

# 聚焦离子束研制半导体材料光子晶体<sup>\*</sup>

许兴胜<sup>1)†</sup> 熊志刚<sup>2)</sup> 金爱子<sup>2)</sup> 陈弘达<sup>1)</sup> 张道中<sup>2)</sup>

1) 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)

2) 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2006 年 6 月 7 日收到, 2006 年 9 月 18 日收到修改稿)

介绍了利用聚焦离子束设备在多种半导体材料上成功研制的近红外波段二维光子晶体, 给出了相关微加工结果, 发现微加工的尺寸和理论设计尺寸相吻合, 测试了所加工的无源光子晶体光子带隙和有源光子晶体的发光谱. 实验证明聚焦离子束可以研制二维光子晶体及相关光子晶体器件.

关键词: 聚焦离子束, 半导体材料, 光子晶体

PACC: 4270Q, 4265K, 4225B

## 1. 引 言

1987 年, John<sup>[1]</sup>和 Yablonovitch<sup>[2]</sup>分别提出了光子晶体的概念. 经过十余年的发展, 国际上对光子晶体的研究重点已经从初期的理论研究逐步转移到光子晶体应用理论和相应的光电子器件的制备的研究上来. 目前光子晶体的研制主要采用电子束制版和干法刻蚀方法. 聚焦离子束(FIB)设备在材料刻蚀、辅助沉积、修饰电路、修复掩模、离子注入等方面有独特的用途<sup>[3]</sup>. 而利用 FIB 方法微加工光子晶体相对较少<sup>[4,5]</sup>, 利用 FIB 在半导体材料上研制二维光子晶体的报道也不多<sup>[6,7]</sup>. 我们根据离子束刻蚀设备的精度和光子晶体加工器件的精度要求, 采用 FIB 设备在半导体材料上制备二维光子晶体结构, 微加工了可见光和光通信波段的光子晶体和器件. 我们使用的 FIB 刻蚀系统为美国 FEI 公司生产, 型号为 DB235, 为电子、离子双束加工系统, 其中电子束分辨率 3 nm, 离子束分辨率为 7 nm. 离子源为镅离子, 镅离子束能量从 1 kV 到 30 kV 可调, 离子束流从 1 pA 到 20 nA 可调, 可以气体增强刻蚀 Si, SiO<sub>2</sub>, 加工最大晶片尺寸 5.08 cm. 本文的实验中所使用镅离子束能量一般是 25 kV, 腔内的真空度一般为 5—7 mPa. 利用 FIB 加工光子晶体, 工艺步骤简单, 只需要设计好数据文件, 调焦、调像散, 设计好

相关参数后即可直接在半导体材料上刻蚀, 不需要像电子束制版和干法刻蚀方法复杂的多道工序<sup>[8]</sup>. 加工出的光子晶体尺寸和设计尺寸较好地符合, 而且加工深度和垂直度都可以满足要求.

## 2. FIB 研制二维光子晶体

利用分子束外延方法或金属汽相沉积法在半导体衬底上生长一层低折射率材料(或可以转化为低折射率的材料, 如 AlAs 经过湿氧化后可以转变为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 然后再生长一层使得近红外光满足单模条件的平板波导的半导体材料, 实现二维光子晶体对传输光的三维方向的控制, 为光学测试和实际应用创造条件. 我们已经按上述要求准备了 GaAs/AlAs/GaAs, Si/SiO<sub>2</sub>/Si, InP/InGaAsP, GaN/AlGaN 等符合做光子晶体要求的材料并利用多种微加工方法(包括 FIB 方法, 电子束制版结合干法刻蚀方法)在这些材料上加工出光子晶体结构.

### 2.1. GaAs 材料

我们在 GaAs 材料上加工出多种结构光子晶体, 如三角晶格(图 1)、准晶光子晶体(图 2). 经过较长时间的摸索, 发现该材料利用 FIB 加工出的光子晶体结构很平整、孔很光滑, 在我们需要的尺寸范围内, 孔壁也很陡直, 孔的深度超过我们所设计的深

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60345008, 60377011, 60537010)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xsxu@red.semi.ac.cn

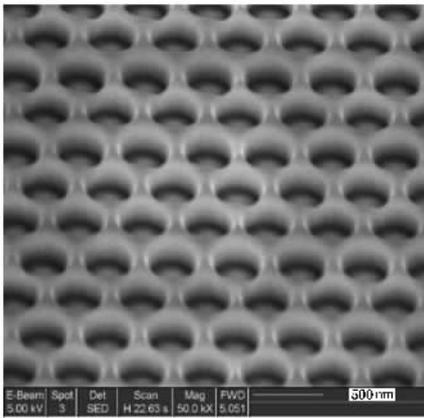


图 1 三角形光子晶体

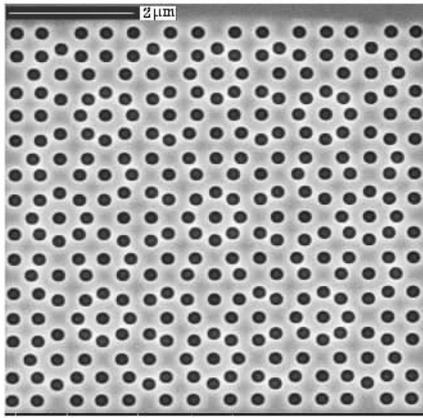


图 2 准晶光子晶体

度,也即超过了的 300 nm GaAs 外延层波导厚度.在 GaAs 材料的刻蚀中采用的离子束束流很小,仅 10 pA,因而需要的刻蚀时间较长,但是所得到的孔壁比使用大束流加工时要光滑.

设计三角晶格光子晶体的晶格常数  $a = 500$  nm,孔径为  $r = 200$  nm,孔个数为 149. FIB 系统工作模式:Parallel,离子束流使用 10 pA,设置时间 300 s,采用 IEE 绝缘增强刻蚀.加工结果如图 1,该照片为样品倾斜  $52^\circ$  角后扫描电子束拍摄,由图 1 中标尺可见,加工的晶格常数与设计的参数较好地符合.

准晶的特点是其带隙在一定范围内(如八重准晶为  $22.5^\circ$ )不随入射光的角度变化而变化.八重准晶是由方形和  $45^\circ$  菱形为单元拼接扩展而成.设计的准晶参数为:方形边长为 400 nm,孔径为 130 nm,光子晶体孔个数为 445;设置的 FIB 微加工 Parallel 工作模式,刻蚀时间 600 s,加工结果如图 2.

## 2.2. Si 材料

Si 材料是采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 生长的,本实验中最上层波导的厚度一般是 500 nm,其下为  $1 \mu\text{m}$  厚度的  $\text{SiO}_2$ . 在 Si 材料上加工光子晶体经过较长时间的摸索,调整各个参数的设置,如调整离子束束流大小,设置微加工深度,调整刻蚀时间,以及采用绝缘增强刻蚀,选择 Serial 或 Parallel 模式等,经过反复摸索微加工工艺,最后找到较合适的微加工条件.在 Si 材料上加工方形光子晶体,先调焦、调像散,读入方形光子晶体待加工数据文件,设置孔径为 90 nm,深度为 500 nm,孔个数为 529 个,工作模式为 Serial 模式,离子束束流 30 pA,设置每个孔加工时间 2.003 s. 最后微加工的电子束照片见图 3.

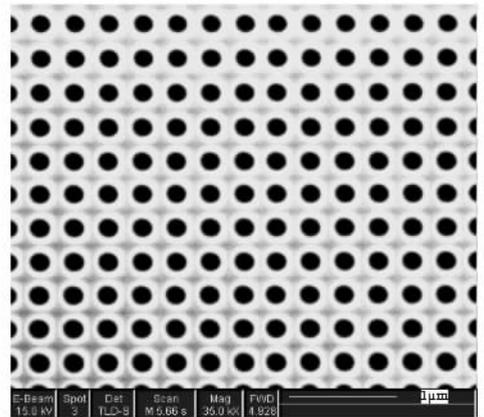


图 3 Si 材料光子晶体

## 2.3. GaN 材料

GaN 材料一般以蓝宝石为衬底,蓝宝石不导电,利用电子束或离子束观察时因为不能形成导电回路,所以很难看清表面,给调焦、调像散带来困难.我们采用导电胶将 GaN 表面和样品台连接,使得 GaN 与金属样品台导通后,GaN 表面就可以看得很清晰了.调焦调像散完成后,读入数据文件,晶格常数为 420 nm,孔径 120 nm,孔的个数 413 个,在样品表面形成光子晶体图形.工作模式选 Parallel,离子束流采用较大的 300 pA,刻蚀时间设为 30 s,设置刻蚀深度为 600 nm.刻蚀结果如图 4 所示.可见采用大束流也可以刻蚀出较规则的光子晶体结构,而且非常快捷,如果束流为 10 pA,估计需要 14 min 的时间.

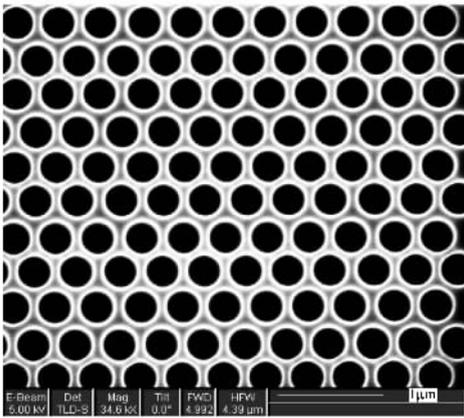


图 4 GaN 材料光子晶体

## 2.4. InP 材料

在 InP 材料上我们加工出光子晶体微腔结构,目的是做光子晶体激光器.设计光子晶体方形晶格晶格常数为 525 nm,半径为 170 nm,孔个数为 625,中心为单缺陷,设置刻蚀深度 600 nm,采用聚焦离子束 Parallel 模式,离子束束流 300 pA,刻蚀时间 30 s,刻蚀结果如图 5.图 5 为直接在 InP 材料表面利用 FIB 方法加工光子晶体结果.在实验中我们还试验了采用 SiO<sub>2</sub> 作为掩模后再利用 FIB 刻蚀光子晶体:首先采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法在 InP 材料的表面生长厚度为 180 nm 的 SiO<sub>2</sub>,以 SiO<sub>2</sub> 作为 InP 的保护层,采用 FIB 刻蚀方法在 SiO<sub>2</sub> 材料及 InP 上同时刻蚀光子晶体.因为 SiO<sub>2</sub> 不导电,电子束或离子束扫描时没有 InP 材料的清晰,颜色也有区别(见图 6).但是,因为有了

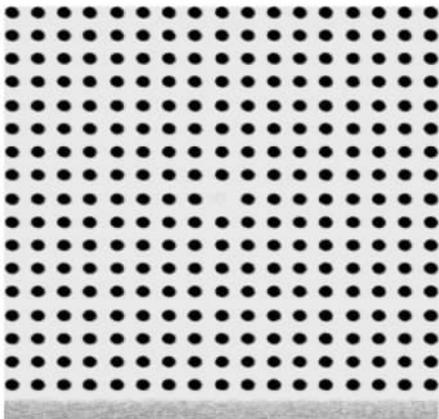
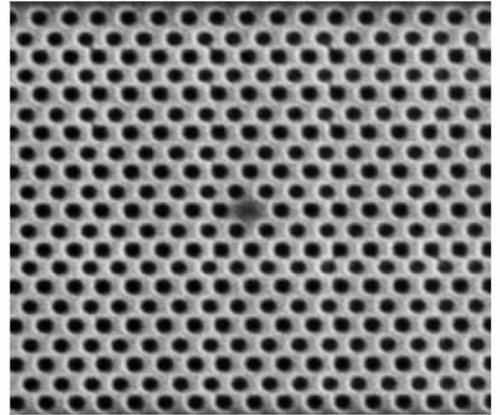


图 5 InP 材料光子晶体

SiO<sub>2</sub> 作为阻挡层,减缓了聚焦离子束加工过程中镱离子轰击过程中对有源材料的破坏,所以加工后材料的光学性能更好些.

图 6 SiO<sub>2</sub> 作掩模的 InP 材料光子晶体

## 2.5. 微加工深度

要保证光在打周期孔的平板波导中传输而不泄漏到衬底中,并且能够形成光子带隙,需要打孔的深度超过平板波导的厚度.图 7(a)为 GaAs/AlAs/GaAs 材料上打孔的深度情况,即以 GaAs 为衬底材料,用 MBE 生长一层 AlAs 隔离层,再在其上长一层 300nm 的 GaAs.图 7(b)为 Si/SiO<sub>2</sub>/Si 结构材料,即所谓 SOI 材料,顶层 Si 大约 500 nm.我们使用与上述相应材料的近似加工条件刻蚀出一些孔用来判断加工深度,可见孔的深度超过平板波导的厚度.

以上主要介绍了利用 FIB 方法在多种半导体材料上加工的光子晶体结构,我们还利用该设备在半导体材料上加工了多种光子晶体器件,如环形光子晶体<sup>[9]</sup>、光子晶体波导、F-P 腔、波分复用器等.使用中,可以采用两种加工模式,一是 Parallel 模式,另一种是 Serial 模式,这两种模式都可以加工出效果良好的光子晶体.可以采用多种束流,如文中我们介绍了采用 10 pA、30 pA 和 300 pA 束流加工光子晶体方法.小束流加工出的图形形貌更加规整,孔更加光滑,但加工时间也很长,而使用 300 pA 束流加工光子晶体效果也很好,光滑度也较高,而且加工时间很短,这是较好的加工条件.实验证明该方法可以加工出高质量的近红外波段的光子晶体及基于光子晶体结构的各种器件,精度可以满足要求,工艺过程简单.

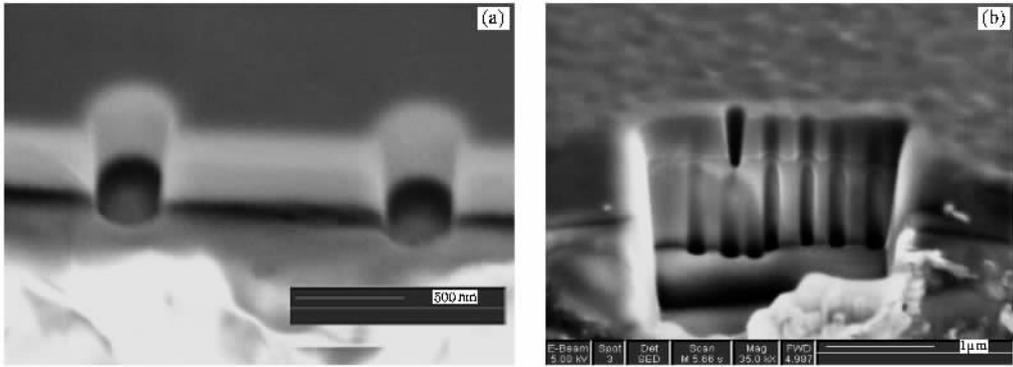


图7 光子晶体微加工深度 (a) GaAs 材料 (b) Si 材料

### 3. 光子晶体测试

我们搭建了微区光谱测试设备对所加工的光子晶体进行了测试. 无源材料所用光源由钷酸钡倍频激光器输出的 532 nm 激光抽运的钛兰宝石激光器, 调谐范围为一般为 720—950 nm, 输出功率可达 750 mW. 已有利用该激光器测试光子晶体特性的报道<sup>[10]</sup>. 钛兰宝石激光由一个 40 倍的显微物镜聚焦到样品上, 再由一个 40 倍的显微物镜收集, 在收集物镜后一定距离处放置一 100  $\mu\text{m}$  左右的小孔以限制杂散光, 探测器采用 Si 光电探测器, 探测的信号送入到锁相放大器, 再由计算机采集处理. 三角晶格的光子晶体采用聚焦离子束方法刻蚀在 SOI 顶层的多晶硅材料上, 晶格常数为 250 nm, 半径为 90 nm, 测试结果和理论结果比较如图 8. 由于受激光器调谐范围的限制, 只能测量到 725—840 nm 的调谐范围. 由图 8 可见测试结果和理论结果基本符合. 在此光谱范围内, 多晶硅的折射率较大, 大约为 3.9 左右. 我们采用是多重散射方法计算光子晶体透过谱, 为二维方法, 计算采用的折射率为 3.4, 为近似等效折射率. 计算结果和实验结果相比有一些偏差, 可能是由于我们计算中折射率取值有偏差及实际加工出的孔的尺寸与设计值有偏差所致. 另外实际 FIB 加工的孔在深度方向有一定的锥度, 导致实际的有效孔径比设计值小, 也带来测量光谱和计算光谱间的差异.

有源 InP/InGaAsP 量子阱材料的抽运源采用钷酸钡倍频 532 nm 激光, 功率最大可以调节到 6 W. 采用 60 倍的会聚透镜将光斑聚焦到样品上, 同时用此透镜将信号光收集到光谱仪及锁相放大器中, 测试系统的灵敏度达到 50 nV. 通过测量发现, 利用

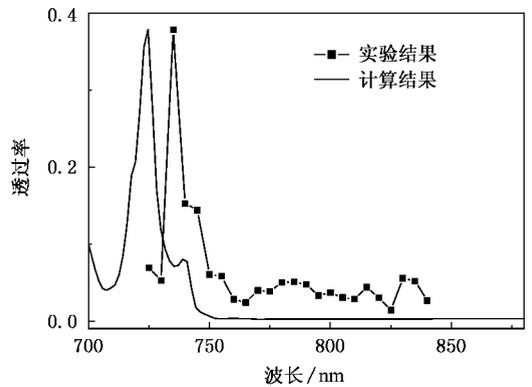


图8 三角晶格光子晶体测试结果跟理论计算结果比较图

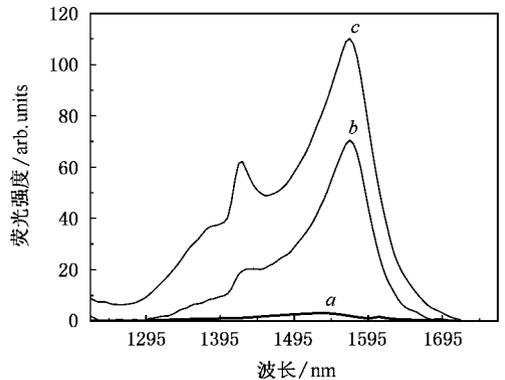


图9 InP 光子晶体 PL 谱

FIB 直接在 InP 材料加工的光子晶体区域(图 5)在上述测试系统上测量不到发光信号. 将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约 1 mm 以外的位置, 我们才探测到很微弱的信号, 如图 9 曲线 a 所示. 未用 FIB 加工过的相同材料, 荧光光谱如图 9 的曲线 c 所示. 这种利用 FIB 刻蚀的 InP/InGaAsP 等量子阱材料后材料不发光现

象的产生原因可能有两个,其一可能是镓离子对有源层的轰击导致材料变性,其二可能是镓离子轰击后对上层半导体材料造成污染使得透光性很差<sup>[3]</sup>. 这两方面的原因哪个占主要位置,还需要进一步研究. 而利用 SiO<sub>2</sub> 作掩模光子晶体区域(图 6)仍然有较强的发光(曲线 b),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一半.

为了反映光子晶体对有源材料的出光效率的影响,需要计算光子晶体平板的能带结构. 我们采用三维时域差分法(3D FDTD)分别计算对应图 5 和图 6 的光子晶体的能带结构,计算结果分别示于图 10(a)和图 10(b). 图 10 中点线为各个能带的导模,灰色实线为折射率为 1 的光锥(light-cone),破折线为折射率为 3.1(即下包层 InP 材料)对应的 light-cone. 折射率为 1 的 light-cone 将 K 空间分为两个区域,其中在 light-cone 以下区域为在平板波导内传播的导模区域,而 light-cone 以上区域为由平板波导泄漏到空气中的泄漏模区域. 对于利用光子晶体提高平板结构的有源材料的出光效率而言,我们希望能

带图中的 light-cone 以下的模式少一些,而 light-cone 以上的模式多一些. 图 6 的材料结构与图 5 的区别仅仅是在图 6 的 InP 材料顶层加上一层 180 nm 厚度的 SiO<sub>2</sub>. 图 10(a)的能带图对应没有顶层 SiO<sub>2</sub> 的结构,而图 10(b)是有 180 nm SiO<sub>2</sub> 的能带图. 由能带结构图 10(a)可见,折射率 1.0 的 light-cone 以内的模式要比图 10(b)的模式多,在相同的归一化频率范围内,图 10(b)的模式相对图 10(a)的模式向高频方向移动,而且泄漏模更密集一些. 说明有 180 nm SiO<sub>2</sub> 作为上包层的平板内的传导模少一些,提取到空气的泄漏模多些,即相应的提取效率高一些. 我们看到图 9 中 SiO<sub>2</sub> 为上包层的 InP 材料的测量到的荧光强度比没有 SiO<sub>2</sub> 时的要强,可能源于两个方面原因,其一即是 SiO<sub>2</sub> 层对 InP 材料起到保护,减缓了镓离子对有源材料的轰击损伤,使得出光效率比直接加工的光子晶体出光有很大提高;其二即如上面能带结构所分析,有 SiO<sub>2</sub> 为上包层的光子晶体结构使得 InGaAsP 量子阱材料中一些传导模被转换为泄漏模,提高了出光效率.

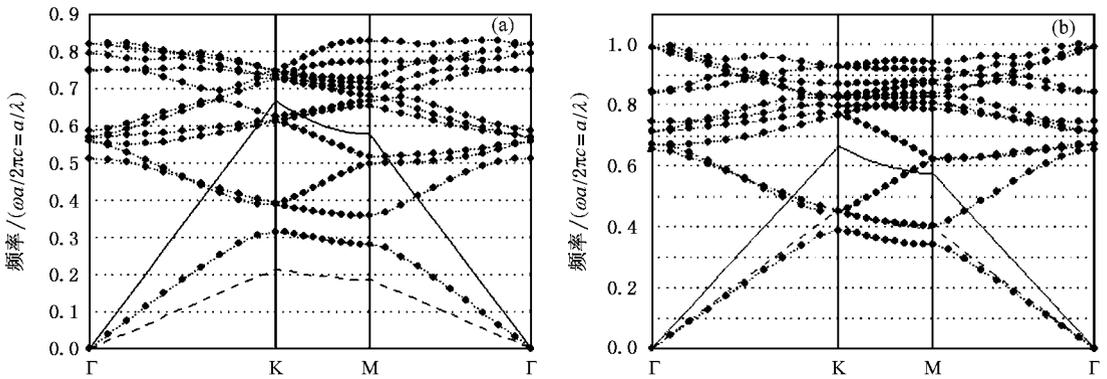


图 10 InP 材料光子晶体平板的能带结构 (a)对应图 5 光子晶体的能带结构,材料结构为:InP 衬底,1  $\mu\text{m}$  厚度的 InP 下包层,0.210  $\mu\text{m}$  厚度的 InGaAsP 波导层 (b)对应图 6 光子晶体的能带结构,材料结构为(a)的材料顶层加一层 0.18  $\mu\text{m}$  厚度的 SiO<sub>2</sub> 层

## 4. 结 论

利用 FIB 微加工设备,摸索了合适的微加工工艺方法,在多种半导体材料上加工了光子晶体. 结果表明,所加工的光子晶体质量良好. 利用所建立

的光子晶体测试系统初步测试出硅材料光子晶体带隙和 InP 量子阱材料上光子晶体结构的发光特性,测量结果和计算的光子晶体能带结构相符合. 研究表明,FIB 适合研制无源材料光子晶体,而加工有源材料后对其发光特性有所影响.

- [ 1 ] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [ 2 ] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [ 3 ] Cui Z 2005 *Nanofabrication technologies and applications* ( Beijing : Higher Education Press ) p148—p158
- [ 4 ] Wang K , Filloux P , Paraire N , Cabarocas P R , Bulkin P 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 966
- [ 5 ] Chelnokov A , Wang K , Rowson S , Garoche P R , Lourtioz J M 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2943
- [ 6 ] Tian J , Han S Z , Cheng B Y , Li Z Y , Feng S , Zhang D Z , Jin A Z 2005 *Acta 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 ]
- [ 7 ] Han S Z , Tian J , Ren C , Xu X S , Li Z Y , Cheng B Y , Zhang D Z 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1934
- [ 8 ] Cao J R , Lee P T , Choi S J *et al* 2002 *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** 618
- [ 9 ] Xu X S , Wang Y Q , Han S Z , Cheng B Y , Zhang D Z 2004 *Chin. Phys.* **13** 1474
- [ 10 ] Sugimoto Y , Ikeda N , Carlsson N , Asakawa K , Kawai N , Inoue K 2002 *IEEE J. of Quan. Elec.* **38** 760

## Fabrication of photonic crystal on semiconductor materials by using focused ion-beam<sup>\*</sup>

Xu Xing-Sheng<sup>1)†</sup> Xiong Zhi-Gang<sup>2)</sup> Jin Ai-Zi<sup>2)</sup> Chen Hong-Da<sup>1)</sup> Zhang Dao-Zhong<sup>2)</sup>

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

2  $\times$  Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

( Received 7 June 2006 ; revised manuscript received 18 September 2006 )

### Abstract

A method of manufacturing two-dimensional photonic crystals on several kinds of semiconductor materials in near infrared region by a focused ion beam is introduced , and the corresponding fabrication results are presented and show that the obtained parameters of fabricated photonic crystals are identical with the designed ones . Using the tunable laser source , the spectra of the fabricated passive photonic crystal and the active photonic crystal are measured . The experiment demonstrates that the focused ion-beam can be used to fabricate the perfect two-dimensional photonic crystals and their devices .

**Keywords** : focused ion beam , semiconductor material , photonic crystal

**PACC** : 4270Q , 4265K , 4225B

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60345008 , 60377011 , 60537010 ).

<sup>†</sup> E-mail : xsxu@red.semi.ac.cn