2015年8月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2015)04-0646-04

亚微米尺寸金属电极的制备工艺

湛治强^{a,b}, 阎大伟^{a,b}, 熊政伟^{a,b}, 沈昌乐^{a,b}, 彭丽萍^{a,b}, 罗跃川^{a,b}, 王雪敏^{a,b}, 吴卫东^{a,b} (中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 亚微米尺寸金属电极在高电子迁移率晶体管(HEMT)等半导体电子学器件中有重要应 用,其制作是器件制作中的关键工艺,对器件性能有着重要影响。本文选择合适的涂胶旋转转速、 烘烤温度(180℃)和时间,可以有效地减少电子束曝光后所产生的气泡。通过对聚甲基丙烯酸甲酯/ 聚二甲基戊二酰亚胺(PMMA/PMGI)双层胶进行电子束曝光和显影,确定了合适的曝光剂量 为 550 μC/cm²。通过调整显影液配比,并将显影时间控制在合理范围,获得了光滑完整的 PMMA/PMGI 双层光刻胶曝光图形。开发了双层光刻胶电子束曝光工艺,制备出宽度为 200 nm 的 金属电极。

关键词: 双层胶; 亚微米; 电子束曝光; 金属电极 中图分类号: TN304.07 文献标识码: A doi

doi: 10.11805/TKYDA201504.0646

Preparation of submicron-sized metal electrodes

ZHAN Zhiqiang^{a,b}, YAN Dawei^{a,b}, XIONG Zhengwei^{a,b}, SHENG Changle^{a,b}, PENG Liping^{a,b},

LUO Yuechuan^{a,b}, WANG Xuemin^{a,b}, WU Weidong^{a,b}

(a.Research Center of Laser Fusion; b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Submicron size metal electrodes have important applications in High Electron Mobility Transistor(HEMT) and many semiconductor electronics, whose fabrication, playing a significant role in the device performance, is the key technology in device processing. In this paper, suitable rotation speed of gluing, baking temperature(180 °C) and time duration are determined, enabling reducing the air bubbles produced after the electron beam exposure significantly. A suitable exposure dose of 550 μ C/cm² is found by the electron beam exposure and development to the Polymethyl Methacrylate/dimethyglutarimide (PMMA/PMGI) double glue. By tuning the ratio of the developing solution and controlling a reasonable range of developing time, a smooth and complete exposure pattern of PMMA/PMGI bilayer photoresist is obtained. Using the electron beam lithography to a bilayer photoresist, a metal electrode with a width of 200 nm is fabricated. The results lay a solid foundation for the preparation of high-performance semiconductor devices.

Key words: bilayer photoresist; submicron; electron beam lithography; metal electrode

微电子技术是现代国民经济的神经中枢,并引发了现代产业革命,深刻地影响着社会生活的各个方面。得益 于先进的光刻技术和微纳米加工技术,硅基逻辑集成电路已达到22 nm节点,每块晶圆上可集成上亿个晶体管^[1-3]。 但在高频应用领域,III-V族半导体器件占据着绝对优势。目前,III-V族半导体HEMT等电子学器件已成功应用于 雷达预警^[4]、高速空间通信、电子对抗等诸多军事领域,引发了美、日、欧多国的开发热潮。但由于材料的特殊 性,III-V族半导体HEMT等器件工艺与硅工艺并不兼容,其工艺成熟度远远落后于硅,目前仍存在许多工艺问题 尚待研究。HEMT器件的高频特性主要采用电流增益截止频率(f_i)和功率增益截止频率(f_{max})来描述,f_i和f_{max}的大小 决定了HEMT器件的工作频段。从器件工艺角度出发,若要获得100 GHz以上f_i和f_{max}则需要将HEMT器件的栅电极 (gate)尺寸降至亚微米量级,而亚微米量级栅电极的制备依赖于电子束光刻技术^[5-7]、紫外技术、极紫外光刻 (Extreme Ultraviolet Lithography, EUL)技术等,选择电子束光刻技术来制备亚微米量级栅电极。

电子束光刻是利用某些高分子聚合物光刻胶对电子敏感而形成的曝光图形的一种高分辨率曝光技术^[6-10]。在

第4期

实际应用中,栅电极制备过程对器件性能影响极大,各研究机构对此工艺过程均高度保密。

1 实验

HEMT是通过栅电极来控制高迁移率二维电子气(2DEG)获得高频工作 能力的一种器件,其结构如图1所示。由于本实验中制备的金属电极尺寸小 于500 nm,普通的光学曝光系统难以满足需求,因而采用电子束曝光系统 对光刻胶进行曝光。为了减小电极的电阻,需要增加电极金属的厚度,这 就要求光刻胶具有较高的曝光精确度,同时还要有足够的厚度。目前光刻 胶很难同时满足在较大厚度的情况下实现高曝光精确度。

针对上述需求,选择PMMA/PMGI双层光刻胶^[10]。PMMA曝光精确度高, PMGI 胶是聚二甲基戊二(酸)酰胺与其溶剂的混合物,由于不与典型的i-线、 深紫外和电子束胶互溶,所以可以置于PMMA的下层构成多层结构。PMGI 溶于多数碱性显影液,并且不需曝光,然而PMGI是一种光敏材料,当上层

光刻胶经过曝光、显影后,PMGI显露出来的那一部分若进行一定剂量的深紫外或电子束曝光,则可获得各向异性的显影效果。采用PMMA/PMGI双层胶工艺制备亚微米金属电极时,顶层PMMA光刻胶由于具有高曝光精确度,可用于定义金属电极的位置与长度的尺寸;通过引入下层的PMGI光刻胶,一方面可增加光刻胶的总厚度,同时可通过对其显影的控制形成梯形的内切结构,有助于实现金属剥离。

2 实验结果

由于金属电极的大小和形状与双层胶的厚度有紧密联系, 首先对每层胶的厚度进行标定,研究旋涂速度与烘烤对 PMMA/PMGI双层胶厚度的影响。

经过试验,选定PMGI旋涂参数为转速4000 r/min,然后利 用热板180℃烘烤90 s。通过显微镜检查确定无气泡后,继续旋 涂PMMA光刻胶,其旋涂参数为转速1500 r/min,然后利用热板 180℃烘烤120 s以除去过多的溶剂。其中烘烤温度和时间特别 关键,因为PMGI在显影液中的溶解速率与它们密切关联,温度



 Fig.2 PMMA/PMGI double glue micrograph with incomplete baking
图2 烘烤不完全的PMMA/PMGI双层光刻胶显微镜

过低或过高、烘烤时间选择错误均可导致其溶解速率难以控制。对于PMMA光刻胶来说,过低的烘烤温度和时间 会导致胶中的溶剂挥发不完全,在电子束曝光后会出现大量气泡(如图2所示)。

在双层胶厚度与烘烤工艺稳定后,对PMMA/PMGI双层胶进行了曝光剂量测试,从450 μC/cm²~700 μC/cm², 按50 μC/cm²递增。测试时设定PMMA曝光尺寸为250 nm,300 nm,350 nm,400 nm,450 nm和500 nm。曝光完成后, 顶层的PMMA光刻胶用四-甲基-二-戊酮(MIBK)和异丙醇(IPA)的溶液进行显影。该显影液不会对下层PMGI光刻 胶产生影响。显影时应尽量控制好时间,以保证线条的完整性。经过试验,发现当曝光剂量选择为550 μC/cm² 较为合适(如图3所示)。顶层PMMA显影完成后,即可对底层PMGI进行显影。由于PMGI对电子束并不太敏感, 因而其显影过程完全要通过显影液的配比和显影时间来控制。初期采用标准的TMAH溶液,在经过120 s显影后 PMGI侧向腐蚀过大,使得上层PMMA在曝光图形区完全脱落(见图4)。



Fig.3 Top micrograph after PMMA developing 图3 顶层PMMA显影过后的显微镜图



Fig.4 PMMA/PMGI double glue micrograph after developing for 120 s 图4 显影120 s后的PMMA/PMGI双层胶显微镜图



图1 HEMT器件结构示意图

通过一系列实验,调整了显影液配比,并将显影时间控制在合理 范围,最终获得了光滑完整的 PMMA/PMGI 双层光刻胶曝光图形,从 图中可观察到底层 PMGI 光刻胶的侧向腐蚀得到了有效控制(见图 5)。

PMMA/PMGI 双层胶曝光显影完成后,需要进行金属蒸发与剥离,以完成金属电极的制备。在沉积金属电极层时,需要控制好蒸发 速率和各层金属的厚度,以防止过热的金属发生剧烈的互扩散,影响 器件的电学性能。蒸发完金属后,通常采用丙酮对蒸发过金属样品进 行长时间浸泡,以使光刻胶缓慢脱离,最终完成金属电极的制备。

制备了宽度约 200 nm,断面呈梯形的金属电极(见图 6),这为后续制备高性能 HEMT 等电子学器件打下了坚实的基础。

3 结论

研究了电子束曝光技术结合 PMMA/PMGI 双层光刻胶工艺制备 亚微米尺寸金属电极工艺。通过实验,调整了光刻胶悬涂和烘烤参数, 获得了厚度可控的 PMMA/PMGI 双层光刻胶。详细研究了 PMMA/PMGI 双层光刻胶的显影过程,获得了满足实验要求的工艺条 件,最终制备了宽度为 200 nm 的金属电极。

Fig.5 Correct development of the PMMA/PMGI double glue micrograph 图5. 正确目影体的MAA/PMCI型目的目微接图

图5 正确显影的PMMA/PMGI双层胶显微镜图



Fig.6 Correct development of metal line profile 图 6 正确显影的金属线条断面图

参考文献:

- [1] 王阳元,王永文. 我国集成电路产业发展之路一从消费大国走向产业强国[M]. 北京:科学出版社, 2008. (WANG Yangyuan,WANG Yongwen. The Way of Chinese Integrated Circuit Industry Development—from Big Consumers to Industrial Powerhouse[M]. Beijing:Science Press, 2008.)
- [2] Lanny L Lewyn, Trond Ytterdal, Carsten Wulff, et al. Analog Circuit Design in Nanoscale CMOS Technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(10):1687-1714.
- [3] 蒋建飞. 纳电子学导论[M]. 北京:科学出版社, 2006. (JIANG Jianfei. Nanoelectronics[M]. Beijing:Science Press, 2006.)
- [4] 王雪敏,阎大伟,沈昌乐,等. 高电子迁移率晶体管材料结构的制备及分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):536-540. (WANG Xuemin,YAN Dawei,SHEN Changle, et al. Preparation and analysis of HEMT materials structure. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):536-540.)
- [5] 陈宝钦. 电子束光刻技术与图形数据处理技术[J]. 微纳电子技术, 2011,48(6):345-352. (CHEN Baoqin. Electron beam lithography technology and pattern data process technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2011,48(6):345-352.)
- [6] 来五星,轩建平,史铁林,等. 微制造光刻工艺中光刻胶性能的比较[J]. 半导体技术, 2004,29(11):22-25. (LAI Wuxing, XUAN Jianping,SHI Tielin,et al. Comparison of characteristics of photoresists in photolithography process on micromaching[J]. Semiconductor Technology, 2004,29(11):22-25.)
- [7] 刘玉贵,王维军,罗四维. 电子束纳米光刻技术研究[J]. 微纳电子技术, 2003,7(8):562-563. (LIU Yugui,WANG Weijun,LUO Siwei. E-beam nano-lithography technology research[J]. Micronanoelectronic Technology, 2003,7(8):562-563.)
- [8] 李岚,王阳,李晓岚,等. 化合物半导体器件与电路的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2012,49(10):650-653. (LI Lan, WANG Yang, LI Xiaolan, et al. Research process of compound semiconductor devices and ICs[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012,49(10):650-653.)
- [9] 蔡永才. 国外几种半导体新器件的发展状况[J]. 微电子学, 1991,21(4):13-27. (CAI Yongcai. Advances of some new semiconductor devices: an overview[J]. Microelectronics, 1991,21(4):13-27.)
- [10] 石华芬,张海英,刘训春.等,一种新的高成品率InP基T型纳米栅制作方法[J]. 半导体学报,2003,24(4):411-414. (SHI Huafen,ZHANG Haiying,LIU Xunchun, et al. A novel high-yield InP-based T-shaped nanometer-gate fabrication technique[J]. Semiconductor Sinica, 2003,24(4):411-414.)