

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0079-03

光子晶体激光器的最新进展

许桂雯, 欧阳征标, 阮双琛, 李景镇

(深圳大学工程技术学院固态光子实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 综述了光子晶体激光器研究领域的最新进展,介绍了当前国际上所研制的光子晶体激光器的主要类型、结构、工作原理和性能参量等,并对其发展前景作了简要展望。

关键词 激光技术; 光子晶体激光器; 研究进展; 工作原理; 光子禁带

中图分类号 TN248

文献标识码 A

Recent Progress of Photonic Crystal Lasers

XU Gui-wen, OUYANG Zheng-biao, RUAN Shuang-chen, LI Jing-zhen

(Solid State Photonics Laboratory, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Recent progress of photonic crystal lasers is reviewed. The structures, operating principles and features, and the fabrication methods of various kinds of photonic crystal lasers are reviewed. A preview of the future development of the photonic crystal lasers is presented.

Key words laser technology; photonic crystal lasers; research progress; operating mechanism; photonic bandgap

1 引言

光子晶体是一种由折射率差异较大的两种材料呈周期性排列的人工晶体。它引起了包括经典电磁学、固体能带论、半导体物理、量子光学以及纳米材料等领域的科学家的广泛关注和重视^[1-17]。

传统光电器件尺寸的缩小已经接近物理极限,光子晶体为突破这一瓶颈限制带来了曙光,可望满足元器件不断微型化的需要。另外从理论上讲,光子晶体激光器的起振阈值可以为零。因此光子晶体激光器的研究受到了广泛重视,日本^[2,4]、美国^[3]、德国^[5]、韩国^[6]、英国^[7]、瑞士^[8]、法国^[9]等国的研究者都已研制出光子晶体激光器装置。但由于其制作工艺复杂,目前国内在这方面的研究基本上是空白状态。

2 光子晶体激光器的基本工作原理、类型与发展

从工作原理上看,光子晶体激光器可以分为两类,一类基于缺陷态光子晶体的特性,另一类基于光子晶体的理想反射特性。

光子晶体的突出特征是具有光子禁带,落在禁带中的光被禁止传播,这使得光子晶体可以抑制自发辐射^[1]。利用这个特性,可大大降低非输出波方向上自发跃迁复合的几率。在光子晶体中引入特定的缺陷形成波导,可以保证自发辐射的能量几乎全部用来发射激光^[3],从而大大降低激光器的阈值,理论上可以制作出无阈值激光器。另一方面,若在光子晶体中引入缺陷,可使光子禁带内产生高密度的缺陷态。只有缺陷模式波长的光才可不断地在光子晶体中振荡和增强,从而构成可实现自发辐射增强的光子晶体单模微谐振腔激光器。这就是第一类光子晶体激光器的工作原理。

基于光子晶体的理想反射特性的激光器的工作原理与传统的激光器非常类似,不同的是这种激光器以光子晶体构成谐振腔,其品质因子非常高,而且体积非常小,约为传统微型激光器的1/10。

光子晶体从空间形态上可分为一维、二维和三维结构。同样,光子晶体激光器也有一维、二维和三维结构之分。一维分布反馈式微型激光器实质上就是一维光子晶体激光器,理论和实践上都做了较多研究,

基金项目: 国家自然科学基金(60177030)、深圳市科技局资助项目。

作者简介: 许桂雯(1979-),女,深圳大学硕士研究生,主要从事光子晶体及其在光通信和光集成方面应用的研究。

Email: zhouyang@szu.edu.cn

而三维光子晶体激光器的制作工艺比较复杂,因此目前进行的多是二维光子晶体激光器的研究。

从工作特点上看,光子晶体激光器可分为半导体光子晶体激光器^[6]、光子晶体光纤激光器^[7]、光子晶体激光二极管^[9-11]、有机聚合物光子晶体激光器^[12]。从结构特点看,已研制出的有光子晶体带间缺陷模激光器^[3]、表面发射型光子晶体激光器^[4]、脊形波导光子晶体激光器^[5]、六角波导环行谐振腔光子晶体激光器^[6]、光子晶体分布反馈式(PCDFB)激光器^[12]、垂直腔面发射光子晶体激光器^[14]、光子晶体带边激光器^[15]等。

2.1 二维缺陷态光子晶体激光器

最早的二维光子晶体激光器是在1999年由美国加州的O.Painter等人制成的二维缺陷模式光子晶体激光器^[3],其结构如图1所示。他们在二维光子晶体中引入一个点缺陷(图1中虚线部分),构成一个光学微腔,类似于半导体量子阱,从而实现了光子晶体激光器的基本构架。它采用了光抽运激励方式。

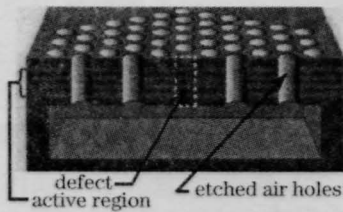


图1 最早的二维光子晶体激光器

Fig.1 Geometry of the first 2-D photonic crystal laser

2.2 二维脊形波导光子晶体激光器

德国Würzburg大学的研究者将二维光子晶体作为脊形波导激光器中一端的反射镜^[5],如图2。其中的光子晶体是通过电子束蚀刻的方式制作的。与不采用光子晶体反射端的装置相比,它具有阈值电流小、效率高的特点。他们得到的最好结果是,当光子晶体的周期为250 nm时,阈值电流为16 mA,效率达到0.34 W/A。

英国Bristol大学也开发了一种类似的光子晶

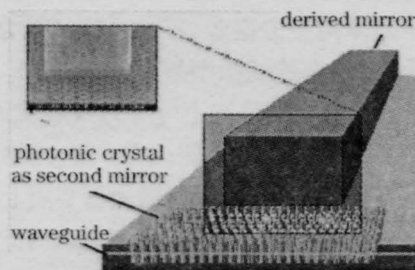


图2 脊形波导光子晶体激光器

Fig.2 Structure of a ridge waveguide photonic crystal laser

体激光器。

2.3 二维光子晶体分布反馈式激光器

尽管二维光子晶体控制光子不如三维光子晶体那么完全,光子晶体DFB激光二极管仍然比普通激光二极管具有更高的稳定性和更精确的波长调谐性。利用光子晶体可制作多维DFB激光器,从而可获得高功率的窄带表面发射激光器。

日本京都大学的研究者用二维光子晶体设计了一个装置^[10],如图3所示。晶片A是生长在p型InP衬底上的InGaAsP/InP多层量子井激发层;晶片B在n型InP衬底上构成三角形的晶格结构。使三角晶格在Γ-X方向的周期与激发层的光波长相近,就会在6个Γ-X方向出现二维分布式反馈效应,产生二维激光振荡。同时,若符合布拉格条件,光波也会通过向上衍射从衬底的表面耦合出去。这种二维DFB激光器不但同一维DFB激光器一样产生纵向模式,还产生横向模式。

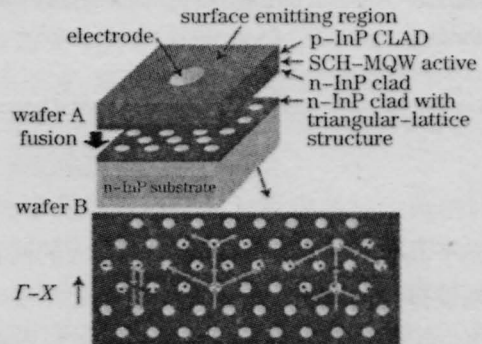


图3 通过三角形晶格产生多方向反馈的二维光子晶体激光器

Fig.3 Structure of a 2-D photonic crystal laser with multidirectionally distributed feedback via the effect of a triangular lattice

另外,美国的研究人员也研制成了一种光抽运的中红外光子晶体PCDFB^[16],它较之基于相同的晶片制作的角光栅DFB激光器(a-DFB lasers)具有更好的线性宽度和光束质量,其激光器最诱人的优点是能利用半导体激光器的标准边缘发射产生连续激光。今后的工作将包括量子级联PCDFB激光器。

2.4 六角波导环行谐振腔光子晶体激光器

韩国高等科学技术学院和电子通信研究所的科研人员制作了一个室温条件下出射波长为1.6 μm的二维六角波导环行谐振腔光子晶体激光器^[6],其截面如图4。这种光子晶体结构改善了对光的限制,使其在更低的损耗下获得更高的输出功率。

2.5 三维光子晶体激光器

日本国立材料科学学院和横滨国立大学设计的一种表面辐射型光子晶体激光二极管^[11]。

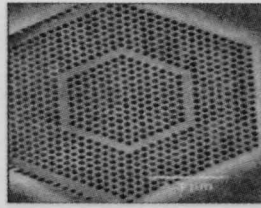


图4 六角型环行腔光子晶体激光器
Fig.4 A photonic crystal laser features
hexagonal ringresonator

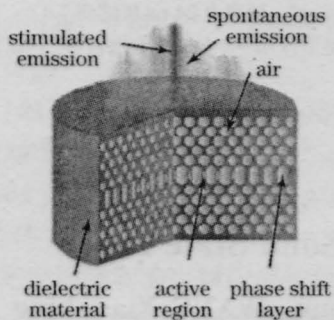


图5 一种三维光子晶体激光器
Fig.5 A kind of 3-D photonic crystal laser

激光器外部包裹一层绝缘体,内部由具有周期性空气小孔的三维光子晶体构成,上下两部分构成一个垂直的谐振腔;中部的二维光子晶体构成三维结构的缺陷层,它形成一个横向限制区,使受激辐射垂直于腔面发射。这种激光器的突出特点是:可使自发辐射的光限制在一个极小的发散角内并转化为受激辐射出射。另外,其自发辐射的寿命比传统激光器的要高2至3个数量级。这使得起振阈值低、空间相干性高和输出功率高的激光器成为可能。

在制作过程中,他们利用显微操纵技术使聚苯乙烯微滴形成精密的晶格排列。

3 制作技术和前景展望

目前光子晶体激光器的制作主要有离子体刻蚀法(FIB)^[6,10]、晶体熔接技术^[10]、电子束平板印刷术^[6]、显微操纵技术^[11],以及聚苯乙烯微滴生长法^[11]等。

另外,日本神奈川县的NTT基础实验室发明了直接纳米印刷法^[17],同传统的电子束平板印刷术相比,它可使费用降低100倍。

光子晶体激光器的体积可以小到普通半导体激光器的1/10,对于实现光学系统极小化,提高光通信的容量和速度有重要意义。利用光子晶体可制作阈值电流接近于零的半导体激光器。另外,利用光子晶体制作的单模发光二极管具有非常好的时间和空间相干性,对于量子电子学和量子光学具有特别重要的意义。

参考文献

- 1 E. Yablonovitch. Prohibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059-2062
- 2 A. F. J. Levi, S. L. McCall, S. J. Pearton *et al.* Room temperature operation of submicrometer radius disk laser [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(18): 1666-1667
- 3 O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer *et al.* Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284**(5421): 1819-1821
- 4 W. D. Zhou, S. Rennon, T. Baba *et al.* Electrically injected single-defect photonic band gap surface-emitting laser at room temperature [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(18): 1541-1542
- 5 J. Moosburger, M. Kamp, F. Klopff *et al.* Semiconductor lasers with 2-D-photonic crystal mirrors based on a wet-oxidized Al_2O_3 -mask [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13** (5): 406-408
- 6 S. H. Kim, H. Y. Ryu, H. G. Park *et al.* Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(14): 30-32
- 7 W. J. Wadsworth, J. C. Knight, W. H. Reeves *et al.* Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17): 1452-1453
- 8 M. N. Shkunov, Z. V. Vardeny, M. C. DeLong. Tunable, gap-state lasing in switchable directions for opal photonic crystals [J]. *Adv. Functional Materials*, 2002, **12**(1): 21-26
- 9 M. Rattier, T. F. Krauss, J. F. Carlin *et al.* High extraction efficiency, laterally injected, light emitting diodes combining microcavities and photonic crystals [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2002, **34**(1): 79-89
- 10 S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada *et al.* Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. *Science*, 2001, **293**(5532): 1123-1125
- 11 K. Aoki, H. Hirayama, Y. Aoyagi *et al.* Three-dimensional photonic laser and fabrication of three-dimensional photonic crystals [J]. *RIKEN Review*, 2001, **9**(33): 24-27
- 12 N. Sasa. Threshold gain and gain-enhancement due to distributed-feedback in two-dimensional photonic-crystal lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(2): 815-823
- 13 M. Notomi, H. Suzuki, T. Tamamura. Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal lasers at several photonic band gaps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78** (10): 1325-1327
- 14 D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park *et al.* Single fundamental mode photonic crystal vertical cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(21): 3901-3903
- 15 H. Y. Ryu, S. H. Kwon, Y. J. Lee *et al.* Very-low-threshold photonic band-edge lasers from free-standing triangular photonic crystal slabs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(19): 3476-3478
- 16 W. W. Bewley, C. L. Felix, I. Vurgaftman *et al.* Mid-infrared photonic-crystal distributed-feedback laser with enhanced spectral purity and beam quality [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(20): 3221-3223
- 17 A. Yokoo, M. Nakao, H. Yoshikawa *et al.* 63-nm-pitch pit pattern fabricated on polycarbonate surface by direct nanoprining [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 1999, **38**(12B): 7268-7271