

半导体量子阱材料微加工光子晶体的光学特性^{*}

许兴胜^{1)†} 熊志刚²⁾ 孙增辉¹⁾ 杜伟¹⁾ 鲁琳¹⁾ 陈弘达¹⁾ 金爱子²⁾ 张道中²⁾

1) 中国科学院半导体研究所光子集成国家重点实验室, 北京 100083)

2) 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2005 年 6 月 23 日收到, 2005 年 7 月 4 日收到修改稿)

利用聚焦离子束刻蚀方法和电子束制版结合干法刻蚀方法制备了二维近红外波段光子晶体, 发现两种方法都可以制备出均匀的二维光子晶体. 聚焦离子束方法操作简单, 电子束制版结合干法刻蚀方法操作步骤复杂. 光谱测试表明, 利用聚焦离子束方法在有源材料上刻蚀的光子晶体不发光, 而电子束制版结合干法刻蚀方法制备的小晶格常数光子晶体即使有些无序, 其出光效率也提高到没有光子晶体时的两倍. 对两种方法所加工的光子晶体不发光和提高出光效率的机理进行了分析.

关键词: 聚焦离子束, 电子束制版, 光子晶体, 出光效率

PACC: 4270Q, 4265K, 4225B

1. 引 言

近年来, 光子晶体的研究热点已经从最初的理论研究转为利用微加工设备研制方面的实验研究. 利用聚焦离子束方法制备半导体材料的近红外波段光子晶体很少见到报道, 我们采用聚焦离子束(FIB)刻蚀系统制作了近红外波段的二维光子晶体结构^[1]. 最近中科院物理所的研究人员证明利用聚焦离子束方法可以制备光学性能较好的无源光子晶体^[2]. 那么利用聚焦离子束在半导体量子阱材料上制备二维光子晶体后其发光特性如何, 这是一个值得研究的课题. 传统的制备二维近红外波段光子晶体方法是电子束制版结合干法刻蚀方法. 通常该方法在半导体量子阱材料上制备光子晶体后, 材料的出光效率都有很大的提高. Fan 等人通过数值模拟计算指出光子晶体结构可以将 LED 的出光效率提高到 94%^[3]. Yablonovitch 等人利用二维光子晶体提高 InGaAsP/InP 量子阱材料的效率, 发现出光效率达到 70% 左右^[4]. 韩国研究小组在 InGaAsP/InP 材料上制备了二维光子晶体, 实验和理论模拟发现其出光效率有 8—13 倍的提高^[5]. 光子晶体结构的主要作用是抑制平板波导内的传导模并将传导模提取出波

导外从而达到出光效率的提高. 本文探索了利用微加工设备制备近红外波段光子晶体的方法以及光子晶体材料的光谱测试方法, 比较了利用聚焦离子束方法和电子束制版结合干法刻蚀方法在半导体量子阱材料上制备二维光子晶体及其光谱特性.

2. 聚焦离子束制备样品及相应光谱

所使用聚焦离子束系统为美国 FEI 公司生产, 型号为 DB235. 其中内附扫描电镜系统分辨率 3nm, 离子束分辨率为 7nm, 加工最大晶片尺寸 5cm. FIB 技术特点是直写式, 利用 Ga 离子直接刻蚀样品, 无需利用多种掩模进行图形转移, 简化了工艺过程. 实验中方形晶格光子晶体设计参数为: 晶格常数为 525nm, 半径 170nm, 孔数为 289 个, 采用 Parallel 模式刻蚀, 束流 300pA, 时间为 30s, 加工结果如图 1(a) 所示.

聚焦离子束系统在刻蚀前后, 一般需要在离子束状态下调焦、调像散, 移动写场时离子束也会扫描. 在我们加工的光子晶体周围可以发现一些不均匀的黑色区域, 这都是离子束不同程度照射结果, 而这些离子束照射区域的发光性能将会有很大变化.

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB610402), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311020), 国家自然科学基金(批准号: 60345008, 60377011)资助的课题.

[†] E-mail: xsxu@red.semi.ac.cn, xsxu@aphy.iphy.ac.cn

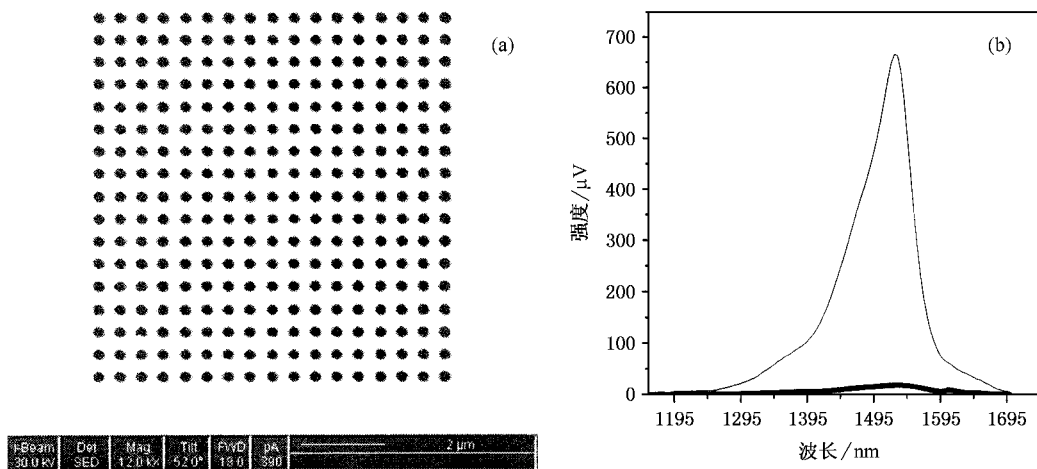


图 1 (a)聚焦离子束刻蚀方法在 InP 材料上加工的光子晶体结构;(b)聚焦离子束加工的光子晶体区域发光光谱(粗线所示)与未加工光子晶体材料发光光谱比较

光子晶体制作好后,我们在自行搭建的光子晶体激光器测试系统上测量了光子晶体的光谱特性.采用钒酸钷倍频波长为 532nm 激光作为抽运光源,采用 60 倍显微物镜将光斑聚焦到直径约 6 μ m 大小,同时该透镜也是收集透镜,将信号光收集到光谱仪中,用 InGaAs 探测器探测,通过锁相放大器送入计算机分析,系统的灵敏度达到 50nV.通过测量我们发现利用 FIB 加工的光子晶体区域在上述测试系统上测不到发光信号.将探测点逐渐移开光子晶体区域,我们发现即使离开刻蚀的光子晶体区域,只要是聚焦离子束照射过的地方,都测不到发光信号.只有当探测点移开到距离光子晶体区域足够远位置,

如达到光子晶体区域 1mm 以外的位置,才探测到很微弱的信号,如图 1(b)的粗线所示,最大信号才 18.5 μ V.而未用聚焦离子束加工过的相同材料,荧光光谱如图 1(b)的细线所示,其最大值达到 666 μ V.该现象说明,利用聚焦离子束刻蚀的 InGaAsP/InP 量子阱材料的发光性能遭到破坏,基本上不发光了.这是由于刻蚀过程是直接利用高能的重金属离子束轰击的物理过程,而且聚焦离子束的离子是 Ga³⁺,在轰击刻蚀过程中,改变了有源层部分的 Ga 离子比例,造成量子阱材料的改性,破坏了量子阱有源材料的发光特性.

为了验证是 Ga 离子轰击导致有源材料变性从

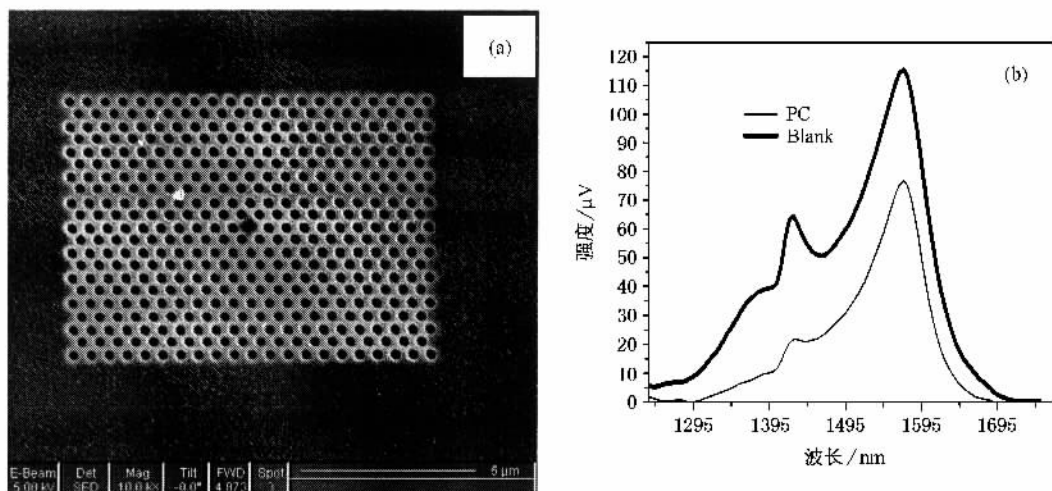


图 2 (a)采用 SiO₂ 作为 InP 掩模,采用聚焦离子束在 InP 材料上加工出的光子晶体结构(b)相应于图(a)光子晶体区域的发光光谱(细线所示)与没有光子晶体区域的发光光谱(粗线)

而发光特性变化,我们研究了 FIB 方法在有 SiO_2 掩模层的 InP 量子阱材料上刻蚀光子晶体及其发光特性.在 InGaAsP/InP 量子阱材料表面生长 200nm 的 SiO_2 , 然后利用聚焦离子束类似上述条件下加工光子晶体,结果如图 2(a).在前述相同的测试设备上测量其光谱特性,测量结果如图 2(b),我们发现光子晶体区域仍然有较强的发光(细线),不过发光强度比没有光子晶体区域的发光强度降低了将近 50%(粗线).但是我们看到,有 SiO_2 作掩模的 InP 材料上光子晶体区域的发光特性比没有 SiO_2 作掩模的光子晶体区域的不发光情况有很大的改进.这说明 InP 材料上的 SiO_2 层有减缓 Ga^{3+} 对有源材料的轰击损伤作用,但是这种情况下材料仍然有一定改性,导致发光效率降低.

3. 电子束制版结合干法刻蚀方法制备样品及其光谱

由以上实验可见,采用聚焦离子束方法是难以得到发光性能良好的光子晶体结构及器件.为了利用微加工方法制备出基于半导体有源材料的光子晶体器件,我们又探索了电子束曝光结合干法刻蚀方法研制光子晶体工艺.

首先在 InP 材料上淀积厚度 180nm 的 SiO_2 ,在 SiO_2 上涂覆 200nm 厚的 PMMA 胶,然后利用电子束曝光技术在 PMMA 胶上定义图形.利用中国科学院半导体所反应离子束刻蚀设备(RIE Machine 型号: MPI-500)将图形由 PMMA 转入 SiO_2 ,刻蚀气体为 $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ 混合气体,刻蚀速率约为 35nm/min,刻蚀气体

对材料的选择比为 $\text{PMMA}:\text{SiO}_2 = 1:1$.图形转入 SiO_2 层之后,即利用 SiO_2 作为掩模刻蚀 InP.该刻蚀过程使用电子回旋共振离子束刻蚀系统(ECR Ion Beam Etching System),该方法中使用 $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$ 混合气体刻蚀样品,其中 Ar 的体积百分比为 80%,刻蚀速率约为 1mm/s,刻蚀深度约为 300nm.最后将表面残留的 SiO_2 掩模用稀 HF 溶液清洗去除.最终获得光子晶体结构的 SEM 照片如图 3(a)所示.可以发现刻蚀后,相邻的空气孔壁出现了很多裂痕,这是由于刻蚀过程中 Ar 气流量过大造成的.由于大量 Ar 离子的轰击作用,使相邻空气孔之间的侧壁受到较大的应力,使得侧壁沿较脆弱的晶面断开.该刻蚀方法中所使用的气体 Cl_2 跟 InP 起化学反应,而 Ar 主要靠轰击的物理过程达到刻蚀作用.

图 3(a)所示光子晶体效果不好主要问题在于干法刻蚀工艺,尤其是 Ar 离子的比例过大造成孔的不规则.为了进一步研制出规则的周期性光子晶体结构,我们摸索了 RIE 刻蚀光子晶体方法.采用 SiO_2 为掩模,利用 RIE 设备上的 $\text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{Ar}$ 混合气体刻蚀 InP 材料,其中 Ar 的含量较少.刻蚀完成的最后图形如图 3(b)所示,由图可见,相对于用电子回旋共振式离子束刻蚀方法的效果有了明显改善,获得了较好的光子晶体图形.图中的空气孔保持较好的圆形,也没有类似 ECR 设备上刻蚀后的孔壁断裂现象.

图 4 所示为对应图 3(a)的光子晶体区域的发光谱与没有光子晶体区域发光谱的比较.图中的两条曲线分别对应了在相同的条件下抽运两个不同区域的发光谱,两个区域分别为未刻蚀的 InGaAsP/InP

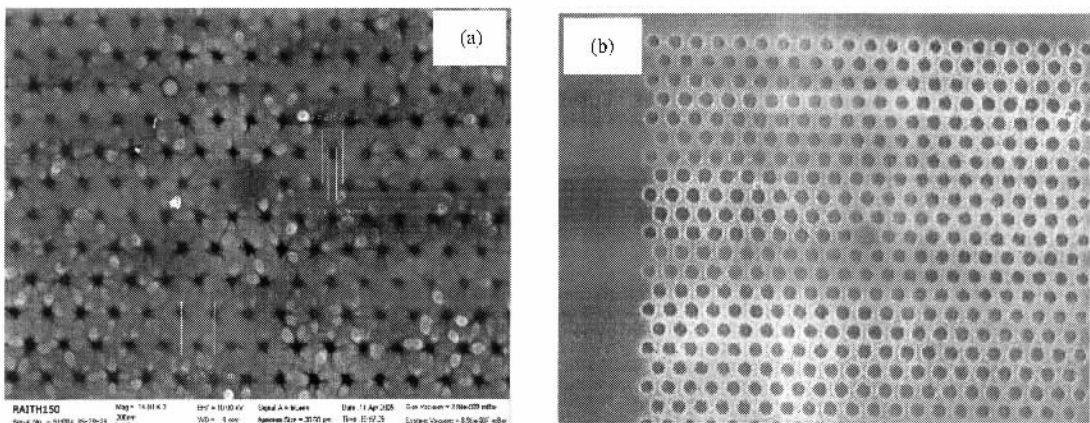


图 3 (a)采用电子束曝光与 ECR 干法刻蚀研制的光子晶体,图中孔不规则断裂的原因是 Ar 气的比例过大,其中设计的光子晶体晶格常数为 525nm,孔径为 160nm (b)采用电子束曝光与 RIE 干法刻蚀方法制备的光子晶体结构

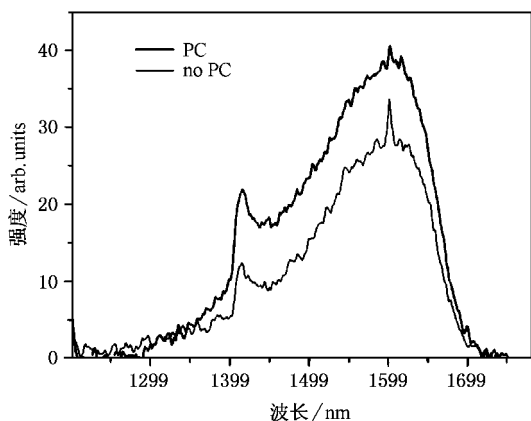


图4 光子晶体区域与光子晶体以外区域的发光谱,较细曲线对应未刻蚀光子晶体区域的发光,较粗曲线对应光子晶体区域发光(图中位于1596nm的尖峰为532nm抽运光的三级衍射谱)

外延片量子阱的PL谱(细线)和光子晶体区域PL谱(粗线)。从图中的测试结果可以发现,不同区域的出光功率不同,即出光效率不同。波长为1400—1700nm的范围内,该波长范围正好落在光子带隙内(见图5),光子晶体区域的出光功率明显高于未刻蚀光子晶体区域的出光功率。由于光子晶体的光子带隙与波长有关,因此不同波长下的出光效率提高程度不同。出光效率提高较明显的区域为波长1400—1600nm范围。波长为1550nm时出光效率提高了35%,波长为1450nm时,提高幅度为102%,当波长为1410nm时,出光效率提高了78%。由此可见出光效率提高的峰值波长为1450nm附近,最大的出光效率提高到原来的两倍。在近似的晶格常数下,本文的提高效果与文献[5]中的结果是接近的。我们看到1450nm在光子带边附近(见图5),这说明光子带边更有益于提高LED的出光效率。根据理论分析^[3,5],光子晶体结构能引入光子带隙,使对应光子

带隙的自发辐射的光在平板波导内被抑制,就从平板波导中泄漏出来,这就提高了垂直方向的出光效率。理论和实验分析表明,图3(b)的光子晶体结构对材料的出光效率的提高程度和图3(a)差不多。由以上实验可见,采用电子束制版和干法刻蚀方法制备的光子晶体即使在孔的效果很差的情况下,也会提高材料的出光效率,而聚焦离子束刻蚀结果会降低出光效率或破坏发光特性。

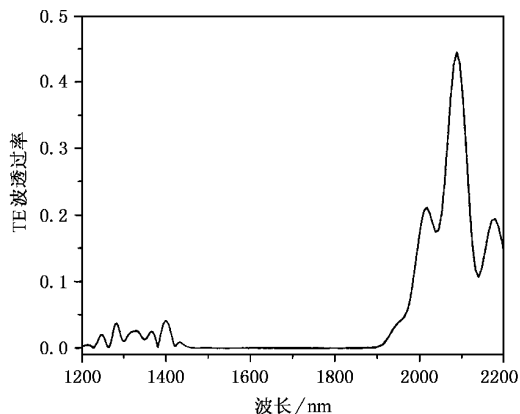


图5 采用三维时间有限差分法计算的光子晶体带隙,晶格常数525nm,孔径160nm

4. 结 论

本文分别利用聚焦离子束方法和电子束制版结合干法刻蚀方法研制了InP量子阱材料的二维近红外波段的光子晶体,在自行搭建的测试系统上测量了所研制光子晶体材料的发光特性,我们发现利用聚焦离子束方法刻蚀的光子晶体其发光特性受到很大的破坏,而利用电子束制版与干法刻蚀结合的方法研制的光子晶体材料的出光效率提高到没有光子晶体材料的两倍。

[1] Xu X S, Han S H, Cheng B Y, Zhang D Z 2004 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **21** 112 (in Chinese) [许兴胜、韩守振、程丙英、张道中 2004 量子电子学报 **21** 112]

[2] Tian J, Han S Z, Chen B Y, Li Z Y, Feng S, Zhang D Z, Jin A Z 2005 *Atac Phys. Sin.* **54** 1218 (in Chinese) [田 洁、韩守振、程丙英、李志远、冯 帅、张道中、金爱子 2005 物理学报 **54** 1218]

[3] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Schubert E F 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3294

[4] Boroditsky M, Krauss T F, Coccioni R, Vrijen R, Bhat R, Yablonovitch E 1999 *Appl. Phys. Lett.* **175** 1036

[5] Ryu H Y, Hwang J K, Lee Y J, Lee Y H 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quan. Elec.* **8** 231



Optical properties of semiconductor quantum-well material using photonic crystal fabricated by micro-fabrication machine^{*}

Xu Xing-Sheng^{1)†} Xiong Zhi-Gang²⁾ Sun Zeng-Hui¹⁾ Du Wei¹⁾ Lu Lin¹⁾
Chen Hong-Da¹⁾ Jin Ai-Zi²⁾ Zhang Dao-Zhong²⁾

1) *Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

2) *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 23 June 2005 ; revised manuscript received 4 July 2005)

Abstract

Two-dimensional photonic crystals in near infrared region were fabricated by using the focused ion beam (FIB) method and the method of electron-beam lithography (EBL) combined with dry etching. Both methods can fabricate perfect crystals, the method of FIB is simple, the other is more complicated. It is shown that the material with the photonic crystal fabricated by FIB has no fluorescence, on the other hand, the small-lattice photonic crystal made by EBL combined with dry etching can enhance the extraction efficiency two folds, though the photonic crystal has some disorder. The mechanisms of the enhanced-emission and the absence of emission are also discussed.

Keywords : focused ion beam, electron beam lithography, photonic crystal, extraction efficiency

PACC : 4270Q, 4265K, 4225B

^{*} Project supported by the 973 Program (Grant No. 2001CB610402), the 863 Program (Grant No. 2003AA311020) and NNSFC Program (Grant Nos. 60345008, 60377011).

[†] E-mail: xsxu@red.semi.ac.cn, xsxu@aphy.iphy.ac.cn