文章编号: 1000-7032(2011)12-1276-05

基于电感耦合等离子体的InP基半导体材料干法刻蚀的研究

王 琪[1,2], 张金龙[1], 王立军[1], 刘 云[1*]
(1. 中国科学院 激发态重点实验室 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了基于电感耦合等离子体(ICP)刻蚀系统的InP基半导体材料的干法刻蚀。采用$Cl_2/Ar/H_2$混合刻蚀气体,分别研究了氯气体积分数和ICP功率与刻蚀速率之间的关系,及镍、二氧化硅和二者结合型掩膜版的适用范围。获得有效的刻蚀速率为450~1 200 nm/min,InP对金属镍的选择性刻蚀比值为175~190。掩膜版的选择与制备方法适用于基于ICP系统的任何半导体材料的干法刻蚀工艺。

关 键 词: 固体掩膜版; 电感耦合等离子体; InP; 干法刻蚀
中图分类号: TN248.4 **PACS:** 42.55.Px **PACC:** 4255P **文献标识码:** A
DOI: 10.3788/fgxb20113212.1276

1 引 言

基于InP材料的半导体器件,如半导体激光器、探测器、调制器和InP基的光路集成,在日常生活和科学研究领域都有着极为重要的应用[1]。当某些微纳图形需要以刻蚀工艺方法转移到器件表面时,干法刻蚀的微加工技术被认为是非常有效的[2],它能满足器件对工艺精度和尺寸日益增长的需求。干法刻蚀具有刻蚀速率高、对有源区损害低和刻蚀形貌垂直等优点[3]。电感耦合等离子体(ICP) 常被用作刻蚀InP基的半导体材料[4]。通过高功率线圈可以获得高浓度的等离子体,进而增大刻蚀速率,所使用掩膜材料要求是固态的介质材料或金属材料。

InP半导体材料的刻蚀通常采用两种混合气体:一是基于甲烷的混合气体[4],二是基于氯气的混合气体[2-3,5-10]。前者虽然可以得到相对垂直的侧壁,但其刻蚀速率较慢。此外,在刻蚀的过程中产生的碳基聚合物[5]会使材料表面呈黑色,表面粗糙,甚至会导致刻蚀停止,直接影响器件的质量[5]。后者产生的$InCl_x$会降低刻蚀速率,对此,可通过增加反应温度的办法改善[6]。某些电光器件,如普通的半导体二极管的刻蚀的深度一般在2~3 μm,几种已报道的基于ICP的刻蚀方法均可达到该刻蚀深度。然而,对于某些刻蚀深度达到10 μm左右的器件,如量子级联激光器[11],这些工艺会存在两个问题:一是刻蚀材料的表面呈黑色或灰白色,刻蚀深度不能达到预期;二是InP对介质的掩膜材料的选择性刻蚀比并不高,介质掩膜版不适合10 μm深度的刻蚀。

为了克服上述问题,本文系统地研究了基于ICP系统对InP半导体材料的刻蚀过程,采用了$Cl_2/Ar/H_2$的混合刻蚀气体。Ar和H_2的功能是得到垂直的侧壁和较好的表面粗糙度,而使用Ar和Cl_2可获得理想的刻蚀速率。文中研究并分析了氯气体积分数和ICP功率与刻蚀速率之间的关系。分别采用镍和二氧化硅作为固体掩膜版,并针对小尺寸微纳加工提出了两种掩膜材料结合的方法,对3种掩膜材料的适用范围(刻蚀深度、刻蚀宽度尺度等)进行了研究。

2 实 验

所使用的设备是电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀系统。采用光刻和电子束蒸发镀膜工艺得

收稿日期: 2011-07-24; 修订日期: 2011-09-21
基金项目: 国家自然科学基金(61106047, 61176045, 61106068, 51172225); 国家自然科学基金重点项目(90923037)资助项目
作者简介: 王琪(1986-), 女, 黑龙江虎林人, 主要从事高功率半导体激光器的研究。
*: 通讯联系人; E-mail: hx5252@sohu.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

到镍掩膜版，等离子体增强化学气相沉积法（PECVD）、光刻和干法刻蚀工艺得到二氧化硅掩膜版，依次采用 PECVD、光刻、电子束蒸发镀膜和干法刻蚀工艺得到镍和二氧化硅结合的掩膜版。采用氢氟酸稀释溶液去掉刻蚀后残留的二氧化硅介质层，采用镍刻蚀剂去掉刻蚀后残留的金属镍。选用台阶仪测量刻蚀深度，扫描电镜（SEM）测量外观形貌，原子力显微镜（AFM）测量刻蚀表面的粗糙度。对于 ICP 干法刻蚀工艺，一个适合的固体掩膜版是得到好的刻蚀结果的最重要条件之一。固体掩膜版的选择与制备应满足两点要求：首先，在满足选择性腐蚀比的条件下并考虑到刻蚀后剩余掩膜版的去除，掩膜版的厚度一定要略大于估算厚度；其次，掩膜版应容易生成，图形边缘整齐，侧壁垂直光滑。

3　结果与讨论

3.1　掩膜版的选择

第一组实验首先研究了在所选用的刻蚀条件下，镍、二氧化硅和二者结合型掩膜版的最小的刻蚀尺寸以及对刻蚀深度的适用范围。在高掺铁的纯 InP 材料表面分别生成了三种掩膜版的不同宽度刻蚀尺寸的刻蚀样品，如表 1 所示，

表 1　3 种掩膜版的不同刻蚀尺寸制备后情况

Table 1　Fabrication results of three different kinds hard mask

μm	0.5	1	5	10	15	20	25
镍掩膜版	A	A	A	B	C	C	C
二氧化硅掩膜版	C	C	C	C	C	C	C
混合型掩膜版	C	C	C	C	C	C	C

其中 A 表示完全脱落，B 表示部分脱落，C 表示完整。

当以镍作为掩膜版时，实验所得的最小刻蚀宽度在 15 μm 左右，纳米量级与几微米量级的图形在 lift-off 之后掩膜版会脱落。小尺寸时，镍对 InP 材料的黏附性较差。实验中 InP 材料对掩膜材料的选择性刻蚀比值达到 170 ~ 195，考虑到刻蚀深度和刻蚀后的去除问题，采用的掩膜版厚度为 180 nm。因此，镍掩膜版的刻蚀尺寸应在 15 μm 左右，对刻蚀深度无要求。

对于二氧化硅掩膜版，虽然可制备在任何刻蚀尺寸下的完整的掩膜版，但因其选择性腐蚀比值一般在数十量级，所以更适合刻蚀深度为 2 ~ 3 μm 的器件。现报道文献多采用该介质类掩膜版。对于 10 μm 量级深度的刻蚀，所需制备的掩膜版较厚（甚至达到 μm 量级）。考虑掩膜版的最小宽度与制备等因素，介质掩膜版的制备过程是较难控制的。

最后，考虑纳米量级器件（如纳腔的半导体激光器）深度刻蚀的加工工艺，提出了镍和二氧化硅的结合型掩膜版。镍对二氧化硅的黏附性较好，如表 1 所示，任何刻蚀尺寸均可制备。实验中，先沉积了 200 nm 的二氧化硅的介质层，而后用光刻和电子束蒸发形成 100 nm 镍掩膜版层，最后采用干法刻蚀工艺去除不需要的介质层部分，进而得到镍和二氧化硅的混合型掩膜版。

3.2　刻蚀速率和氯气体积比之间的关系

第二组实验研究的是 InP 材料的刻蚀速率和氯气所占总体积比的关系。所采用的刻蚀材料是高掺铁的纯 InP 材料，掩膜版是 180 nm 厚的镍，所选用的镍刻蚀剂对刻蚀材料无影响。刻蚀的最小尺寸是 15 μm，刻蚀时间为 10 min，刻蚀速率为平均值。射频功率和 ICP 功率分别为 125 W 和 900 W，气压为 0.53 Pa，Ar 与 H_2 的体积比为 1∶1，如图 1 所示。

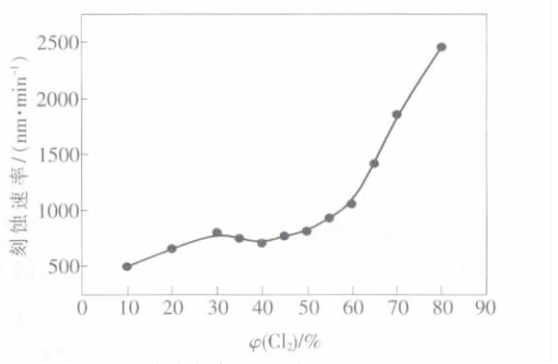

图 1　刻蚀速率与氯气所占总气体比的关系

Fig. 1　The etching rate versus the chlorine percentage of the total gas mixture

在 10% ~ 25% 范围内，随着氯气体积的增加，刻蚀速率呈线性增加。该区域的刻蚀速率主要受氩气引导的物理刻蚀机制控制，但其刻蚀后的材料表面呈黑色，所以该区域不适用。在 25% ~ 65% 范围内，刻蚀速率同氯气的体积分数间呈近似抛物线关系，速率先降后升，刻蚀速率几乎处于同一水平，变化不明显，该区域内由氩气所引导的物理刻蚀和氯气引导的化学刻蚀同时作用，二者随着氯气体积的分数变化，调节刻蚀过程。随着氯气体积分数的增加（65% ~ 85%），刻蚀，速率

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

迅速递增，此时刻蚀的过程由化学刻蚀所引导。尽管刻蚀的速率快，但侧蚀(图2)和较差表面粗糙度使该范围不适用。氯气的体积分数为25% ~ 65%范围内的刻蚀形貌和表面粗糙度较理想，有效刻蚀速率范围为450 ~ 1 200 nm /min。

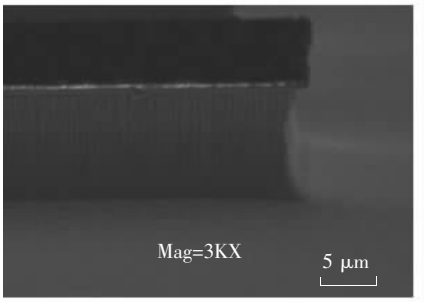

图2 出现侧蚀的SEM的结果

Fig. 2 SEM profile of the undercut condition

3.3 刻蚀速率和ICP功率之间的关系

第三组实验分别研究了在0.53和2 Pa条件下，ICP功率与刻蚀速率的关系。所采用的刻蚀材料是高掺铁的纯InP材料，掩膜版是180 nm厚的镍，所选用的镍刻蚀剂对刻蚀材料无影响。刻蚀的最小尺寸是15 μm，时间为10 min。Cl_2、Ar、H_2 3种混合气体的体积比为1∶1∶1，射频功率为125 W，如图3所示。

在0.53 Pa的工作气压下，刻蚀速率同ICP，功率的关系近似于递增的对数关系。在1 000 W附近ICP功率对刻蚀速率的影响已经趋于饱和。而2 Pa的曲线关系近似于线性递增。在ICP功率为1 175 W时，两种条件下的刻蚀速率相等。当ICP功率小于1 175 W时，在0.53 Pa的工作条件下，刻蚀速率较快，并且刻蚀的整体效果较好；

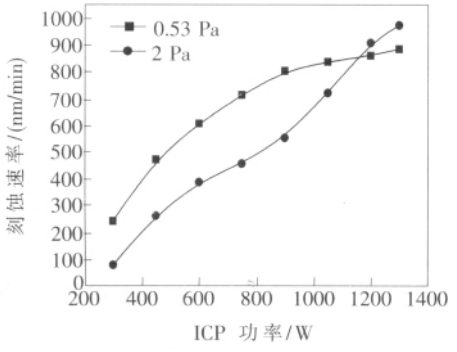

图3 在0.53 Pa和2 Pa气压下，刻蚀速率与ICP功率的关系。

Fig. 3 The etching rate versus ICP power at 0.53 Pa and 2 Pa, respectively.

当ICP功率大于1 175 W时，2 Pa的刻蚀速率较快。对刻蚀气压的选择会直接影响反应过程和刻蚀结果，当所有其它参数确定时，如果设定气压过低，反应不会发生；而过高的气压会导致刻蚀速率低，刻蚀结果不理想。

3.4 扫描电镜与原子力测试结果

以上实验与分析表明，采用180 nm的镍作为掩膜版，在对InP材料的刻蚀深度为10 μm时，刻蚀后的表面光亮，没有聚合物产生。如图4所示，刻蚀后的侧壁较垂直，刻蚀速度为790 nm/min。图5是原子力扫描电镜二维结果，其表面粗糙度的均方根为1.28 nm。

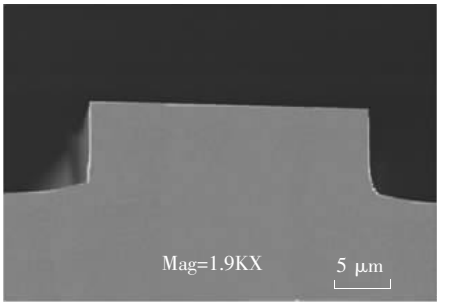

图4 扫描电镜结果

Fig. 4 SEM profile after etching

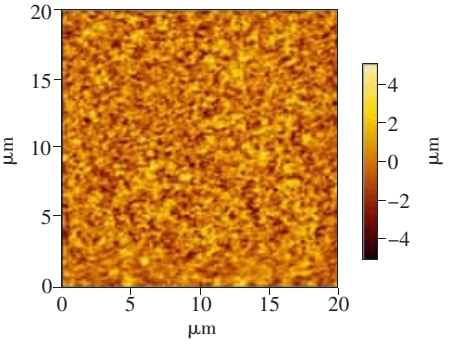

图5 刻蚀表面的二维原子力扫描电镜结果

Fig. 5 The 2-D AFM image after etching

4 结 论

系统地研究了基于电感耦合等离子体(ICP)的InP基半导体材料的干法刻蚀方法，采用的刻蚀气体为$Cl_2/Ar/H_2$混合气体，刻蚀的深度可达10 μm，刻蚀的形貌相对垂直，刻蚀材料的最好表面粗糙度的均方根(RMS)为1.28 nm，可适用于有源器件的深度刻蚀。氯气体积分数的有效范围为25% ~ 65%，相对有效的刻蚀速率为450 ~

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 200 nm/min。从刻蚀深度和刻蚀尺寸的工艺要求出发，系统地研究了镍、二氧化硅、镍与二氧化硅混合 3 种掩膜版的适用范围。其中镍掩膜版适合于刻蚀尺寸不小于 15 μm、刻蚀深度为 10 μm 的器件，二氧化硅掩膜版适用于任何刻蚀宽度但刻蚀深度较浅的器件，镍与二氧化硅混合掩膜版适用于任何刻蚀尺寸（包括纳米量级）和刻蚀深度的器件。在所有实验中，InP 对金属镍的选择性刻蚀比值为 175 ~ 190。该掩膜版的选择与制备方法适用于基于 ICP 系统的任何半导体材料的干法刻蚀工艺。

致谢：感谢新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院南洋助理教授（Nanyang Assistant Professor）王歧杰的指导与帮助。

参　考　文　献：

[1] Zhao W, Bae J W, Adesida I, *et al.* Effect of mask thickness on the nanoscale sidewall roughness and optical scattering losses of deep-etched InP/InGaAsP high mesa waveguides [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* B, 2005, **23**(5): 2041-2045.

[2] Sun C Z, Zhou Q W, Xiong B, *et al.* Vertical and smooth etching of InP by $Cl_2/Ar/CH_4$ inductively coupled plasma at room temperature [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(8): 1312-1314.

[3] Park S, Kim S S, Wan L W, *et al.* InGaAsP-InP nanoscale waveguide-coupled microring lasers with submilliampere threshold current using Cl_2/N_2-based high-density plasma etching [J]. *IEEE J. Quantμm. Electron.*, 2005, **41**(3): 351-356.

[4] Adesida I, Nummila K, Andideh E, *et al.* Nanostructure fabrication in InP and related compounds [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* B, 2002, **8**(6): 1357-1360.

[5] Hahn Y B, Hays D C, Cho H, *et al.* Effect of inert gas additive species on Cl_2 high density plasma etching of compound semiconductors Part Ⅱ. InP, InSb, InGaP and InGaAs [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **144**(1-4): 215-221.

[6] MatsutanA I, Ohtsuki H, Koyama F, *et al.* Vertical and smooth etching of InP by Cl_2/Xe inductively coupled plasma [J]. 1999, **38**(7A): 4260-4261.

[7] Rommel S L, Jang J H, Lu W, *et al.* Effect of H_2 on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in $Cl_2/Ar/H_2$ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* B, 2002, **20**(4): 1327-1330.

[8] Jang J H, Zhao W, Bae J W, *et al.* Study of the evolution of nanoscale roughness from the line edge of exposed resist to the sidewall of deep-etched InP/InGaAsP heterostructures [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* B, 2004, **22**(5): 2538-2541.

[9] Jang J H, Zhao W, Bae J W, *et al.*, Direct measurement of nanoscale sidewall roughness of optical waveguides using an atomic force microscope [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(20): 4116-4118.

[10] Lee C W, Nie D, Mei T, *et al.* Study and optimization of room temperature inductively coupled plasma etching of InP using $Cl_2/CH_4/H_2$ and CH_4/H_2 [J]. *J. Cry. Grow.*, 2006, **288**(1): 213-216.

[11] Gmachl C, Capasso F, Sivco D, *et al.* Recent progress in quantum cascade lasers and applications [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2001, **64**(11): 1553-1601.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Dry Etching of InP Material Based on Inductivity Coupled Plasma

WANG Qi[1,2], ZHANG Jin-long[1], WANG Li-jun[1], LIU Yun[1]

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: Dry etching of InP material based on inductivity coupled plasma (ICP) was thoroughly studied, $Cl_2/Ar/H_2$ gas mixture was adopted, and the etching depth could reach 10 μm with a vertical and a smooth surface. The gas percentages of the total gas versus etching rate, and the applicable regions of Ni, SiO_2, and the combination of Ni and SiO_2 were studied, respectively. The regions of the effective etching rate and selectivity against Ni are 450 ~ 1 200 nm/min and 175 ~ 190, respectively. The choosing and fabrication approaches adopted are highly suitable for any semiconductor material based on ICP system.

Key words: hard mask; inductivity coupled plasma; InP; dry etching

CLC number: TN248.4 **PACS:** 42.55.Px **PACC:** 4255P **Document code:** A

DOI: 10.3788/fgxb20113212.1276

Received date: 2011-07-24

向您推荐《液晶与显示》——中文核心期刊

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊，也是中国惟一的液晶学科和显示技术领域中综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国光学光电子行业协会液晶专业分会和中国物理学会液晶分会主办，科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术，及时反映国内外本学科领域及产业信息动态，是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果，进行国际交流的平台。本刊是英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、"中国科技论文统计源期刊"等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》征集有关各类显示材料及制备方法、液晶显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、有机电致发光显示、场发射显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用、显示材料和器件的测试方法与技术、成像技术和图像处理等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用，踊跃投稿。同时，竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊，国内定价40元。国内邮发代号：12－203；国外发行代号：4868BM。广告经营许可证号：2200004000068。

地 址：长春市东南湖大路3888号
《液晶与显示》编辑部
邮 编：130033
电 话：(0431) 86176059
E-mail：yjxs@ciomp.ac.cn

国内统一刊号：CN 22－1259/O4
国际标准刊号：ISSN 1007－2780
国际刊名代码(CODEN)：YYXIFY
传 真：(0431) 84695881
网 址：www.yjyxs.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net