶侧模受到抑制, 发散角变为 10.2° , 证实了光子晶体结构调制激光器侧模的可行性。

参考文献:

- [1] Wang Chao, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, et al. Experimental investigation on 8.7 kW laser-diode pumped solid state heat capa laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 77-78. (in Chinese)
王超, 周寿桓, 唐晓军, 等. LD 泵浦 87 kW 固体热容激光器实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 77-78.
- [2] Wang Xiaoyan, Zhao Run, Shen Mu. High-power semiconductor lasers with small divergence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 302-304. (in Chinese)
王晓燕, 赵润, 沈牧. 小发散角高功率半导体激光器研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 302-304.
- [3] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)
马晓宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 189-194.
- [4] Zhang Liquan, Zhang Shuming, Jiang Desheng, et al. Characteristics of GaN based laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 41-44. (in Chinese)
张立群, 张书明, 江德生, 等. GaN 基激光器的特性[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 41-44.
- [5] Agrawal G P. Lateral analysis of quasi-index-guided injection lasers: transition from gain to index guiding [J]. *J Lightwave Technol*, 1984, LT-2(4): 537-543.
- [6] Walpole J N, Donnelly J P, Taylor P J, et al. Slab-coupled 1.3- μm semiconductor laser with single-spatial large-diameter mode[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(6): 756-758.
- [7] Donnelly J P, Huang R K, Walpole J N, et al. AlGaAs-InGaAs slab-coupled optical waveguide lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39(2): 289-298.
- [8] Kim K C, Han I K, Lee J I, et al. High power single-lateral-mode operation of InAs quantum dot based ridge type laser diodes by utilizing a double bend waveguide structure[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 261106.
- [9] Bo B, Gao X, Gao L, et al. Rhombus like stripe BA InGaAs-AlGaAs-GaAs lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(5): 1248-1249.
- [10] Chen C, Leisher P, Patterson S, et al. Stabilization of lateral mode transients in high-power broad area semiconductor lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 011107.
- [11] Wenzel H, Bugge F, Dallmer M, et al. Fundamental-lateral mode stabilized high-power ridge-waveguide lasers with a low beam divergence [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(3): 214-216.

下期预览

基于二茂铁的复合推进剂红外/紫外低特征信号应用研究

朱晨光, 郑亭亭, 吕惠平, 薛锐, 吴伟, 李燕

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对精确制导武器隐身性能的需要, 首先利用模拟的火箭发动机喷口结构测试了 HTPB 复合推进剂的红外和紫外特征信号, 然后分析了二茂铁作为一种消光材料对 HTPB 复合推进剂火焰在红外波段和紫外波段的辐射信号衰减能力。同时, 测试了二茂铁消光材料对火箭发动机喷口温度的影响。结果表明, 利用硝酸钾、硫和酚醛树脂为基础的烟火药配方提供初始能量, 促使二茂铁快速汽化, 并在推进剂火焰外形成薄层作为消光材料, 对红外波段和紫外波段具有明显的遮蔽吸收作用, 衰减率可以达到 50% 以上。得出二茂铁含量为 30% 时在 $710\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ 波段, 对于 HTPB 复合推进剂的红外辐射衰减效果最好。含量高于 50% 时对于 HTPB 复合推进剂的 $2400\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ 波段的红外辐射强度有所增加。