

感应耦合等离子体刻蚀 InP/InGaAsP 二维光子晶体结构的研究

马小涛¹⁾ 郑婉华^{1)†} 任 刚¹⁾ 樊中朝²⁾ 陈良惠¹⁾

1) 纳米光电子实验室, 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

2) 半导体集成技术工程研究中心, 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2006 年 5 月 31 日收到, 2006 年 7 月 4 日收到修改稿)

为实现基于 InP/InGaAsP 材料的二维光子晶体结构低损伤、高各向异性的干法刻蚀, 研究了对 InP 材料基于 Cl_2/BCl_3 气体的感应耦合等离子体刻蚀. 从等离子体轰击使衬底升温的角度分析了刻蚀机理, 发现离子轰击加热引起的侧蚀与物理溅射在侧壁再沉积之间处于平衡时可以得到高各向异性刻蚀, 平衡点将随 ICP 功率增高而向偏压减小方向移动, 从而在近 203 V 偏压下得到陡直的侧壁. 在优化气体组分后, 成功实现了光子晶体结构高各向异性的低偏压刻蚀.

关键词: 光子晶体, InP/InGaAsP, 感应耦合等离子体, Cl_2/BCl_3 , 低偏压刻蚀

PACC: 5240H, 5275, 4270Q

1. 引 言

近年来, 光子晶体^[1]因其对光子有很强的控制作用而日益激起人们的研究兴趣. 其中, 具有周期排列的空气孔结构的二维光子晶体薄板备受关注, 因为这种结构容易通过电子束曝光和干法刻蚀工艺在半导体材料上得到, 同时, 通过调节空气孔结构能实现薄板型光无源^[2]和有源器件^[3]的集成, 为光子集成提供了潜在的发展空间. InP 是非常重要的半导体材料, 有很高的电子迁移率, 它的四元化合物 InGaAsP 的禁带对应于 1.3—1.55 μm 的通讯波段, 并且有相对低的表面复合率, 在光子晶体有源器件中得到广泛应用. 在基于 InP/InGaAsP 材料的光子晶体有源器件中, 空气孔直径通常在 200—400 nm 之间, 孔间距在 500 nm 左右, 为减少光子散射损耗, 要求侧壁陡直, 而为了减轻刻蚀对有源层的损伤, 还要求离子能量尽可能低, 这些要求使得 InP/InGaAsP 光子晶体结构刻蚀一直是工艺中的难点.

感应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术可以在低压下以低功率获得高密度的等离子体, 能够独立地调节等离子体的密度和能量, 并且有相对简单的结构,

在科研和生产中受到重视. 本文报道了采用 Cl_2/BCl_3 组合气体在略高于常温条件下对 InP/InGaAsP 材料的感应耦合等离子体刻蚀, 实现了纳米结构下周期分布的光子晶体结构. 采用 Cl 基气体刻蚀 InP 器件避免了 CH_4 基气体刻蚀中容易在表面形成氧化物^[4]或聚合物沉淀^[5]的问题, 但是 InP 材料与 Cl 基等离子体反应时生成难挥发的 InCl_x , 在低温下阻止化学反应的进行, 因而在低温刻蚀时通常采用 Ar 的比例超过 80% 的 Cl 基组合气体^[6], 通过增强物理轰击达到溅射去除 InCl_x 的效果. BCl_3 的离化产物含有大量的 BCl_3^+ 和 $\text{BCl}_2^{+[7,8]}$, 质量大于 Ar^+ , 能够以更低的离子能量达到相同溅射产额^[9], 有助于实现低损伤的刻蚀. 而且 Cl 基气体中加入 BCl_3 后可以有效去除等离子体中的 $\text{O}^{[10,11]}$, 改善表面形貌. 实现光子晶体结构的关键是高各向异性的刻蚀, 因此在文中着重讨论了 InP 材料刻蚀时等离子体能量和等离子体通量的改变对样品形貌的影响. 离子轰击加热与物理溅射再沉积是决定侧壁陡直度的主要因素, 可以通过降低等离子体能量和提高等离子体通量来达到平衡, 从而在低偏压下实现了光子晶体结构高各向异性的刻蚀.

† 通讯联系人. E-mail: whzheng@red.semi.ac.cn

2. ICP 系统及实验设置

InP 材料的刻蚀在 Oxford Plasma System100 ICP 刻蚀设备上实现,图 1 是该 ICP 的结构示意图. ICP 系统有两套独立的射频 (RF) 源,都工作在 13.56 MHz,一套 RF 源驱动缠绕在腔室外面的线圈,通过电感耦合作用在腔室内生成等离子体,另一套 RF 源通过匹配

电路产生对衬底电极的偏压,可以增强等离子体的定向运动. 在这套系统中,我们可控制的参数有衬底电极温度、气体的流量及组份、腔室内的压力、电感耦合 RF 源功率和偏压 RF 源功率,下面我们将电感耦合 RF 源功率和偏压 RF 源功率分别简称为 ICP 功率和 RF 功率. 在实验中衬底电极温度保持在 60 °C,这接近可调节的最高温度. 腔室压力保持在 0.533 Pa. 偏压通过 ICP 系统中的电子探针测得.

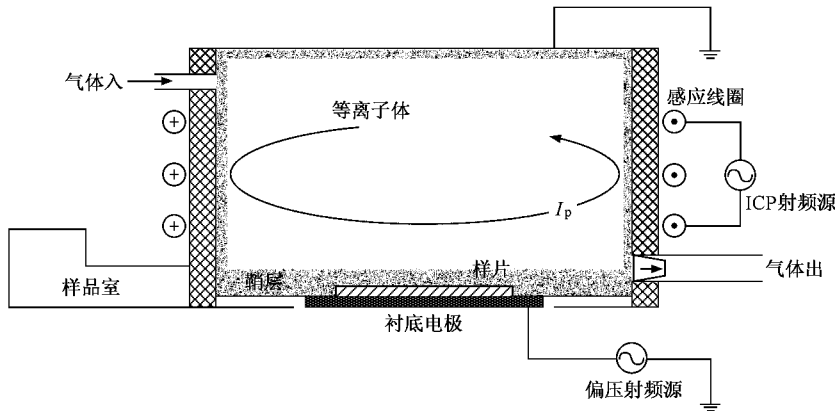


图 1 ICP 刻蚀系统原理

实验用样品为利用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 生长的多层 InGaAsP 量子阱结构,然后通过等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 生长 200 nm 厚的 SiO₂ 掩膜层. 样品的形貌采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察.

3. 结果及讨论

3.1. InP 材料的各向异性刻蚀

微纳尺度光子晶体结构刻蚀前,我们首先对 InP 材料的 ICP 刻蚀进行了研究. 利用光学曝光和湿法腐蚀工艺在掩膜层得到图形. 由于 ICP 刻蚀实际表现为具有一定组份、一定能量和一定通量的粒子与刻蚀材料的相互作用过程,我们将刻蚀气体 Cl₂ 与 BCl₃ 的流速分别保持在 10 和 25 cm³/min,这样当 ICP 功率在较小范围内变化时可以认为等离子体的组份不变,就能够方便地通过调节 ICP 功率和 RF 功率来研究等离子体能量和通量对形貌的影响. 等离子体通量与 ICP 功率成正比关系^[12],而在 0.533 Pa 的低压下等离子体在鞘层中的碰撞可以忽略不计,等离子体能量与偏压也可近似地认为成正比

关系.

实验中 ICP 功率分别取 600, 650 和 700 W 三个值,而 RF 功率为 150, 170 和 190 W,这使得偏压在 350—470 V 之间变化. 按上述设置对 9 个样品进行刻蚀,每次刻蚀时间为 120 s. 平均刻蚀速率与偏压的函数关系如图 2 所示,随偏压增大刻蚀速率呈现饱和趋势. 这组实验的结果主要表现出各向同性刻蚀特征,图 3 是典型的刻蚀形貌. 侧蚀深度随偏压和 ICP 功率变化而有改变,图 4 为侧蚀深度与偏压和 ICP 功率的函数关系,从图中可见在 ICP 功率一定时,随偏压的增大,侧蚀深度先是增加,接着表现出下降的趋势. 为说明这种现象,下面我们从离子轰击加热的角度作出定性分析.

InP 刻蚀中刻蚀速率主要受限于 InCl_x 的去除并与衬底温度关系密切. 在等离子体通量保持不变时,更高能量的离子轰击得到更高的热平衡温度^[13],但是在温度达到 200 °C 以后,InCl_x 的脱附达到稳定^[14],因此我们在图 2 看到 ICP 功率保持不变时,刻蚀速率出现增加到饱和的变化. 而更高的 ICP 功率不仅能升到更高的热平衡温度,而且有更大通量的等离子体轰击增强物理刻蚀,因而 ICP 功率增大,刻蚀速率曲线将整体上移.

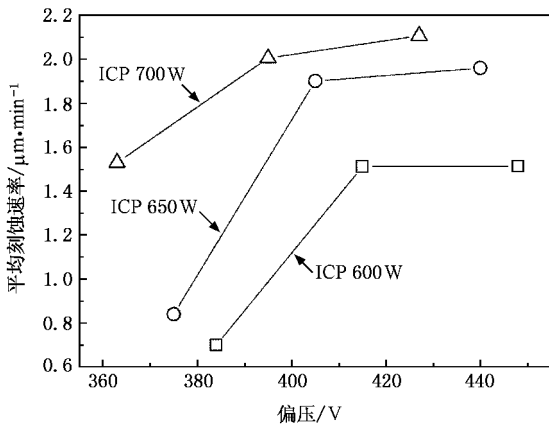


图 2 刻蚀速率与偏压的函数关系

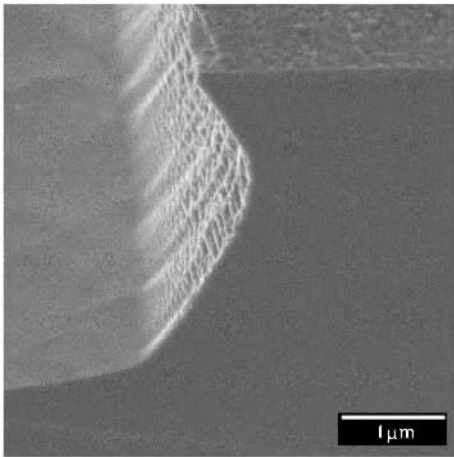


图 3 ICP 刻蚀结果 ICP 功率为 650 W ;RF 功率为 170 W

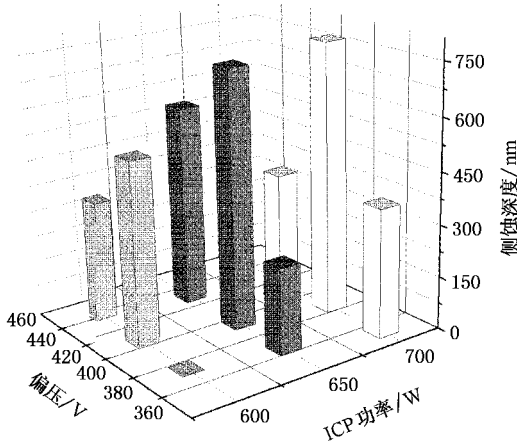


图 4 侧向腐蚀深度与偏压和 ICP 功率的关系

在衬底温度升高后,侧蚀也将增强。侧蚀的原因可能是附着在侧壁的等离子体所形成,但更大可

能是腔室内中性粒子扩散所导致的,因为 Cl_2/BCl_3 气体的离化产物^[8,15]中中性粒子密度比离子密度高出两个数量级。因此在刻蚀持续一定时间后,侧壁的形貌将是溅射产物在侧壁再沉积引起的钝化与化学反应横向侧蚀相互竞争的结果,显然侧蚀速率大于再沉积速率时将使刻蚀表现出各向同性,而两者平衡时会得到近乎陡直的侧壁。在物理刻蚀中,再沉积速率正比于溅射产额和等离子体通量的乘积^[16],而根据溅射理论^[9],溅射产额与离子能量 E 的关系可以表示为 溅射产额 $\propto E^{0.4-0.6}$,在定性分析中不妨近似认为再沉积速率随偏压增大按平方根的关系增加。横向侧蚀的情况相对复杂,当 ICP 功率保持不变,样品在热平衡时的温度随偏压的增大而升高,这使得侧蚀速率也增加,但由 $InCl_x$ 的脱附速率在 200 °C 后达到稳定的情况,我们可以推测侧蚀速率在偏压增大到一定程度以后达到饱和。由以上分析,侧蚀速率与再沉积速率随偏压变化的关系可以近似地以图 5 来说明。对于图 4 中 ICP 功率为 600 W 的情形,如果认为三次刻蚀时偏压分别对应于图 5 中的 A、B 和 C 点附近,实验结果就能得到合理的解释。对于 ICP 功率更大的情形,首先离子能量的增加会使再沉积速率曲线升高,其次等离子体通量的增加使样品在较低的偏压下就能够很快升到足够高的温度,并且与侧壁反应的粒子增多,这都使侧蚀曲线向低偏压方向移动,因此侧蚀深度的变化趋势与 600 W 的情形相同,但同在 360 V 的偏压附近却不能得到高各向异性的刻蚀。由此,我们也可以推测在 ICP 功率增大时侧蚀速率与再沉积速率的平衡点将在更低的偏压下得到,并在图 5 中以虚线标示出平衡点可能的位置。

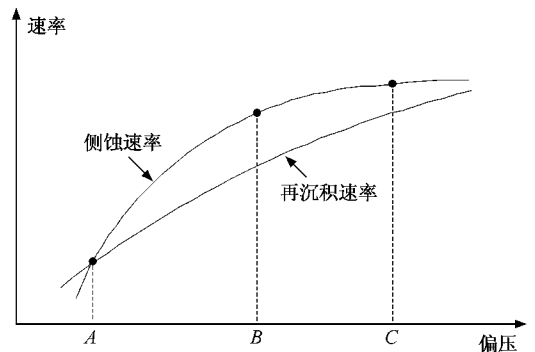


图 5 本图定性说明在 ICP 功率保持不变时侧蚀速率和再沉积速率与偏压的关系

根据上面的分析,通过微调刻蚀参数,我们很快

得到了 ICP 功率为 630 W 时的各向异性刻蚀,如图 6,对应偏压约为 350 V. 在有源材料的干法刻蚀中,通常希望有尽可能小的离子能量以减小刻蚀造成的损伤. 为得到偏压为 200 V 附近的刻蚀,按照前面分析给出的平衡点发展趋势,我们将 ICP 功率增大到 750 W,同时减小 RF 功率到 60 W 附近,在偏压为 203 V 时实现了陡直的侧壁,如图 7.

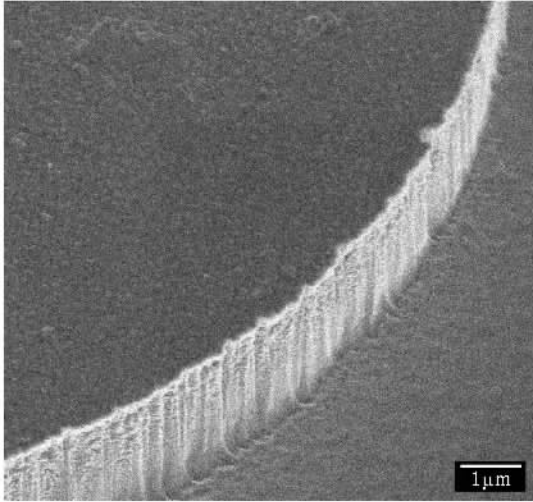


图 6 ICP 功率为 630 W,偏压约 350 V 时刻蚀结果

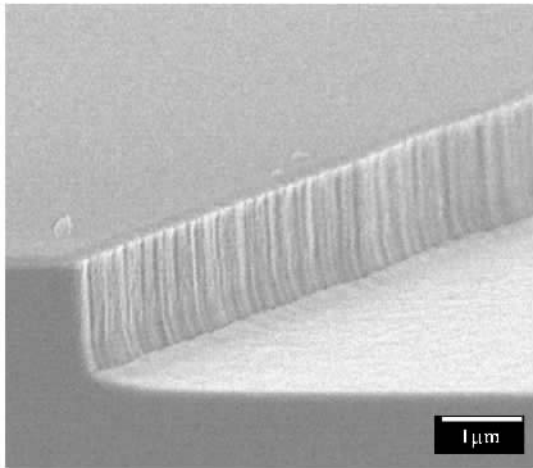


图 7 ICP 功率为 750 W,偏压为 203 V 时刻蚀结果

3.2. 微纳尺度光子晶体结构的刻蚀

利用 InP 体材料的 ICP 刻蚀结果,我们进行了微纳尺度光子晶体结构的刻蚀. 一组三角晶格空气孔型光子晶体的孔直径为 200—300 nm,孔间距在 400—500 nm 之间. 先利用电子束曝光在 PMMA 光刻胶上得到光子晶体图形,接着通过采用 C_4F_8 气体

的 ICP 刻蚀将图形转移到 SiO_2 掩膜上,PMMA 残胶在图形转移后通过等离子去胶机去除.

在直接利用 ICP 功率 750 W,偏压 203 V 的参数对光子晶体结构进行刻蚀时并没有得到陡直的圆孔,侧蚀现象很明显. 我们认为光子晶体是一种多孔结构,热传导性能比体材料差,在相同刻蚀条件下能更快的升到更高的温度,因此刻蚀的平衡点将进一步向低偏压方向移动. 由于 RF 功率已经相当低,刻蚀结果对 RF 功率变化比较敏感,我们通过调节气体组分以实现刻蚀条件的优化. 当 Cl_2/BCl_3 气体中 BCl_3 成分较多时,继续提高 BCl_3 的比例会使等离子体中 BCl_3^+ 和 BCl_2^+ 的浓度升高^[7,8],而其他粒子的浓度基本保持不变,这样再沉积速率将增大,就有可能在 RF 功率不变时得到偏压和平衡点的匹配. 最终在 Cl_2 和 BCl_3 的流速分别为 5 和 30 cm^3/min 时,我们得到高各向异性的光子晶体结构刻蚀,图 8 给出了 SEM 照片.

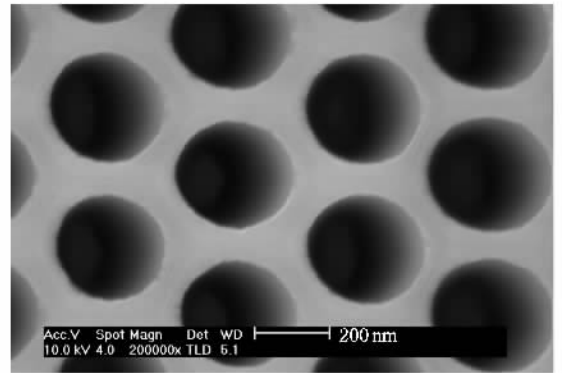


图 8 调整气体组分后,在偏压为 203 V 刻蚀得到的光子晶体结构

4. 结 论

在百纳米级的二维光子晶体有源器件制作中,低损伤、高各向异性的干法刻蚀是关键工艺. 为得到光子晶体结构刻蚀所需的条件,我们从等离子体轰击使衬底升温的角度分析了基于 Cl_2/BCl_3 气体的 InP/InGaAsP 材料 ICP 刻蚀. 通过分析我们发现在衬底温度略高于室温的 ICP 刻蚀中,离子轰击加热引起的侧蚀与刻蚀产物在侧壁再沉积之间处于平衡时可以得到高各向异性刻蚀,平衡点将随偏压减小而向 ICP 功率增高方向发展,从而在近 200 V 偏压下得到陡直的侧壁. 最终,在优化气体组分后,成功实现了光子晶体结构高各向异性的低偏压刻蚀.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Han S Z , Tian J , Feng S , Ren C , Li Z Y , Cheng B Y , Zhang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5659 (in Chinese) [韩守振、田 洁、冯 帅、任 承、李志远、程丙英、张道中 2005 物理学报 **54** 5659]
- [3] Cai X H , Zheng W H , Ma X T , Ren G , Xia J B 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2290
- [4] Leey B T , Kimy D K , Ahn J H 1996 *Semicond. Sci. Technol.* **11** 1456
- [5] Choi S J , Djordjev K , Choi S J , Dapkus P D 2002 *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** 301
- [6] Happ T D , Markard A , Kamp M , Forchel A , Anand S , Gentner J L , Bouadma N 2001 *J. Vac. Sci. Technol. B* **19** 2775
- [7] Hebner G A , Fleddermann C B 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 5102
- [8] Choi S J , Veerasingham R 1998 *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 1873
- [9] Sigmund P 1969 *Phys. Rev.* **184** 383
- [10] An T H , Park J Y , Yeom G Y , Chang E G , Kim C I 2000 *J. Vac. Sci. Technol. A* **18** 1373
- [11] Han Y J , Xue S , Wu T , Wu Z , Guo W P , Luo Y , Hao Z B , Sun C Z 2004 *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** 407
- [12] Shul R J , Pearton S J 2000 *Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques* (New York : Springer) p12
- [13] Thomas III S , Berg E W , Pang S W 1996 *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** 1807
- [14] Lin J , Leven A , Weimann N G , Yang Y , Kopf R F , Reyes R , Chen Y K , Choa F S 2004 *J. Vac. Sci. Technol. B* **22** 510
- [15] Woodworth J R , Nichols C A , Hamilton T W 1998 *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 3235
- [16] Muller K P , Pelka J 1987 *Microelectronic Engineering* **7** 9

Inductively coupled plasma etching of two-dimensional InP/InGaAsP-based photonic crystal

Ma Xiao-Tao¹⁾ Zheng Wan-Hua^{1)†} Ren Gang¹⁾ Fan Zhong-Chao²⁾ Chen Liang-Hui¹⁾

¹⁾ Nano-Optoelectronics Lab , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

²⁾ Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

(Received 31 May 2006 ; revised manuscript received 4 July 2006)

Abstract

Inductively coupled plasma (ICP) etching of InP in Cl₂/BCl₃ gas mixtures is studied in order to achieve low-damage and high-anisotropy etching of two-dimensional InP/InGaAsP photonic crystal. The etching mechanisms are discussed and the effect of plasma heating on wafer during etching is analyzed. It is shown that the balance between the undercut originating from plasma heating and the redeposition of sputtering on the side-wall is crucial for highly anisotropic etching , and the balance point moves toward lower bias when the ICP power is increased. High aspect-ratio etching at the DC bias of 203 V is obtained. Eventually , photonic crystal structure with nearly 90° side-wall is achieved at low DC bias after optimization of the gas mixture.

Keywords : two-dimensional photonic crystal , InP/InGaAsP , inductively coupled plasma , Cl₂/BCl₃ , low bias etching

PACC : 5240H , 5275 , 4270Q

† Corresponding author. E-mail : whzheng@red.semi.ac.cn