

二维光子晶体微加工方法的研究与进展

许兴胜 张道中

(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; 中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100080. E-mail: xsxu@red.semi.ac.cn)

摘要 光子晶体这类新型材料的出现使人们操纵和控制光子的梦想成为可能, 全光集成也将会因光子晶体的应用有突破性进展. 光子晶体集成能否实现将以光子晶体器件为基础, 因此首先要研究并实现将在光子集成上有很应用前景的半导体材料的各种有源和无源光子晶体器件. 二维光子晶体研制的最实用和最重要手段是微加工方法. 总结了近红外波段的二维光子晶体微加工方法, 包括电子束曝光、模板选用和干法刻蚀等, 并进行了评述和展望, 介绍了自己的工艺方法.

关键词 光子晶体 微加工方法 模板 电子束曝光 干法刻蚀 半导体材料

由于光子晶体带隙的存在, 人们可以通过设计和调节光子带隙达到控制光子运动的目的. 更重要的是, 人们可以在一块光子晶体芯片上将具有不同功能的光子器件集成起来, 整个集成器件的大小只有微米量级. 因此, 这类新型材料的出现使人们操纵和控制光子的梦想成为可能, 为信息技术走向“全光”时代打开了大门, 其重大意义可与当年半导体的发现相比拟. 经过近 20 年的发展, 国际上对光子晶体的研究已经从初期注重理论研究, 逐步转移到光子晶体应用理论与相应的光电子器件的设计和制备上来. 近年来, 科学家们提出了不少构造基于光子晶体的光电子器件的理论和方法, 而且相应的制备和测试技术也不断地进步. 1991 年 Yablonovitch 等人^[1]第一次在实验室人工制造了具有完全带隙的三维光子晶体; 1997 年麻省理工学院 Foresi 等人^[2]采用 X 射线制版和等离子体刻蚀方法研制成带微腔的一维光子晶体, 微腔的共振波长 1560 nm, 微腔品质因子 265; 1999 年加州理工大学 Painter 等人^[3]研制成功激光波长 1509 nm 的二维光子晶体微腔激光器; 2004 年 Park 等人^[4]采用电注入方法, 实现了利用中间微柱注入电流的光子晶体激光器, 波长为 1520 nm, Q 值达到 2500. 2000 年日本京都大学 Noda 等人^[5]在 InGaAsP 材料上研制成微腔和波导耦合的光子晶体滤波器, 微腔的共振波长为 1545 和 1566 nm; 2003 年 Noda 研究小组^[6]通过优化光子微腔的结构, 在实验上实现了 Q 值高达 45000 的微腔. 在面向实用化的近红外波段光子晶体器件的研究方面, 国内起步较晚, 最近两年才开始研究, 而国外 20 世纪 90 年代初就开始研究, 因此我们在加工工艺以及测试技术方面与国外还有差

距. 中国科学院半导体研究所建设的集成技术中心为光子晶体器件的研制提供了所需的关键技术加工设备, 中国科学院物理研究所和北京大学等单位也建设了相关微加工设备, 包括微纳米级图形的精密制版及纳米级图形的深尺寸的精密干法刻蚀等. 中国科学院物理研究所在国内最早开展了近红外波段光子晶体的研制工作^[7]. 中国科学院物理研究所和中国科学院半导体研究所已经开展了二维光子晶体和器件的微加工工艺的探索, 取得了较好的结果. 国外的光子晶体器件和光子晶体集成研究仍然处在实验室水平, 我们要利用好自身条件, 在国家的大力支持下, 找准方向, 重点攻关, 能够缩小与国外的差距, 并在某些方面迎头赶上国外研究水平.

1 光子晶体微加工方法

基于 Si, GaAs 和 InP 材料体系, 一般二维光子晶体微加工的工艺流程步骤如图 1, 主要包括^[8]: () 材料的准备, 利用 MOCVD 或 MBE 等方法制作适合做光子晶体的平板波导, 如 SOI (silicon-on-insulator) 材料; () 在材料表面利用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 方法生长一层 SiO_2 , 表面旋涂光刻胶 (电子束光刻胶); () 电子束曝光, 将设计好的图形定义在电子束胶上; () 利用 RIE 或 ICP 干法刻蚀技术, 将电子束胶上的图形转移到 SiO_2 层; () 去除电子束胶, 主要用丙酮和 SiCl_4 等溶剂; () 利用 ICP 干法刻蚀技术, 将 SiO_2 上的图形转移到波导层材料上; () 利用氢氟酸将表面剩余的 SiO_2 去除; () 湿法腐蚀掏空, 形成空气桥结构, 使波导上下包层折射率呈对称分布, 对光起到更好的限制.

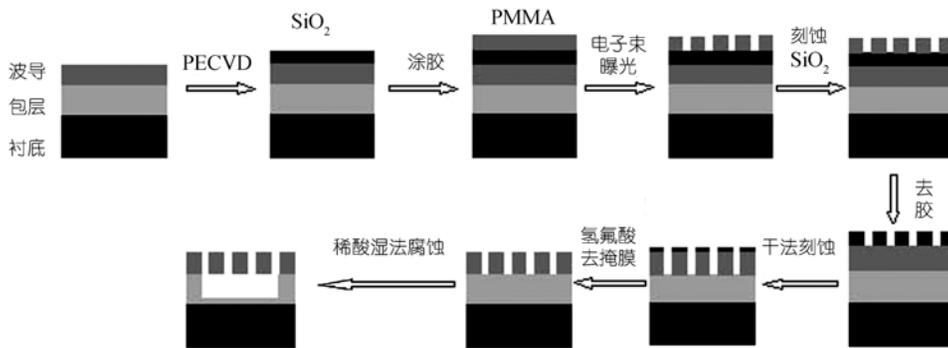


图1 在半导体薄膜上微加工二维光子晶体的一般过程
主要分为沉积 SiO₂ 层、电子束曝光、干法刻蚀和腐蚀牺牲层几个步骤

1.1 制版

在平板波导上制作的近红外波段二维光子晶体主要是利用制版方法定义光子晶体图案。考虑到较小的晶格常数(周期在 200~700 nm 范围, 并希望实现小于 100 nm 的特征尺寸), 通常的光刻方法制版已经不能满足要求, 流行的制版方法是电子束曝光制版 (EBL), 目前这种方法已经被广泛用于制作可见光和近红外波段的光子晶体。由于电子束的德布罗意波长小于 0.01 nm, 因此 EBL 技术不受衍射效应的影响, 可获得极高的分辨率和焦深, 线宽可以小于 10 nm, 它是用于加工纳米器件和纳米结构的主要方法。该方法制作的精度和质量除了主要由仪器本身的精度决定外, 还与实际操作中聚焦和调节像散的状态、曝光剂量、掩膜的质量、显影和定影时间等因素有关。该方法的主要步骤为: 利用甩胶机在样品表面涂敷一层合适厚度的电子束胶, 一般为聚合物 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯); 设计好版图和曝光剂量, 调节仪器状态, 进行曝光; 显影和定影; 烘烤坚膜, 完成在电子束光刻胶上制作光子晶体。我们利用 EBL 技术在 PMMA 电子束胶上摸索了定义光子晶体的工艺方法^[8]。目前国内有中国科学院物理研究所、中国科学院半导体研究所和中山大学等几家单位购买了德国 Raith 150 型高精度电子束曝光设备, 为加工光子晶体等纳米结构和器件提供了设备基础。

有的研究小组运用多光束全息法形成三角形图案制版方式, 制作二维周期结构, 还有深紫外曝光、X 射线曝光和电子束投影曝光等制版方法^[9]。

1.2 刻蚀

二维光子晶体最合适的结构是在半导体平板波

导上刻蚀一系列很小的深孔, 这需要高精度的深刻蚀或大选择比的刻蚀, 所以传统的湿法腐蚀已经不能满足要求。干法刻蚀方法是制作光子晶体最主要刻蚀方法。另外还有一些其他方法, 如垂直选择性氧化法^[9]、电化学方法^[10]、多孔硅方法^[11]和填充法 (building up)^[12]等。

() 干法刻蚀。干法刻蚀光子晶体的主要方法有化学辅助的离子束刻蚀 (CAIBE)、反应离子束刻蚀 (RIE)、电子回旋共振刻蚀 (ECR) 和感应耦合等离子体刻蚀 (ICP) 等, 其中 ICP 方法是 RIE 方法的升级, 可以实现快而深的刻蚀效果。这几种方法都可用来制作二维光子晶体, 而使用最多的还是 RIE 刻蚀方法。

刻蚀 GaAs/AlGaAs 的标准气体是氯气或氯化物, 如使用 SiCl₄ 或 Cl₂ 的 CAIBE 方法被认为是很好的干法刻蚀技术, 可以达到很大的宽深比 20:1 (直径 120 nm 的孔可以刻蚀约 2.5 μm 深度)。在 CAIBE 技术中, 准直的高能量束流轰击在样品上, 因而孔的陡直度很好并能大大减小用 RIE 刻蚀带来的滞后效应。Krauss 等人^[9]研制刻蚀 GaAs/AlGaAs 的标准过程是使用电子束在 PMMA 光刻胶 (约 200 nm 厚, 相对分子质量 350k) 上制版, 然后利用 SiCl₄ 气体辅助的 RIE 刻蚀将图形转移到 150 nm 厚的 SiO₂ 层, 得到的宽深比可达 8:1 (直径 100 nm 的孔可以刻蚀 600~800 nm 深度), 这足以保证波导结构在一般损耗情况下具有光子带隙效应。

InP 基的光子晶体可以在 CH₄/H₂ 或氯化物等离子体环境下刻蚀。尽管在 CH₄/H₂ 环境下能实现陡直的侧壁和非选择性刻蚀, 但这种方法如果以聚合物作掩模很难实现晶格常数 0.5 μm 以下尺寸的刻蚀。这个问题可以利用氯化物辅助刻蚀克服^[9]。

() 电化学刻蚀方法. 该方法可以制备二维光子晶体, 在 Si 和 Al 材料上可以获得很好的宽深比. Grüning 等人^[10]首先用它来制作光子晶体. 这种方法可做到孔的深度为 340 μm , 孔直径达 6.2 μm , 光子带隙在波长 40 μm 附近, 宽深比大于 50:1 的光子晶体的刻蚀, 优于通常的干法刻蚀的宽深比 10:1. 由于一般的化学方法只能产生 1~50 μm 的大孔, 因此该方法常用来制备大孔硅, 而且这种方法制备的大多数光子晶体的光子带隙在中红外和远红外区域. 带隙在可见光范围的光子晶体可以使用 Al 柱电极生长的方法实现, 这些柱子生长在以规则的、弧形窝状阵列为种子的材料表面. Masuda 等人^[13]利用此方法实现了周期 100 nm, 孔径 70 nm 的光子晶体, 且有很好的宽深比.

2 掩模板种类

成功实现刻蚀非常重要的因素之一是选择合适的掩模板. 要实现深刻蚀和高质量的图形刻蚀, 通常需要加一层介质模板转换层. 这一层(一般是 SiO_2 或 Si_3N_4)通常选用氟化物的等离子体刻蚀. 考虑到对光刻胶的腐蚀较小, 常用 CH_3 , CF_4 或 C_2F_6 等氟化物. 掩模越厚, 抗等离子体刻蚀时间越长, 则刻蚀到半导体中的深度越深; 掩模越薄, 光刻胶越薄, 所刻蚀图案的精度越高. 因此, 介质掩模板厚度的选择通常取折衷办法, 典型取值范围为 100~200 nm. 一般来说, 以上介质掩模板(SiO_2 或 Si_3N_4)的刻蚀速率为 15~20 nm/min.

Moosburger 等人^[14]发展并比较了加工二维光子晶体所用的三种掩模板, 分别为 Ti/Cr/Ti 的三层金属掩模、用于湿氧化的 AlAs 掩模和 SiO_2 掩模, 这对研制光子晶体过程中选择掩模具有重要的借鉴价值. 他们制作的光子晶体材料是采用分子束外延方法生长的 InGaAs/AlGaAs 量子阱有源材料. 光子晶体制作的总体方案为: 先在材料表面沉积一层选定的掩模(上述三种掩模之一), 然后在掩模上旋涂一层 500 nm 的 PMMA, 用工作电压为 100 kV 电子束制版方法定义二维光子晶体结构, 再采用干法刻蚀方法刻蚀二维光子晶体. 为了使二维光子晶体具有带隙特性, 需要刻穿整个波导层直到下包层.

2.1 Ti/Cr/Ti 三层金属掩模板

这种金属掩模技术使用三层金属掩模板, 从上至下的金属依次为 Ti(20 nm), Cr(100 nm)和 Ti(30 nm). 定义在 PMMA 上的二维光子晶体结构用 $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{Ar}$

刻蚀气体的 ECR-RIE 方法转移到 20 nm 的 Ti 层, 然后用 $\text{Cl}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ 混合气体刻蚀将其转移到 100 nm 的 Cr 层, 再用 $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{Ar}$ 等离子体刻蚀将其转移到 Cr 和半导体材料之间的 Ti 层(30 nm), 最后用 Cl_2/Ar 等离子体刻蚀方法将二维光子晶体结构刻蚀到半导体材料, 其典型的刻蚀深度可以达到 600 nm. 光子晶体刻蚀完成后要去掉小孔内的金属, 防止影响光学特性. 这种金属掩模板的优点在于比较持久耐用, 而且不依赖于所要刻蚀的半导体材料的种类, 缺点是过程复杂, 依赖于最佳的刻蚀速度, 刻蚀下层 Ti(30 nm)时一旦到达 AlGaAs 表面就必须停止刻蚀, 实际操作中往往由于最下一层 Ti 的不完全刻蚀使最后 AlGaAs 上的小孔呈圆锥形(如图 2(a)).

2.2 基于 AlAs 层的湿氧化掩模板

材料生长过程中, 在波导的上包层内嵌入一层 60 nm 厚的 AlAs. 先在材料表面上旋涂一层 PMMA (500 nm), 利用电子束曝光定义好的光子晶体结构, 用 Cl_2/Ar 混合气体干法刻蚀转移到 AlAs 层, 在其上打穿孔, 然后用湿氧化方法将 AlAs 层转化为 Al_2O_3 掩模板, 它能经受较长时间刻蚀, 以达到刻穿半导体波导层一直到下包层. 这种掩模板的优点是不需要制作其他附加掩模, 缺点是依赖于外延层材料的结构, 主要是 GaAs 基材料, 而不能使用其他材料, 并且稳定性较差, 其刻蚀效果如图 2(b).

Cheng 等人^[15]的工作也说明使用氧化的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Al_2O_3)作为掩模是个很好的选择. 他们观察到 Al 含量为 $x = 80\%$ 的 AlGaAs, 其耐刻蚀速率约为 3 nm/min, 相对于表面沉积的介质层掩模板(如 SiO_2 或 Si_3N_4)而言, 其耐刻蚀性有很可观的提高. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化是在 400~450 的热湿蒸汽下进行. 该氧化方法被广泛用于垂直腔面发射激光器(VCSEL)上制作氧化窗口. 氧化后, 可以在表面加一层薄金属层做掩模, 光子晶体转移到金属掩模上后, 利用干法刻蚀将金属层上的光子晶体转移到 Al_2O_3 层. 该方法提供了很好的掩模, 但这些附加工作比较繁琐, 每一步工艺都增加费用并减慢了研制进程.

2.3 SiO_2 掩模板

SiO_2 掩模为 100 nm 是较佳厚度, 在其上旋涂 PMMA 胶(500 nm)可直接转移图形, 而不需要任何中间掩模板, 如利用 CHF_3/Ar ECR-RIE 刻蚀方法可以将 PMMA 上定义的结构直接转移到 SiO_2 层上. 用

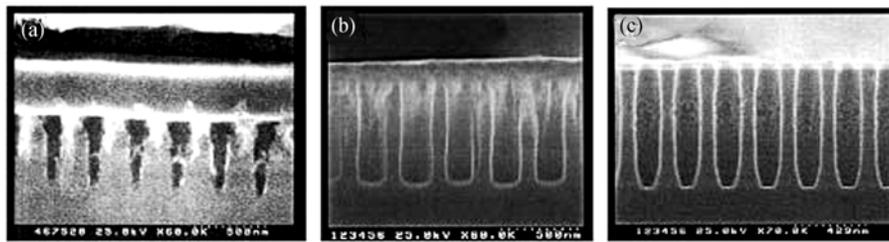


图2 不同掩模板的刻蚀光子晶体横切面效果图 [14]
 (a) 使用三层金属掩模板; (b) 使用 AlAs 湿氧化掩模板; (c) 使用 SiO₂ 掩模板

这种掩模板在 AlGaAs 材料上可获得质量很高的孔, 其深度可达 700 nm, 如图 2(c). 这种掩模板不依赖于所用材料的种类, 是目前使用最广泛的掩模板, 通常的厚度在 100~200 nm 范围 [16].

研究人员用前两种方法制作出了条形波导激光器 [14], 并测出了激光的斜率效率对二维光子晶体晶格常数的依赖关系, 给出了一些典型数据, 如使用第一种掩模板, 晶格常数为 350 nm, ΓK 方向的激光器, 阈值电流为 18 mA, 斜率效率为 0.17 W/A, 而且通过转移矩阵法计算了相应的反射谱. 结果还发现制作的孔质量越好, 实验结果和理论符合得就越好.

2.4 光刻胶掩模板

掩模的直接解决办法是使用光刻胶本身. 在干法刻蚀过程中, 光刻胶会很快地被刻蚀掉, 因此其刻蚀深度相当有限, 特别是要实现高精度图案时需要薄的光刻胶, 使用光刻胶直接做掩模将受到限制. Ryu 等人 [17] 发展了一种用 PMMA 胶作为刻蚀掩模板的方法. 首先在 InP/InGaAsP 晶片表面均匀涂上 100 nm 厚的 2% PMMA, 然后利用电子束曝光技术在其上定义二维光子晶体图案, 再使用 Ar 离子照射合适时间以固化 PMMA 胶. 这种固化的 PMMA 可作为干法刻蚀半导体材料很好的掩模板. CAIBE 刻蚀温度在 250 °C, 在 Ar 和 Cl₂ 环境下进行, 刻蚀速率达到 1 $\mu\text{m}/\text{min}$. 残留的 PMMA 可以使用氧等离子体去除. 最后, 用高选择性的 HCl 湿法腐蚀的方法使刻蚀了光子晶体图案的 InGaAsP 层与衬底的 InP 层隔离, 变为悬空结构, 加工步骤如图 3.

直接利用光刻胶作掩模同样可以在 Si, GaAs 和 GaN 半导体材料上利用干法刻蚀加工光子晶体, 胶的质量和胶的硬度是能否加工出高质量样品的关键因素. 中国科学院半导体研究所建设的基于 Si 材料和 III-V 族材料的 ICP 刻蚀设备, 都可以直接利用光刻胶作为掩模刻蚀上述几种材料.

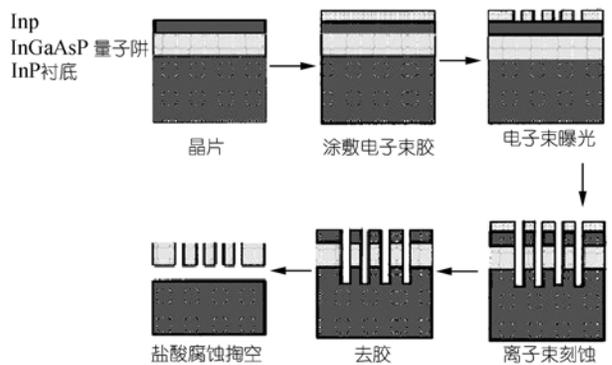


图3 以 PMMA 为掩模的 InP 材料光子晶体微加工过程 [17]
 依次为准备材料、旋涂 PMMA 胶、电子束直写、离子束刻蚀、去除 PMMA 胶和利用 HCl 湿法腐蚀掏空

3 基于不同半导体材料的微加工方法

3.1 Si 材料

目前在 Si 上研制的光子晶体多数在 SOI 材料上, 介于 Si 衬底和顶层 Si 之间的大于 1 μm 厚度的 SiO₂ 为下包层, 波导层 Si 厚度仅在 200 nm, 保证近红外光的单模条件. 该材料因为与传统 Si 工艺的兼容性而受到重视, 其制作步骤一般是先在顶层 Si 上制作一层 200 nm 左右的 SiO₂ 作掩模, 或蒸发一层金属如 Ni/Ti 等作掩模; 在 SiO₂ 掩模或金属掩模上甩一层电子束胶, 利用 EBL 方法在胶上定义光子晶体图形; 然后利用 CF₄ 反应离子刻蚀和 Ar 离子刻蚀 Ni/Ti 金属掩模, 而 SiO₂ 掩模可以利用 CHF₃/Ar 或 CH₄/H₂ 的反应离子刻蚀; 最后利用 CF₄ 和 Xe 刻蚀气体的 ICP (或 RIE) 干法刻蚀将图形转移到顶层 Si, 去掉掩模后, 完成光子晶体制作 [18].

Tokushima 等人 [19,20] 实验研究了高透过率、具有 120° 弯曲角度的二维光子晶体波导. 他们加工光子晶体方法如下: 通过热氧化方法在顶层 Si 上表面形成一层 150 nm 厚的 SiO₂, 然后在其上涂一层光刻胶, 用

多次曝光技术在光刻胶上形成三角形光子晶体结构,晶格常数和孔直径分别为 0.8 和 0.76 μm , 占空比达到 0.95. 接着用 CH_4 和 H_2 混合气体的反应离子束刻蚀将该结构转移到 SiO_2 掩模层上, SiO_2 层就可以充当刻蚀 Si 层的掩模. 再用氯氧混合刻蚀气体的电子回旋共振等离子体刻蚀将 SiO_2 掩模板上的结构刻蚀到 Si 层上. 他们测量了样品 ΓM 方向的反射谱, 光源用一带光纤探针头的光纤耦合到 Si 波导层, 反射光由同一光纤接收并引入光谱仪. 通过反射光和入射光强度之比及样品的反射系数, 得出光纤和样品耦合的能量损失约为 15dB, 并由反射谱得出带隙在 1.5~1.7 μm 范围, 带隙中心在 1.6 μm . 他们还使用一个 1.55 μm 的激光二极管测量波导的特性, 其输出功率为 -2dBm, 由一光纤微透镜耦合进入波导的一端, 另一端出射的近场光由一光纤探针扫描探测. 波导的总长度为 877 μm , 波导转角在光子晶体的中心位置, 两光纤的间距至少为 400 μm , 因此两路波导间不可能相互耦合. 探测到的光谱在波导的另一端口有一尖锐的峰, 说明入射光通过了波导. 测量结果说明制备的光子晶体是成功的.

3.2 InP 材料(含 InGaAsP 量子阱材料)

研制二维光子晶体的 InP 材料一般是厚度为 200~300 nm 的薄膜波导层. 这一波导层由金属气相沉积法生长. 薄膜层包括四层 1.2% 应变性的 InGaAsP 量子阱, 用 20 nm 左右的非应变 InGaAsP 垒层隔离. 该量子阱材料室温下光致发光光谱范围为 1400~1650 nm 附近. 在最后一层垒层上有 60 nm InP 保护层, 在刻蚀过程中起到保护量子阱结构的作用, 该层在样品制备成功后可被选择性去除. 材料准备好后, 掩模层沉积在样品表面, 较好的掩模由以下多层转移的掩模组成: 等离子体增强化学气相沉积法生长 160 nm 的 SiN_x 和 5 nm 的 Cr 及电子束蒸发法生长 45 nm 的 Au; 然后在 Au 掩模上旋涂 2% PMMA (100 nm). PMMA 由乙氧基乙醇(2-ethoxyethanol)和甲醇混合物以 3:7 的比例配比 50 s 而成. 三角晶格及方形晶格光子晶体由电子束制版法定义在 PMMA 上, 它们的晶格常数分别是 460 和 560 nm, 孔径和晶格常数的比率由 0.21 变化到 0.42. 电子束制版后, 光子晶体图案在离子束刻蚀设备上用 Ar 离子刻蚀转换到 Cr/Au 金属层中, 刻蚀时加速电压为 500 V. 带有图案的 Cr/Au 层再用 CF_4 反应离子束刻蚀方法转换到 SiN_x 层. 通过以上方法制备出精确牢固的 SiN_x 掩模板, 为

电子回旋共振 ECR 刻蚀作好准备. 随后利用 ECR 刻蚀将图形转移到半导体层, 深度为 400 nm. 使用的刻蚀气体为配比 38:24:12 的混合气体 $\text{CH}_4:\text{H}_2:\text{Ar}$, 射频功率为 300 W, 微波功率为 600 W. ECR 刻蚀完成后, 金属层被完全去除. 进一步在 RIE 设备上使用氧等离子体去除掉残留的聚合物, 这些残留物是由于 ECR 刻蚀过程中使用 CH_4 气体产生的. 在以上 ECR 和氧等离子体刻蚀中, 对 SiN_x 和 InP 的刻蚀选择比约为 1:6. 金属层去除后, 可再用 CF_4 等离子体 RIE 刻蚀去除 SiN_x 掩模板. 该方法可实现高质量图案和高垂直度的结构. 最后湿法腐蚀去除光子晶体薄膜下的 InP 层, 形成悬空结构, 同时去掉上层 60 nm 的 InP 盖帽层以形成平整的表面. 湿法腐蚀在 0 下 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 4:1$ 的冰水混合物中进行. 这一过程可使刻蚀的孔壁更光滑, 以减小由于孔壁粗糙造成的光学损耗. 这种湿法腐蚀是各向异性的, 这对光子晶体薄膜形成悬空结构非常重要. 如果开孔方向或光子晶体晶格取向不合适, 在孔较小的情况下很难实现悬空结构, 但有一种办法对各种取向的 InP 材料及各种晶格的光子晶体都适用, 即将多个光子晶体沿着材料晶向 $\langle 0, 1, -1 \rangle$ 方向排列, 间隔处刻蚀成大方孔. 这种方式开出的大窗口在湿法腐蚀掏空时不会形成腐蚀停止层, 光子晶体薄膜就可以通过这些大窗口进行化学腐蚀形成悬空结构. 10 min 内在几十个周期的光子晶体下方, V 字形的切口就形成了, 如图 4^[21].

Painter 等人^[21]制做并测试了二维光子晶体微腔激光器, 垂直方向为半波长厚度的高折射率平板波导, 通过平板和空气分界面上的全反射将光局限在平板之内, 水平方向上制作三角形晶格二维光子晶体微腔. 材料为 InGaAsP 量子阱, 这种量子阱材料的发射峰值波长为 1.5 μm , 用 MOCVD 方法生长在 InP 基底上, 有源区由 4 层 9 nm 厚 0.85% 应变的 InGaAsP 量子阱组成, 层与层间由 20 nm 的 InP 势垒隔开. 二维光子晶体结构是通过场发射显微镜改造的电子束制版设备上制版, 并用 Ar 离子刻蚀将该结构转移到金属掩模板上, 然后用反应离子束刻蚀将其转移到 SiN_x 掩模板上, 最后用 Cl_2 辅助的离子束刻蚀将掩模板上的结构刻到 InGaAsP 波导层上, 这样得到的空气孔穿透有源区域. 再将样品浸在 1 的 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (4:1) 溶液中, 腐蚀掉有源区下方的 InP 层, 使有源区成为一悬空的薄膜, 如图 5.

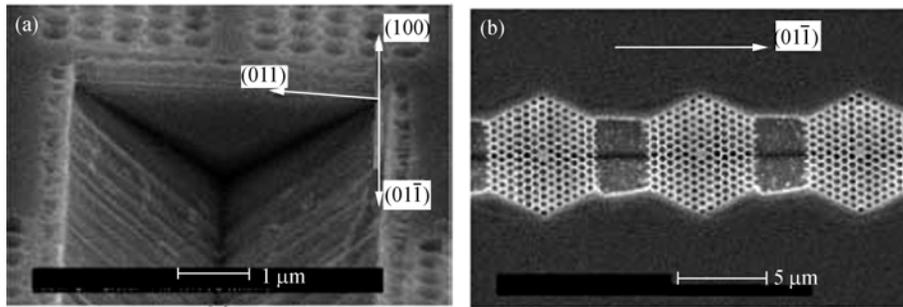


图 4 InGaAsP材料光子晶体微加工图 [21]

(a) 湿法腐蚀效果图; (b) 整体效果图. 腐蚀形成的楔形线沿 $\langle 0,1,-1 \rangle$ 方向, 不会形成腐蚀停止层

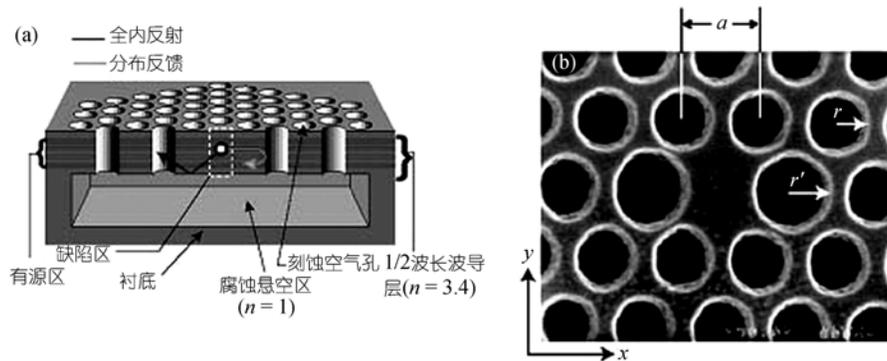


图 5 二维光子晶体激光器的水平视图(a)和垂直视图(b) [3]

光子晶体晶格常数为 515 nm, 孔径 $r = 180$ nm, 增大的两个孔孔径 $r' = 204$ nm

Loncar等人 [22]研制了另一种基于三角晶格光子晶体微腔激光器, 如图 6. 图中 P_i (i 为整数)为孔的拉伸系数. 所用材料与Painter类似, InP波导层厚度约 330 nm, 生长在 $1 \mu\text{m}$ 厚InP过渡层上. 掩模板为 40 nm的Au和 100 nm的SiON. 用电子束制版在 150 nm的PMMA上定义二维光子晶体的结构, 然后用Ar离子刻蚀将该结构转移到Au掩模板上, 再用 C_2F_6 反应离子束蚀刻将Au模板上的图形转移到SiON掩模板上, 用基于 Cl_2 的反应离子束将该结构刻蚀到InGaAsP上, 最后用氢氟酸去掉掩模板, 在 4 下用 4:1 的 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ 溶液腐蚀掉下包层, 得到悬空结构的平板二维光子晶体.

3.3 GaAs 材料

Yoshie等人 [23, 24]在GaAs平板上制作了三角形结构的二维光子晶体, 中间由半径较小的孔形成微腔, 将包含缺陷的中间排孔加工成椭圆形, 再将这一排孔向 y 正半轴或负半轴移动一点距离. 他们在 400 nm厚 $\text{Al}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}$ 上用分子束外延方法生长三层InAs量子阱材料, 并由 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ 覆盖, 然后再生长一

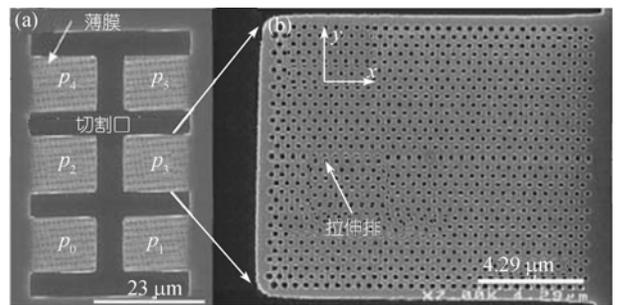


图 6 Loncar等人 [22]加工的 6 块不同拉伸系数样品

(a) 全视图; (b) 局部放大视图, 其中 $p_0 = 0, p_1 = 0.05a, p_2 = 0.1a, p_3 = 0.15a, p_4 = 0.2a, p_5 = 0.25a, a$ 为光子晶体晶格常数, $a = 435$ nm, 孔径 $r = 138$ nm

层 GaAs 保护材料. 用电子束在光刻胶上定义二维光子晶体, 再由 Cl_2 辅助的Ar离子束刻蚀将其转移并刻蚀到有源区波导层. 将其下方的 $\text{Al}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{As}$ 湿氧化成氧化铝, 最后用氢氧化钾溶液将氧化铝层全部腐蚀掉. 所得到的平板波导厚度为 240 nm, 晶格常数为 370 nm, 量子阱材料在室温下的辐射波长为 1240 nm. 他们加工了 4 种不同 p/a 值($p=0, 0.10a, 0.15a, 0.20a, p$ 为圆孔的拉伸系数, a 为晶格常数)的样品, 小

孔半径为 $0.28a \sim 0.29a$, 缺陷孔半径为 $0.20a \sim 0.23a$. 利用波长为 830 nm, 峰值功率为 1.4 mW 的激光聚焦成 $2 \mu\text{m}$ 的光斑泵浦光子晶体, 经测试微腔的光致发光光谱对 p/a 有依赖关系, 分别为 y 偏振和 x 偏振辐射模, 当 p/a 值为 0.20 时, Q 值达到最大值 2800, 与理论值符合得很好.

Moosburger 等人^[25]制备了光子晶体微腔和直波导的耦合器件, 并测量了透光谱. 波导结构为三角晶格光子晶体中间沿 ΓK 方向移去二排孔, 微腔由波导里改变一些小孔孔径形成, 并加工了 4 种结构的微腔. 在 240 nm 厚 GaAs 波导中埋入了 3 层 InAs 量子阱材料, 由它们的光致发光作为内嵌光源, 再在其上下两面分别加一层 300 nm 厚 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 和 400 nm 厚的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, 然后在样品表面溅镀一层 100 nm 厚的 SiO_2 作为掩模. 二维光子晶体结构由 100 kV 的电子束在 500 nm 厚的 PMMA 上制版, 然后由基于 CHF_3/Ar 气体的干法刻蚀将其转移到 SiO_2 层上, 再由基于 Cl_2/Ar 的电子回旋共振刻蚀将其转移到半导体材料上, 最后得到的小孔深度为 800 nm. 所加工的光子晶体晶格常数为 240 和 260 nm, 空气填充率为 30%, 这样的光子晶体对 TE(横向偏振电场分量) 波的带隙在 $0.21 < a/\lambda < 0.30$ 范围, a 为晶格常数, λ 为波长.

3.4 GaN 材料

GaN 材料作为研制白光 LED 和蓝光激光器的主要材料而受到人们的青睐. 由于 GaN 材料具有很高的热稳定性和化学稳定性, 通常很难用化学湿法腐蚀进行刻蚀, 常采用干法刻蚀. 所使用干法刻蚀的方法主要有 ICP 刻蚀、RIE 刻蚀、ECR 刻蚀、CAIBE 和 MIE 刻蚀等.

当光子晶体结构的尺寸比较小时, 可以采用电子束制版和 ICP 干法刻蚀进行制作, 晶格常数较大的晶体也可以采用普通光刻方法制版和干法刻蚀方法制作. 在 GaN 材料上刻蚀光子晶体结构一般采用图形逐层转移的方法, 具体如下: 先在 GaN 材料上生长一层 300 nm 厚的 SiO_2 , 在其上淀积 Au/Ni 作为掩模; 旋涂上合适厚度的 PMMA 胶, 电子束定义图形, 通过 Ar 离子刻蚀将图形转移到 Au/Ni 层上; 通过 C_2F_6 反应离子刻蚀, 将图形转移到 SiO_2 层上. 图形转移到 GaN 层上的操作可由 Cl_2 辅助的 CAIBE 刻蚀完成, 并使用 Xe 溅射离子束以提高刻蚀速率. 为了使刻蚀孔垂直和侧壁光滑, 将 GaN 置于 220 的温度, 局部供应 Cl_2 的环境下刻蚀, 刻蚀速率为 $0.6 \mu\text{m}/\text{min}$, 可以得到深

度大于 $1 \mu\text{m}$ 的孔(最大深度可达到 $1.5 \mu\text{m}$)^[26-28].

目前我们利用微加工设备摸索研制了光子晶体结构 GaN 发光二极管的工艺: () 直接利用聚焦离子束方法, 该方法不需要掩模板, 利用离子束直接刻蚀, 工艺方法简单; () 利用高精度光刻或电子束制版方法在光刻胶上定义光子晶体, 然后利用 ICP 刻蚀实现光子晶体结构. 利用低温快速刻蚀方法, 我们可以利用胶作掩模直接刻蚀光子晶体, 刻蚀气体是 BCl_3/Cl_2 . 我们前期也采用过在 GaN 材料表面生长 SiO_2 作为掩膜, 使用普通光学光刻的方法在光刻胶上形成图形, 并采用图形逐层转移的方法将图形最终转移到 GaN 材料上. 将图形转移到 SiO_2 层采用 RIE 刻蚀或 ICP 刻蚀, 而 GaN 的刻蚀则采用 ICP 刻蚀.

4 其他方法

以上主要介绍了基于半导体平面工艺的微加工方法加工二维光子晶体, 实际上还有一些其他方法, 比如多光束干涉方法、激光气相沉积法、压印方法、自组装方法和聚焦离子束刻蚀方法等^[29-31]. 这里简单介绍飞秒激光多光束干涉方法和聚焦离子束加工方法.

利用飞秒激光干涉法已经实现了一维、二维和三维近红外波段的光子晶体制作^[32,33]. 该方法利用衍射分束器将飞秒脉冲分为多束, 然后用两个透镜会聚叠加. 搭建的实验装置可实现较高的调整精度, 以实现飞秒脉冲的瞬态叠加^[32]. 他们采用二倍频的飞秒激光, 波长为 380 nm, 脉宽 80 fs, 重复频率 82 MHz, 一次照射制作, 照射功率约 $100 \mu\text{W}$, 时间 20 s. 使用材料一般为 SU-8 胶等聚合物材料, 聚合物薄膜厚度可达到 $25 \mu\text{m}$. 该材料激光照射后, 进行显影定影, 即可形成光子晶体结构, 制作出的光子晶体晶格常数为 700 nm^[32]. 该方法中很重要的元件是衍射分束器(DBS), 如型号为 G1029A DBS(MEMS Optical Inc) 可将一束激光分为 9 束, 通过选择不同角度的几束实现不同维度的光子晶体曝光: 选择两束可以实现一维光子晶体加工, 选择四束可以实现二维光子晶体加工, 而选择合适角度的六束激光并使之叠加干涉, 可以实现三维光子晶体. 该方法还可以实现双光子吸收的二维或三维微加工, 使加工精度更高^[32,33]. 日本研究小组^[34]利用 800 nm 的飞秒激光, 利用激光剥离方法在 SiO_2 薄膜上实现微结构光栅的制作, 实现光栅的最小晶格常数 430 nm, 谷深达 150~200 nm.

利用类似方法, Campbell等人^[35]用 355 nm YAG 激光在SU-8 胶上制成可以工作在可见光和近红外波段的三维光子晶体, 实现的最小特征尺寸为 50 nm. 同样利用 355 nm 激光多光束干涉法, Divliansky等人^[33]在SU-8 胶上制作了光子晶体掩模, 实现图形转移到电子束沉积的CdSe薄膜上, 在CdSe上刻蚀出光子晶体结构.

有的研究小组利用聚焦离子束方法研制三维光子晶体, 主要利用聚焦离子束及其工作平台可以灵活转动的特点, 在多孔硅上沿一定方向钻孔, 形成 Yabnovitch结构的三维光子晶体^[36]. 同时还利用聚焦离子束在多层膜材料上刻蚀一维槽和多层膜垂直相交的二维光子晶体结构, 光子晶体工作波长在近红外波段^[37].

美国、日本、德国和法国等多家公司生产聚焦离子束设备, 其中以美国的 FEI 公司的产品占主导地位. FEI 公司的 DB235 等 FIB 设备为离子束和电子束双束加工系统, 镱离子束能量在 1~30 kV 可调, 离子束流从 1 pA 到 20 nA 可调, 离子束最高分辨率为 4~5 nm, 具有刻蚀、修复和制作掩模等作用, 还可以沉积一些材料.

聚焦离子束用来刻蚀图形的最大优点是不需要掩模, 可以灵活控制, 还可以沿不同角度进行刻蚀. 但是它也有很大缺点: () 由离子束溅射出的材料会在样品上再沉积; () 镱离子刻蚀会在孔的侧壁有侧蚀作用, 其刻蚀孔的垂直度不高; () 镱离子对材料的污染会导致材料变性, 尤其对有源材料影响很严重. 经过探索, 目前人们已采取一些办法降低这些缺点对加工结果的影响^[37].

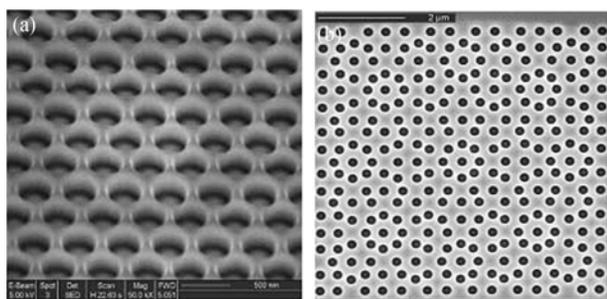


图7 利用 FIB 方法加工的三角晶格光子晶体(a), $a = 500$ nm, $r = 200$ nm 和利用 FIB 方法加工的 8 重准晶光子晶体 (b), 方形边长为 400 nm, $r = 130$ nm

我们在国内首先利用聚焦离子束方法在多种半导体材料上制作了可见光和近红外波段二维光子晶

体, 并测试了其光学特性^[7,38]. 实验表明聚焦离子束可以加工出较高质量的二维光子晶体, 加工的无源光子晶体光学特性较好, 但加工的有源材料会降低材料的发光效率, 图 7 为我们制作的光子晶体扫描电子束照片.

5 研究展望

光子晶体器件的研究目前还处在实验室研究阶段, 光子晶体概念的提出不到 20 年时间, 关于光子晶体及光子晶体器件应用的研究方兴未艾. 由于光子晶体、波导和微腔的特殊性能, 预示着其在光子集成等方面有非常广阔的应用前景. 很多应用如自发辐射的控制、零阈值激光器及大角度弯曲波导等都可以通过光子带隙或人工引入缺陷实现. 二维和三维光子晶体由于它们对光子很好的控制作用将在光学芯片、功能器件及光子集成方面有潜在的应用价值. 光子集成是光子晶体发展的一个重大方向, 光子集成也将会因光子晶体的应用有突破性进展, 而光子晶体集成能否实现是以光子晶体器件为基础的. 能否推动光子晶体及其器件走向实用化, 主要取决于微加工工艺, 由于工艺和理论设计方面的困难, 目前国外的光子晶体集成方面的研究进展也较缓慢. 在这方面进行前沿探索研究对我国在未来光时代的光子集成领域占据一席之地, 对推动国民经济的发展和国防建设都有重要意义. 我们首先要研究并实现将来会在光子集成上有很应用前景的半导体材料的各种有源和无源光子晶体器件, 然后在此基础上向着光子晶体集成光路的目标迈进, 这将对实现我国在光子集成方面有自主知识产权的关键器件和集成光路发展有重要意义.

国内光子晶体的实验研究起步较晚, 目前有条件开展微加工方法研制光子晶体的单位只有几家, 而国外自从光子晶体概念提出即开始这方面的实验研究, 日本、美国和欧洲等国有很好的半导体工艺线, 为光子晶体研究提供了设备基础, 所以我们要认识到这方面的差距, 承认不足, 不可能在短时间内赶上国外水平, 但也不能无所作为, 我们要找准方向, 根据自身的特点和条件, 努力创新, 争取有所为, 有所不为. 目前国内几家研究单位还处在摸索工艺阶段, 落后国外近十年时间, 但国家对光子晶体实验研究很重视, 国家重点基础研究发展计划、国家高技术研究发展计划和国家自然科学基金都大力支持. 我们建议

主要从以下方面开展工作:

第一, 利用国内现有条件, 继续摸索并掌握加工可见光波段和近红外波段光子晶体的工艺技术和测试技术, 重点探索电子束曝光和干法刻蚀制作光子晶体及微腔、波导等工艺方法, 在孔的质量和深度方面多做探索, 做好技术储备. 光子晶体光学特性表征方面重点要建设无源光子晶体平板(photonic crystal slab)的测试设备, 探索并掌握测试方法.

第二, 重点研究基本的光子晶体器件, 主要是光子晶体微腔激光器和波导. 目前国外实验上实现了半导体光子晶体激光器、光子晶体波导、波分复用器、调制器和滤波器等器件, 并对光子晶体有源器件与光子晶体波导耦合集成方面进行了探索性研究, 其中最重要和最基本的是光子晶体微腔激光器和光子晶体波导, 其他器件都可以由这两者组合. 为了以后在光子集成方面有所作为, 我们应该在这两种器件上打好基础, 其他的器件可以在此之后研究.

第三, 在器件的研究基础方面, 应在光子晶体有源器件和无源器件相互耦合集成方面做一些研究, 探索一些光子集成的新方法、新工艺和新概念, 进行集成方面研究, 其中光子晶体微腔激光器阵列和光子晶体波分复用器是非常值得重视的光子晶体集成器件.

第四, 应结合国内在半导体材料和设备等方面的条件和特点开展研究工作, 比如国内的 InP 和 GaAs 材料有很好的基础, 这两种材料既可以做有源的光源和探测器, 又可以做光波导, 有利于光子晶体的微纳米尺度的光子集成.

另外, 还可利用光子晶体结合量子点材料, 尤其是 GaAs 基量子点做单光子光源方面的研究. 光子晶体研究发展态势为我们提供了良好的机遇, 应在已有的研究基础上, 利用现有条件, 把握机遇, 努力创新, 为光子晶体实现光子集成的发展作出贡献, 因此, 本文对几种主要半导体材料微加工光子晶体的工艺方法进行了总结和评述, 希望对我们进行半导体材料光子晶体研制有一定的借鉴作用.

致谢 本工作受国家自然科学基金项目(批准号: 60345008, 60377011, 60537010)资助.

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E, Gmitter T M, Leung K M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(17): 2295—2298 [\[DOI\]](#)
- 2 Foresi J S, Villeneuve P R, Ferrera J, et al. Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides. *Nature*, 1997, 390(13): 143—145 [\[DOI\]](#)
- 3 Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. *Science*, 1999, 284(11): 1819—1821 [\[DOI\]](#)
- 4 Park H G, Kim S H, Kwon S H, et al. Electrically driven single-cell photonic crystal laser. *Science*, 2004, 305(3): 1444—1447 [\[DOI\]](#)
- 5 Noda S, Chutinan A, Imada M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure. *Nature*, 2000, 407(5): 608—610 [\[DOI\]](#)
- 6 Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. *Nature*, 2003, 425(30): 944—947 [\[DOI\]](#)
- 7 许兴胜, 韩守振, 程丙英, 等. 近红外波段二维光子晶体微加工. *量子电子学报*, 2004, 21: 112
- 8 许兴胜, 熊志刚, 孙增辉, 等. 半导体量子阱材料微加工光子晶体的光学特性. *物理学报*, 2006, 55(3): 237—241
- 9 Krauss T F, Rue R M. Photonic crystals in the optical regime—past, present and future. *Prog Quant Electron*, 1999, 23(2): 51—96 [\[DOI\]](#)
- 10 Grüning U, Lehmann V, Engelhardt C M. Two-dimensional infrared photonic band gap structure based on porous silicon. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(24): 3254—3256 [\[DOI\]](#)
- 11 Buda F, Kohano J. Porous silicon: A silicon structure with new optical properties. *Prog Quant Electron*, 1994, 18(3): 201—226 [\[DOI\]](#)
- 12 Kawakami S, Kawashima T, Sato T. Mechanism of shape formation of three-dimensional periodic nanostructures by bias sputtering. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(3): 463—465 [\[DOI\]](#)
- 13 Masuda H, Yamada H, Satoh M, et al. Highly ordered nanochannel-array architecture in anodic alumina. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(19): 2770—2772 [\[DOI\]](#)
- 14 Moosburger J, Happ T, Kamp M, et al. Nanofabrication techniques for lasers with two-dimensional photonic crystal mirrors. *J Vac Sci Technol B*, 2000, 18(6): 3501—3504 [\[DOI\]](#)
- 15 Cheng C C, Scherer A, Tyan R C, et al. New fabrication techniques for high quality photonic crystals. *J Vac Sci Technol B*, 1997, 15(6): 2764—2767 [\[DOI\]](#)
- 16 Happ T D, Markard A, Kamp M, et al. Nanofabrication of two-dimensional photonic crystal mirrors for 1.5 μm short cavity lasers. *J Vac Sci Technol B*, 2001, 19(6): 2775—2778 [\[DOI\]](#)
- 17 Ryu H Y, Kim S H, Park H G, et al. Characteristics of single defect laser modes in a two-dimensional square lattice photonic crystal slab. *J Appl Phys*, 2003, 93(2): 831—837 [\[DOI\]](#)
- 18 Baba T, Motegi A, Iwai T, et al. Light propagation Characteristics of straight single-line-defect waveguides in photonic crystal slabs fabricated into a silicon-on-insulator substrate. *IEEE J Quantum Elect*, 2002, 38(7): 743—752 [\[DOI\]](#)
- 19 Tokushima M, Yamada H. Light propagation in a photonic-crystal-

- slab line-defect waveguide. *IEEE J Quantum Elect*, 2002, 38(7): 753—759 [\[DOI\]](#)
- 20 Tokushima M, Kosaka H, Tomita A, et al. Lightwave propagation through a 120° sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(8): 952—954 [\[DOI\]](#)
- 21 Cao J R, Lee P T, Choi S J. Nanofabrication of photonic crystal membrane lasers. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(2): 618—621 [\[DOI\]](#)
- 22 Loncar M, Yoshie T, Scherer A, et al. Low-threshold photonic crystal laser. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(15): 2680—2682 [\[DOI\]](#)
- 23 Yoshie T, Vuckovic J, Scherer A, et al. High quality two-dimensional photonic crystal slab cavities. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(26): 4289—4291 [\[DOI\]](#)
- 24 Rapin D J, Lim K Y, Petrich G S, et al. Photonic band gap air-bridge microcavity resonances in GaAs/Al₂O₃ waveguides. *J Appl Phys*, 2000, 87(3): 1578—1580 [\[DOI\]](#)
- 25 Moosburger J, Kamp M, Forchel A, et al. Transmission spectroscopy of photonic crystal based waveguides with resonant cavities. *J Appl Phys*, 2002, 91(8): 4791—4794 [\[DOI\]](#)
- 26 Shatalov M, Zhang J, Chitnis A S, et al. Deep ultraviolet light-emitting diodes using quaternary AlInGaN multiple quantum wells. *IEEE J Sel Top Quant*, 2002, 8(2): 302—309 [\[DOI\]](#)
- 27 Ting G Z, Jonathan C D, Uttiya C, et al. AlGaIn-GaN UV light-emitting diodes grown on SiC by metal-organic chemical vapor deposition. *IEEE J Sel Top Quant*, 2002, 8(2): 298—301 [\[DOI\]](#)
- 28 Oder T N, Kim K H, Lin J Y, et al. III-nitride blue and ultraviolet photonic crystal light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(4): 466—468 [\[DOI\]](#)
- 29 Wanke M C, Lehmann O, Muller K, et al. Laser rapid prototyping of photonic band-gap microstructures. *Science*, 1997, 275(5304): 1284—1286 [\[DOI\]](#)
- 30 Masuda H, Yamada H, Satoh M, et al. Highly ordered nanochannel-array architecture in anodic alumina. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(19): 2770—2772 [\[DOI\]](#)
- 31 Schueller O J A, Whitesides G M, Rogers J A, et al. Fabrication of photonic crystal lasers by nanomolding of solgel glasses. *Appl Optics*, 1999, 38(27): 5799—5802
- 32 Kondo T, Matsuo S, Juodkazis S, et al. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(6): 725—727 [\[DOI\]](#)
- 33 Divliansky I B, Shishido A, Khoo I C, et al. Fabrication of two-dimensional photonic crystals using interference lithography and electrodeposition of CdSe. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(21): 3392—3394 [\[DOI\]](#)
- 34 Kawamura K, Sarukura N, Hirano M, et al. Holographic encoding of fine-pitched micrograting structures in amorphous SiO₂ thin films on silicon by a single femtosecond laser pulse. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(8): 1038—1040 [\[DOI\]](#)
- 35 Campbell M, Sharp D N, Harrison M T, et al. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography. *Nature*, 2000, 404(2): 53—56 [\[DOI\]](#)
- 36 Wang K, Filloux P, Paraire N, et al. Two-dimensional photonic crystals by focused-ion-beam etching of multilayer membranes. *J Vac Sci Technol B*, 2003, 21(3): 966—969 [\[DOI\]](#)
- 37 Chelnokov A, Wang K, Rowson S, et al. Near-infrared Yablono-vite-like photonic crystals by focused-ion-beam etching of macroporous silicon. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(17): 2943—2945 [\[DOI\]](#)
- 38 Han S Z, Tian J, Ren C, et al. A Y-branch photonic crystal slab waveguide with an ultrashort interport interval. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(8): 1934—1936 [\[DOI\]](#)

(2006-04-25 收稿, 2006-08-27 接受)