

# 光子晶体垂直腔面发射 850nm 波长激光器研究\*

许兴胜<sup>†</sup> 王春霞 杜伟 赵致民 胡海洋 宋倩 鲁琳 阚强 陈弘达

(中国科学院半导体研究所光电子集成国家重点实验室 北京 100083)

**摘要** 文章报道了国内首次研制成功的光子晶体垂直腔面发射 850nm 波长激光器,实现了连续电注入激励.发现器件能否激励直接依赖于光子晶体结构参数,而激光器的阈值、输出功率、输出模式等与光子晶体的晶格常数、占空比、腔的大小等因素有关.

**关键词** 光子晶体,垂直腔面发射激光器,单模

## Investigation of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers at 850nm

XU Xing-Sheng<sup>†</sup> WANG Chun-Xia DU Wei ZHAO Zhi-Ming HU Hai-Yang  
SONG Qian LU Lin KAN Qiang CHEN Hong-Da

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** A photonic crystal vertical-cavity surface-emitting laser (PC-VCSEL) operating in the continuous wave mode near 850 nm has been realized for the first time in China. Various PC-VCSELs with several lattice constants and different filling fractions have been fabricated. It is found that the laser action depends crucially on the the values of the lattice constants, filling fraction, cavity size in the photonic crystal, and so forth.

**Keywords** photonic crystal, vertical-cavity surface-emitting laser, single mode

单模垂直腔面发射激光器(VCSEL)在光网络、数据传输、光互连、光存储和激光打印中有着潜在的应用前景,目前已成为倍受关注的研究课题.由于 VCSEL 存在空间孔过热和热透镜效应问题,所以要在抽运区内获得 VCSEL 单横模工作是较困难的,而光子晶体垂直腔面发射激光器却为此提供了一个很好的途径.

光子晶体在 GaAs 基有源材料上应用最多的是垂直腔面发射激光器,光子晶体起到横向模式控制的作用,是一种基于光子晶体光纤的结构,使多模的垂直腔面发射激光器工作转换为单横模工作<sup>[1]</sup>.由于光子晶体垂直腔面发射激光器的空间结构独特,尺寸微小,使得形成的光束为发散角小、像散可以忽略的圆形光束,具有良好的动态单纵模和空间发射模特性.大出光孔径可以实现高功率的单模输出,同时也能够提高其与单模光纤的耦合效率<sup>[2]</sup>.另外,光子晶体垂直腔面发射激光器可以降低热电阻,改

善激光器的热特性和高速调谐特性.本工作主要是利用光子晶体作用于垂直腔面发射激光器,使得激励的垂直腔面发射激光器的输出模式更好.我们对光子晶体垂直腔面发射激光器进行了较基本、较系统的探索研究,实现了连续电注入的多种参数的光子晶体结构 GaAs 基垂直腔面发射激光器的激励.

所用材料为 0.85 $\mu\text{m}$  波长 GaAs 基的三对量子阱材料,上下各 27 对 P 型和 30 对 N 型 GaAs/Al-GaAs 分布反馈反射镜(DBR),N 型 DBR 下面为 N 型衬底.通过反复地调整材料参数和材料生长实验,使得该材料的 DBR 反射谱中心频率、光致发光谱峰值频率以及腔模的频率位置调整到基本一致,为实

\* 国家自然科学基金(批准号 60345008,60377011,60537010)资助项目

2006-06-21 收到初稿,2006-09-11 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: xsxu@red.semi.ac.cn

现光子晶体面发射激光器提供材料.

我们研制了采用电注入方式实现光子晶体结构的 GaAs 基面发射激光器,或者光子晶体结构带边发射激光器.探索了光刻台面、湿氧化、沉积电极、套刻光子晶体、刻蚀光子晶体等一系列工艺.刻蚀台面主要使用 ICP 刻蚀,刻蚀深度和垂直度可以控制得很好.对于 GaAs 材料,采用湿氧化方法使得材料中高 Al 层变为  $Al_2O_3$ ,达到对电流注入孔的限制.将刻蚀好台面的材料置于氧化炉中氧化,需精确控制氧化孔径尺寸.通过湿氧化过程中适当控制各种因素,例如温度、气流、氧化时间及温度升到预定温度的上升时间,所得到的氧化孔径为  $20\mu m$  左右.

在做完普通垂直腔面发射激光器顶层 P 电极后,利用电子束曝光或高精度光刻在出光孔区域套刻光子晶体.利用 ICP 设备刻蚀光子晶体结构,刻蚀气体  $BCl_3/Cl_2$ ,通过摸索合适气体配比、压强、功率、偏压、刻蚀时间等条件,在 GaAs 材料上刻蚀出光子晶体.所加工的光子晶体结构垂直腔面发射激光器如图 1 所示,三角晶格光子晶体中间去掉一个孔作为出光限制孔.

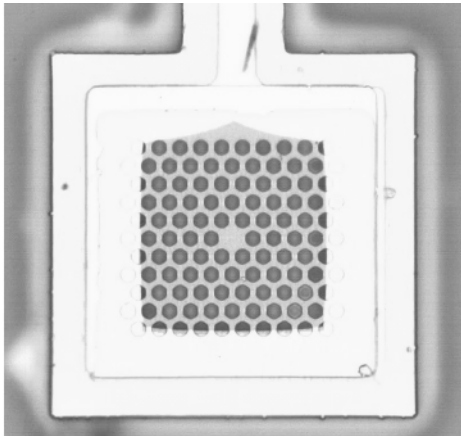


图 1 光子晶体垂直腔面发射激光器照片

图 2 是晶格常数是  $2\mu m$  和  $3\mu m$  的在连续电注入情况下光子晶体垂直腔面发射激光器  $P-I$  曲线,曲线 (a) 为无光子晶体的垂直腔面发射激光器测试结果,其阈值为  $2.6mA$  左右.其他曲线为光子晶体结构垂直腔面发射激光器测试结果.表 1 是光子晶体参数和相应激光器特性总结,可见光子晶体参数对激光特性有很大影响.对于同一晶格常数,占空比大的输出功率低, $P-I$  曲线的斜率小.在相同的刻蚀条件下,孔越大则刻蚀的深度越深,深度越深对激光器激射模式影响越大<sup>[3,4]</sup>,使得出射模式越接近于单模.相应地,功率损耗越大,出射功率低些.表中

前四行数据相比较,虽然晶格常数和占空比不同,而激射的阈值很接近,并且与无光子晶体的普通垂直腔面发射激光器的阈值  $2.6mA$  相近.表中第五行,晶格常数为  $2\mu m$ ,单缺陷垂直腔面发射激光器阈值达到  $13.5mA$ ,在  $20mA$  的注入电流下,输出功率大约只有  $1mA$ .对于  $2\mu m$  的晶格常数,在相同占空比情况下,单缺陷微腔比 7 孔微腔的出光孔小,更容易接近单模条件,由于模式损耗较大,及光子晶体孔增加了注入电流的散射损耗,所以单缺陷微腔的激光阈值较大,实际上其有效阈值并不高<sup>[2]</sup>;同时,由于接近单模,激光主要由光子晶体微腔缺陷出射, $P-I$  曲线的斜率较小,单缺陷微腔激光器功率较低.

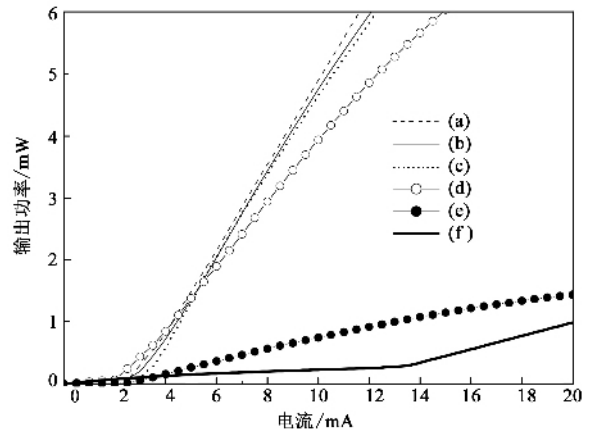


图 2 晶格常数为  $2\mu m$ 、 $3\mu m$  的光子晶体激光器激射  $P-I$  曲线 (a) 无光子晶体的普通垂直腔面发射激光器 (b)  $a = 2\mu m$   $d = 1.0\mu m$  7 孔缺陷 (c)  $a = 3\mu m$   $d = 0.9\mu m$  单缺陷; (d)  $a = 2\mu m$   $d = 1.4\mu m$  7 孔缺陷 (e)  $a = 3\mu m$   $d = 1.2\mu m$  单缺陷 (f)  $a = 2\mu m$   $d = 1.4\mu m$  单缺陷(其中  $a$  是晶格常数,  $b$  是孔的直径)

表 1 光子晶体参数和相应激光器特性

参数			激射特性		
晶格常数 / $\mu m$	$b/a$	缺陷个数	阈值 / mA	输出功率 (20mA 注入电流)	$P-I$ 曲线斜率
2	0.7	7	2	7.6	较小
2	0.5	7	2.5	9.8	大
3	0.4	1	3	1.4	小
3	0.3	1	2.5	9.7	较大
2	0.7	1	13.5	0.99	最小

图 3(a) 是有光子晶体限制的垂直腔面发射激光器的激射光谱,光子晶体的晶格常数为  $2\mu m$ ,占空比  $b/a = 0.5$ .该激射光谱应该主要是光子晶体出光孔限制的结果.对于没有光子晶体限制的情况,即大的氧化孔限制的光谱发生了分裂,产生一些边模,因为多横模在位置上的不均匀分布也会导致纵模产

生分裂,出现边模.图3(b)是没有光子晶体限制的出射光谱,可见没有光子晶体限制的出射光谱出现了多个边模,其出射光斑分布在整個出光平面内,此时激射光主要靠氧化孔限制.

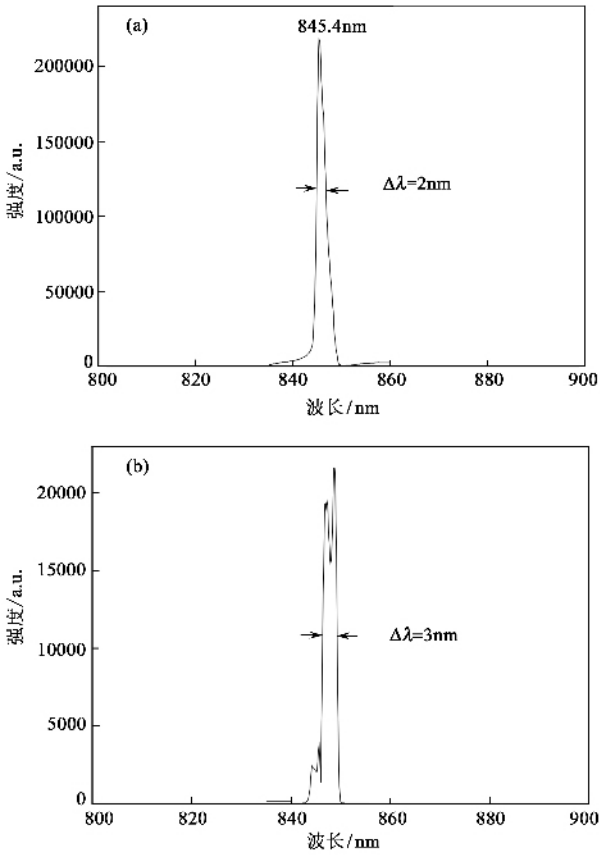


图3 (a)光子晶体微腔限制出光的光谱,光子晶体晶格常数 $2\mu\text{m}$ ,孔直径为 $1.0\mu\text{m}$  (b)没有光子晶体限制的出光光谱

实现器件单模工作是许多应用领域的-一个基本要求,在光纤光学中,单模条件表达为 $V < 2.405$ ,单缺陷的光子晶体光纤的 $V$ 参数表达为

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n^2 - n_{\text{eff}}^2},$$

其中 $a$ 为晶格常数, $\lambda$ 为工作波长, $n$ 为材料折射率, $n_{\text{eff}}$ 为等效折射率,定义为制作了光子晶体材料的折射率.

图4是利用上述公式计算的 $V$ 参数与 $b/a$ 的关系图,可以看出,当 $b/a$ 小于0.1时,单缺陷的光子晶体是单模波导.实际情况中要考虑到有限刻蚀深度的影响,所计算的 $V$ 参数的值要比图4中的小.

由计算结果可见 $b/a$ 值越小,则越容易接近单模条件.但是实际的实验结果发现(由表1) $b/a$ 越

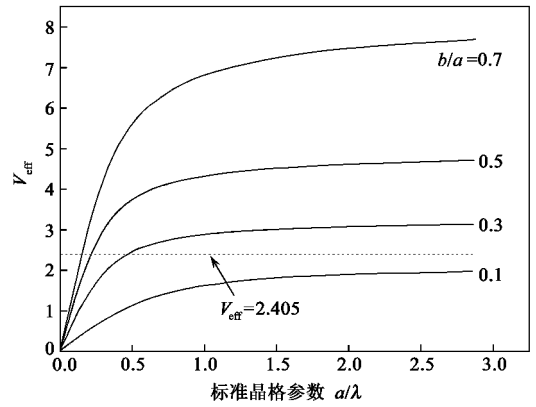


图4 有光子晶体的垂直腔的 $V$ 参数

小,激光器出射功率越大,越是偏离单模情况,这主要是因为在我们实验中, $b/a$ 大小不同的光子晶体同时进行干法刻蚀,孔径越大,刻蚀深度越深,则由此引起的出光孔与周围光子晶体折射率差越大,对光的限制能力越强,更容易接近单模条件.所以实际实验中要综合考虑刻蚀深度和光子晶体参数对激光器单模条件的影响.我们也需要从这两方面改进实验,进一步实现单模的光子晶体垂直腔面发射激光器.

我们在国内首次成功研制了GaAs基光子晶体垂直腔面发射激光器,实现了连续电注入的光子晶体垂直腔面发射激光器,激射波长为850nm附近.摸索了光子晶体结构的垂直腔面发射激光器的研制工艺和测试方法,设计并研制了一系列参数的光子晶体面发射激光器.研究发现,光子晶体的晶格常数达到 $2\mu\text{m}$ 时,我们得到了激射的激光器.还研究了缺陷孔的大小,占空比对激光器的阈值、出射功率、出射模式的影响,缺陷越大,出射功率就越大.这些研究结果对进一步开发高性能垂直腔面发射激光器很有意义.

## 参 考 文 献

- [1] Song D S, Kim S H, Park H G *et al.* Appl. Phys. Lett., 2002, 80: 3901
- [2] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9: 1439
- [3] Yokouchi N, Danner A J, Choquette K D. Appl. Phys. Lett., 2003, 82: 1344
- [4] Danner A J, Raftery J J, Yokouchi N *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 84: 1031