

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.002

种子层厚度对电镀厚镍速率及形貌影响的研究

刘士琳¹, 王 凯², 雷 程^{1*}, 余建刚¹, 王涛龙¹,路 晶¹, 李 博¹, 郭晋竹³, 梁 庭¹

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 天津伟加环境科技有限公司, 天津 300450; 3. 中电科风华信息装备股份有限公司, 山西 太原 030062)

摘要: 镍是最常用的 SiC 干法刻蚀掩膜, 其质量会直接影响刻蚀效果。为了探索不同厚度种子层对碳化硅表面电镀厚镍掩膜的影响, 基于电镀原理, 采用磁控溅射沉积金属金作为电镀镍种子层, 并采用直流电流分别在其表面电镀制备镍膜, 使用台阶仪、原子力显微镜、扫描电子显微镜分别对电镀速率、粗糙度以及镀层侧壁形貌进行表征。结果表明: 种子层厚度 100~400 nm 范围内, 随着种子层厚度的增加, 镀层表面粗糙度先增大再减小, 镀层表面颗粒团聚尺寸逐渐增大, 镀层电镀速率逐渐增大, 边缘速率增大趋势更加显著, 镀层侧壁倾角逐渐减小, 镀层横向生长逐渐增加。其中 100 nm 种子层表面镀层厚度>20 μm , 粗糙度 33.852 nm, 侧壁倾角 72.1°, 结构裸露比 92.5%, 作为 SiC 刻蚀掩膜更优, 为电镀制备厚镍掩膜工艺研究提供了方向。

关键词: 碳化硅; 电镀镍; 种子层; 粗糙度; 侧壁形貌

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: A

Effect of seed layer thickness on the rate and morphology of thick nickel plating

Liu Shilin¹, Wang Kai², Lei Cheng^{1*}, Yu Jiangang¹, Wang Taolong¹, Lu Jing¹,
Li Bo¹, Guo Jinzhu³, Liang Ting¹(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Tianjin Weijia Environmental Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China;
3. CETC Fenghua Information-Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030062, China)

Abstract: Nickel is the most commonly used SiC dry etching mask, and its quality will directly affect the etching effect. In order to explore the effect of different thicknesses of seed layers on the electroplated thick nickel mask on the surface of silicon carbide, based on the principle of electroplating, magnetron sputtering was used to deposit metallic gold as the electroplated nickel seed layer, and a nickel film was

收稿日期: 2024-06-04

修回日期: 2024-06-30

作者简介: 刘士琳(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为碳化硅压力传感器制备的关键工艺, email: wslsl123@163.com

通信作者: 雷程(1987—), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向为 MEMS 技术和极端环境下传感器制造, email: leicheng@nuc.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3208500); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目(202201030201010); 山西省重点研发计划资助项目(2023020302010); 山西省基础研究计划资助项目(202103021223185 & 202203021222079)

引用信息: 刘士琳, 王凯, 雷程, 等. 种子层厚度对电镀厚镍速率及形貌影响的研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 09-16.
Liu Shilin, Wang Kai, Lei Cheng, et al. Effect of seed layer thickness on the rate and morphology of thick nickel plating[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 09-16.

prepared by electroplating on the surface with a direct current. And the electroplating rate, surface morphology, roughness, and the morphology of plated sidewalls were characterized using the bench-top meter, atomic force microscope, and scanning electron microscope, respectively. The results show that: within the range of 100-400 nm seed layer thickness, with the increase of the seed layer thickness, the surface roughness of the plating layer increases and then decreases, the size of the particle agglomeration on the surface of the plating layer gradually increases, the plating rate of the plating layer gradually increases, the trend of the edge rate increase is more significant, the inclination angle of the plating layer sidewalls decreases, and the transverse growth of the plating layer gradually increases. The surface coating thickness of 100 nm seed layer is $>20\text{ }\mu\text{m}$, roughness is 33.852 nm, sidewall inclination is 72.1° , and structural exposure ratio is 92.5%, which is better as a SiC etching mask, providing a direction for the preparation of thick nickel mask by electroplating.

Keywords: silicon carbide; electroplating nickel; seed layer; roughness; sidewall morphology

随着航空航天领域的不断发展,对于具备卓越抗冲击、抗振动以及耐高温特质的微型传感器的需求呈现显著增长的趋势^[1]。硅基压阻式压力传感器工作在超过 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下,掺杂层的压敏电阻与硅基衬底之间pn结电隔离失效,漏电流急剧增大^[2],限制了硅基传感器在高温下的应用。另外,硅材料在超过 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时易氧化,在外力作用下发生塑性形变^[3],限制了SOI(silicon on insulator)压力传感器芯片的应用。碳化硅作为第三代宽禁带半导体材料,具有优良的力学、电学和热学性能^[4],而且具有良好的压阻效应,是制备耐 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 甚至更高温度的压力传感器的关键材料^[5]。

SiC的机械硬度大,化学稳定性强,刻蚀难度较大,故一般采用干法刻蚀制备结构^[6-7]。金属镍是最常用的SiC干法刻蚀掩膜,表面平整的镍掩膜刻蚀选择比更稳定,且微掩膜效应影响更小^[8],掩膜厚度保证刻蚀深度,为了实现更高刻蚀选择比和更高刻蚀深度,通常要求镍掩膜表面平整、侧壁垂直度高,厚度足够厚。常见的金属镀膜工艺有磁控溅射、电镀、化学镀和喷涂等。由于镍为强磁材料,磁控溅射镍沉积速度慢、所需气压高,不适用于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的厚膜的制备;化学镀溶液组分复杂且稳定性较差,所需温度较高;而电镀溶液组分简单、稳定性好、生长速度快、工艺成熟且成本更低^[9],因此本文通过电镀的方法制备镍掩膜。

电镀前需要在SiC晶圆表面溅射种子层并图形化^[10]。由于压力传感器背腔作为干法刻蚀的结构区,不能电镀掩膜,结构区以外的区域都需要掩膜保护,故需要图形化的种子层以实现电镀图形化的厚镍掩膜。金的导电性能良好,可使晶圆表面的电流密度分布更加均匀,是常见的种子层金属^[10-12],

为了探究种子层对电镀镍层的影响,本文采用金作为种子层,通过溅射不同厚度的金并在其表面电镀镍,研究种子层对电镀镍层的表面形貌、粗糙度、生长速率、镀层侧壁等参数的影响,为碳化硅压力传感器的制造提供关键工艺支持。

1 实验

1.1 图形化种子层制备

通过SiC压阻式压力传感器背腔刻蚀所需的厚掩膜,探索SiC表面电镀镍工艺。镀件准备如图1所示,采用天科合达的4英寸(10.16 cm)SiC晶圆为衬底,首先对SiC晶圆进行标准RCA处理(工业标准湿法清洗工艺);将清洗好的SiC晶圆置于磁控溅射机(MSP-3200)中,通过直流磁控溅射(100 W 、 14 sccm)在其表面制备厚度分别为100、200、300和400 nm金种子层;取出晶圆,置于匀胶机上,使用7133负性光刻胶进行匀胶,使用背腔尺寸不同的掩模版进行光刻,并使用显影液去掉未曝光部分的光刻胶;将

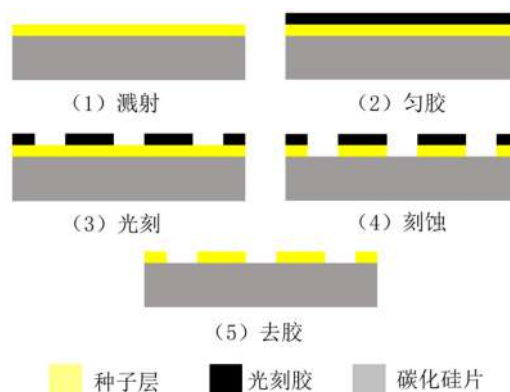


图1 镀件制备工艺流程

Fig.1 Plating preparation process flow

光刻完成的晶圆置于离子束刻蚀机(IBE)中刻蚀背腔位置的种子层;最后置于无水乙醇中进行超声处理去除光刻胶,镀件准备完成。

1.2 电镀

对不同种子层厚度的SiC晶圆进行电镀,电镀装置示意图如图2所示,电镀镍的电镀液采用硫酸盐型,镀液配方为:硫酸镍250 g/L、氯化镍40 g/L、硼酸40 g/L、糖精钠1.2 g/L、2-乙基己基硫酸钠1 mL/L。阳极采用纯度为99.8%镍板,阴极为上述SiC片,电镀温度为50 ℃,溶液pH为3.6~3.8。电镀电流源的电流设置为0.5 A,电流密度为1 A/dm²,阴阳极距离为20 cm,此条件下电镀速率为120 nm/min,经过200 min电镀,电镀厚度>20 μm。电镀的过程中使用磁转子对电镀液进行搅拌,转速为500 r/min,减少由于析氢反应导致的镀件表面的针孔。

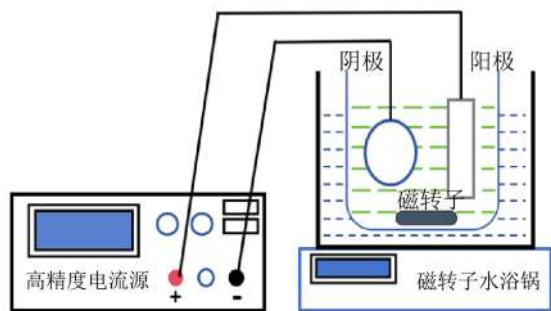


图 2 电镀装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of electroplating device

1.3 测试方法

使用奥林巴斯的激光共聚焦显微镜观察表面颗粒团聚情况。使用ZEISS SUPRA-55扫描电子显微镜(SEM)观测种子层表面形貌和电镀镍层的侧壁形貌;使用UNC LIMITED UHV-NC-AFM原子力显微镜(AFM)测试镀层表面粗糙度;使用KLA Tencor P-7台阶仪测试镀层厚度。

2 结果与讨论

2.1 种子层厚度对种子层形貌的影响

电镀前,通过扫描电子显微镜(SEM)对不同厚度种子层的表面形貌进行测试,测试结果如图3,其中100 nm金种子层堆积成膜,金颗粒尺寸较小且颗粒大小分布较为均匀,整体形貌较好;200 nm种子层表面出现部分缺陷,此时种子层虽然已经堆积成膜,但是颗粒大小分布不均匀;随着溅射厚度进一步增加,300 nm和400 nm种子层表面颗粒尺寸增大,颗粒大小分布更加均匀,堆积成膜,且表面缺陷

消失。

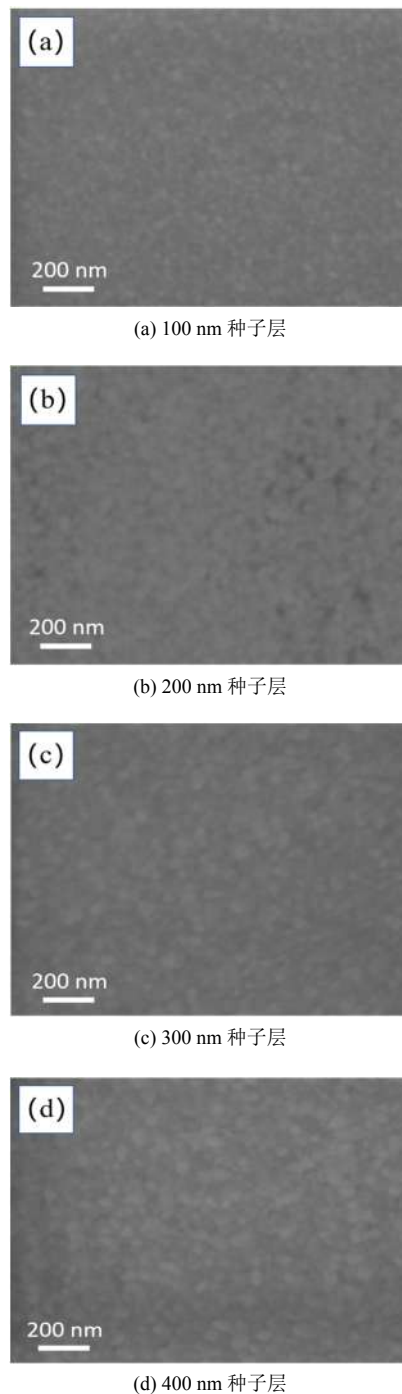


图 3 不同种子层表面 SEM 测试形貌

Fig.3 SEM test morphology of different seed layer surfaces

使用原子力显微镜(AFM)测试不同种子层表面粗糙度,测试结果如图4所示,可见100~400 nm种子层的粗糙度先增大再减小,其中100 nm的种子层粗糙度最小,200 nm种子层粗糙度最大,测试结果与电镜的观测形貌结果一致。其中100 nm金种子层

粗糙度最低, 为2.906 nm; 200 nm种子层粗糙度最大, 为7.932 nm; 随着溅射厚度的增加, 300 nm和400 nm种子层表面粗糙度有所下降, 分别为5.285 nm和5.033 nm, 表面粗糙程度变化趋于平稳。

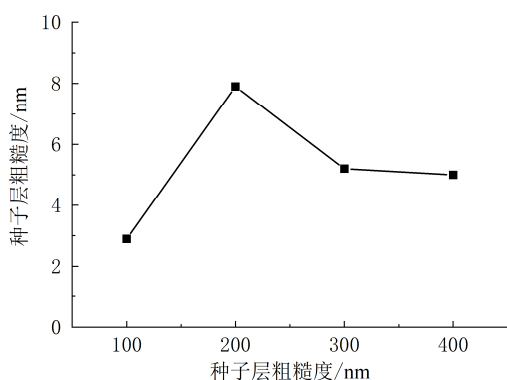


图4 不同种子层表面粗糙度

Fig.4 Surface roughness of different seed layers

上述SEM和AFM测试结果表明, 种子层的厚度会影响种子层表面粗糙度。当种子层厚度达到形成初期薄膜的标准后, 随着溅射厚度的增加, 种子层表面粗糙度呈现先增后减的趋势。此过程中金原子堆积成核, 尺寸逐渐增大, 在晶核生长的过程中, 种子层内应力增大首先导致其表面出现缺陷, 而后随着溅射厚度累积, 缺陷被填充, 晶核尺寸变大, 且分布逐渐均匀, 最终形成稳定的堆积膜层。

2.2 种子层厚度对镀层形貌的影响

使用原子力显微镜(AFM)测试不同种子层厚度(100、200、300和400 nm)的SiC晶圆镀层的粗糙度, 通过划片机进行划片, 并选取晶圆正中心1 cm×1 cm区域测试, 测试结果如图5所示。电镀镍层表面粗糙度随着种子层厚度而变化, 100、200、300和400 nm种子层表面镀层的粗糙度分别为33.852、49.840、41.941和36.379 nm。

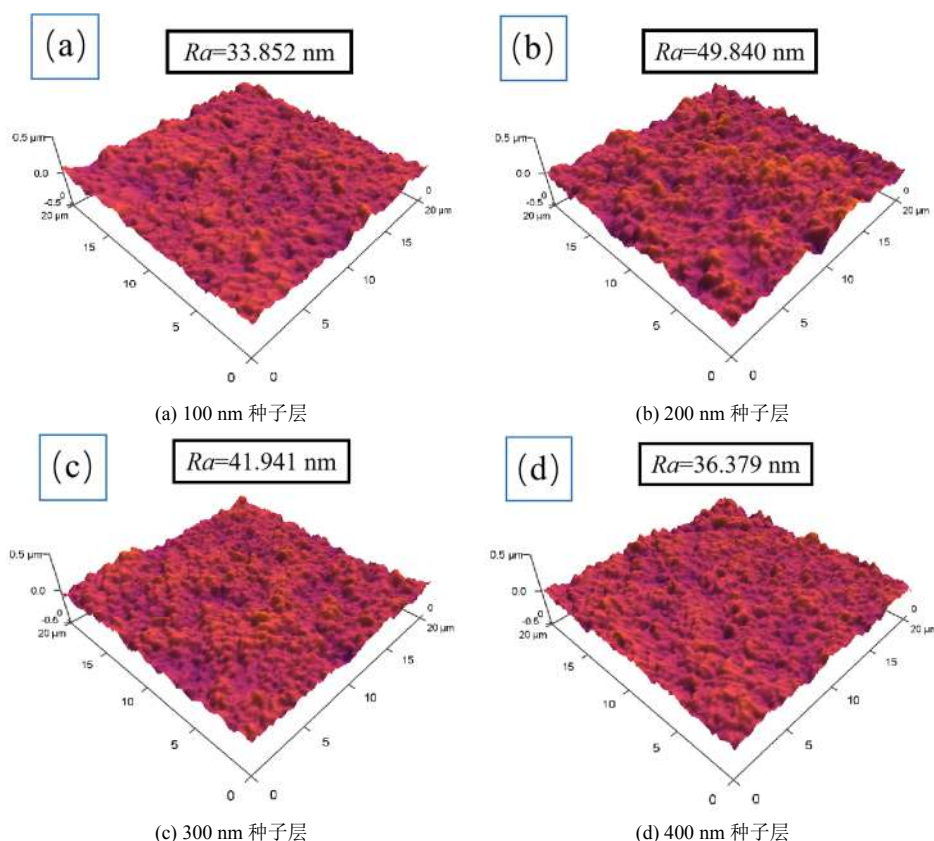


图5 不同种子层表面电镀层 AFM 测试结果

Fig.5 AFM test results of different seed layer surface plating layers

镀层粗糙度和种子层粗糙度随种子层厚度的变化如图6所示。在100~400 nm种子层范围内, 随着种子层厚度的增加, 镍镀层表面的粗糙度呈现出先增大后减小的趋势。这一趋势与种子层粗糙度的

变化趋势一致。

测试结果说明, 种子层的厚度的差异直接导致种子层的粗糙度及晶核尺寸差异, 进而影响电镀层表面的粗糙度。电镀过程中, 金属离子在电场的影

响下被吸引到阴极的种子层表面,它们很可能填充种子层凹陷区域^[13],并倾向于进入种子层现有的网格位置,在堆积成膜过程中延续种子层的表面特性。另外,在SiC刻蚀过程中,金属掩膜受到等离子体轰击,会飞溅并沉积在结构区域,影响结构区域的刻蚀效果,称为微掩膜效应^[14],镀层表面粗糙度越高,这种微掩膜效应的影响越显著。经过对比表明,100 nm种子层表面镀层粗糙度更低,表面更加均匀平整,更有利于后续的SiC刻蚀工艺。

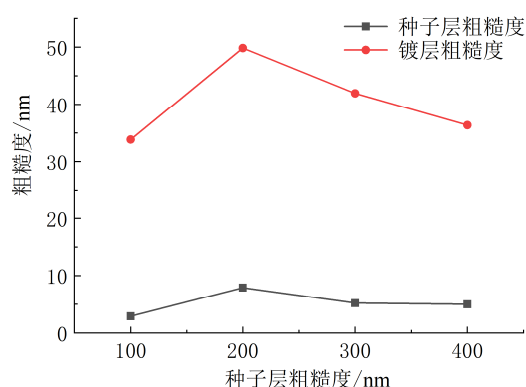


图 6 种子层厚度与种子层、镀层粗糙度关系

Fig.6 Seed layer thickness versus seed layer and plating roughness

2.3 种子层厚度对镀层电镀速率与厚度分布的影响

在电镀工艺完成后,采用KLA Tencor P-7台阶仪对镀层厚度进行测量。观察到边缘位置与中心区域的镀层厚度存在显著差异,晶圆边缘镀层厚度明显高于中间,这就是“边缘效应”^[15-16],这种效应会使晶圆应力增大,导致晶圆的翘曲,不利于SiC刻

蚀的进行。为了表征中间位置与边缘位置电镀差异,分别选择晶圆上八个中间位置和八个边缘位置进行台阶仪测试,中间位置与边缘位置选取方式如图7所示,将测试结果分别取平均值得到平均厚度,再通过平均厚度计算电镀速率,实验数据如表1所示。实验数据表明,在相同电镀液成分和电镀参数条件下,晶圆中间位置的镀层平均厚度及电镀速率随种子层厚度的增加而呈现增大趋势,晶圆边缘位置镀层厚度与电镀速率则随种子层厚度的变化表现出了较为显著的差异。

上述结果表明,种子层厚度的增加加快了电镀速率,同时加剧了边缘效应,导致边缘位置的电镀行为更为剧烈。实验中400 nm种子层SiC晶圆电镀速率最快,但厚度极差最大,晶圆中间与边缘电镀速率差距最大,晶圆表面厚度分布不均;100 nm种子层的SiC晶圆电镀速率最慢,但镀层厚度极差最小,镀层厚度分布最为均匀,更有利于后续的SiC刻蚀工艺。

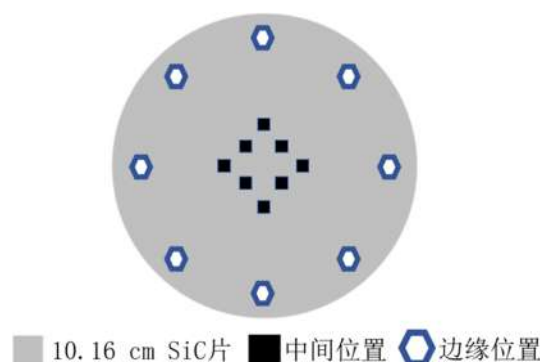


图 7 台阶仪测试区示意图

Fig.7 Schematic diagram of the step meter test area

表 1 不同种子层电镀层厚度与速率

Tab.1 Thickness and rate of plating layer for different seed layers

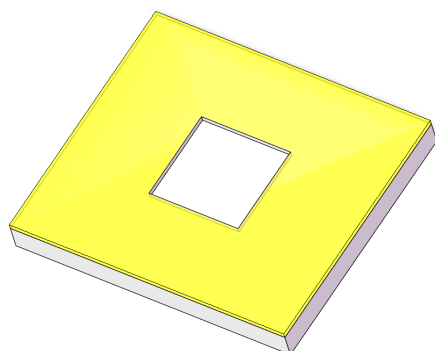
种子层厚度 /nm	平均中间厚度 /μm	平均边缘厚度 /μm	中间速率 /(nm·min ⁻¹)	边缘速率 /(nm·min ⁻¹)	最大厚度 /μm
100	20.35	28.85	101.75	144.25	31.72
200	20.84	31.62	104.20	158.10	35.18
300	21.52	33.68	107.60	168.40	36.33
400	21.85	35.05	109.25	175.25	38.15

2.4 种子层厚度对镀层侧壁形貌的影响

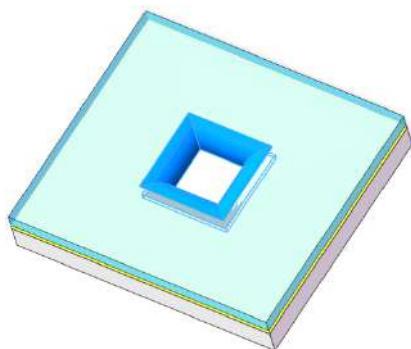
电镀的边缘效应对于晶圆表面电镀的影响十分显著,在具有图案化的选择性金属电镀中,已经观察到金属图案边缘的横向生长、重镀和寄生镀层^[17-19]。在通过电镀制备SiC厚镍掩膜时,结构位置

无种子层,如图8(a)。电镀后的整体示意图和剖面图分别如图8(b)、图8(c)所示,其中图8(b)深色位置即为镀层侧壁。由于局部电流分布不均,结构边缘的镀层沿垂直晶圆表面生长的同时沿晶圆表面生长,沿着晶圆表面方向生长即为横向生长,镀层的

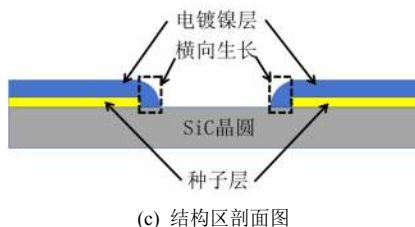
横向生长会使实际结构面积减小, 结构区镀层侧壁垂直度降低, 出现圆弧状或坡状侧壁形貌。



(a) 图形化种子层示意图



(b) 电镀后镀层示意图



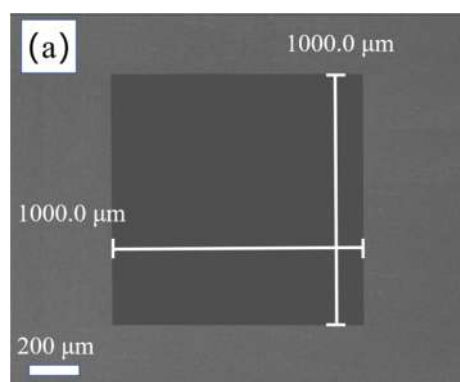
(c) 结构区剖面图

图8 结构区种子层及镀层示意图

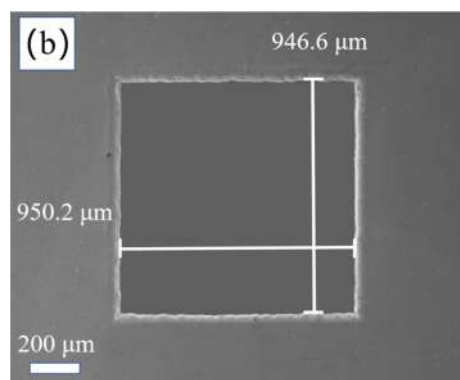
Fig.8 Schematic diagram of the seed layer and plating in the structural area

通过对电镀前后的 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 结构位置进行SEM测试, 对比电镀前后结构面积大小, 来表征镀层的横向生长, 电镀后结构面积越小, 横向生长越

显著, 如图9所示, 图9(a)为电镀前的形貌, 图像中亮的位置为种子层, 暗的位置为结构位置, 无种子层。图9(b)为电镀后的形貌(200 nm种子层), 亮的位置为电镀镍层, 暗的位置为结构位置, 无电镀镍层。对不同种子层厚度的晶圆电镀前后结构面积及边缘的横向生长进行测量, 得到的对比结果如表2, 不同种子层厚度(100、200、300和400 nm)的晶圆电镀前结构尺寸均为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$, 电镀后结构面积分别为 0.925 、 0.881 、 0.852 和 0.827 mm^2 。对比数据可得, 随着种子层厚度的增加, 横向生长加剧, 结构裸露面积减小, 偏离设计值更大。



(a) 电镀前



(b) 电镀后

图9 电镀前后结构位置 SEM 图

Fig.9 SEM images of structural position before and after plating

表2 不同种子层厚度电镀前后结构差异

Tab.2 Structural differences before and after plating for different seed layer thicknesses

种子层厚度/nm	结构面积设计值 S_1/mm^2	电镀后结构面积值 S_2/mm^2	结构裸露比 S_2/S_1
100	1.000	0.925	92.5%
200	1.000	0.881	88.1%
300	1.000	0.852	85.2%
400	1.000	0.827	82.7%

对电镀后的SiC晶圆进行划片处理,使用划片机将背腔尺寸1 mm×1 mm结构位置划开,得到结构区的截面,使用扫描电子显微镜SEM观察侧壁形貌及垂直度,如图10所示,图中球状颗粒为切割过程中表面破坏的污染物,并非镀层结构。100 nm种子层镀层侧壁倾角为72.1°,且镀层侧壁光滑,无明显颗粒聚集;200 nm种子层镀层侧壁倾角为60.2°,侧壁有颗粒聚集,平整度较差;300 nm种子层镀层侧壁均匀光滑,侧壁倾角分别为46.2°;400 nm种子层镀层侧壁倾角为34.6°,侧壁虽无明显颗粒聚集,但平整度有所下降。另外,100 nm和200 nm种子层表面镀层侧壁形貌呈现较为明显的圆弧状,若采用圆弧状模拟,100 nm种子层表面镀层侧壁圆弧对应的圆半径为23.5 μm,200 nm种子层表面镀层侧壁圆弧

对应的圆半径为28.9 μm。由此可得,随着种子层的厚度增加,镀层侧壁倾角逐渐增大,且侧壁由圆弧状转变为斜坡状。

结合电镀前后结构面积变化和镀层侧壁形貌可得,镀层侧壁倾角减小,对应电镀的横向生长增大,结构面积缩小。该电镀结构应用于SiC压力传感器背腔刻蚀时,会导致背腔刻蚀的面积无法达到设计值,压力传感器压敏电阻与敏感膜片的相对位置发生改变,这对SiC压力传感器来说影响很大,会导致灵敏度和频率响应等关键指标变差^[20]。另外侧壁位置的镀层会随着SiC刻蚀的进行而消耗,镀层倾角加大后,横向生长的镀层厚度较薄,最终导致刻蚀的背腔边缘出现斜坡,敏感膜片释放不充分,同样会导致SiC压力传感器输出特性的偏差。

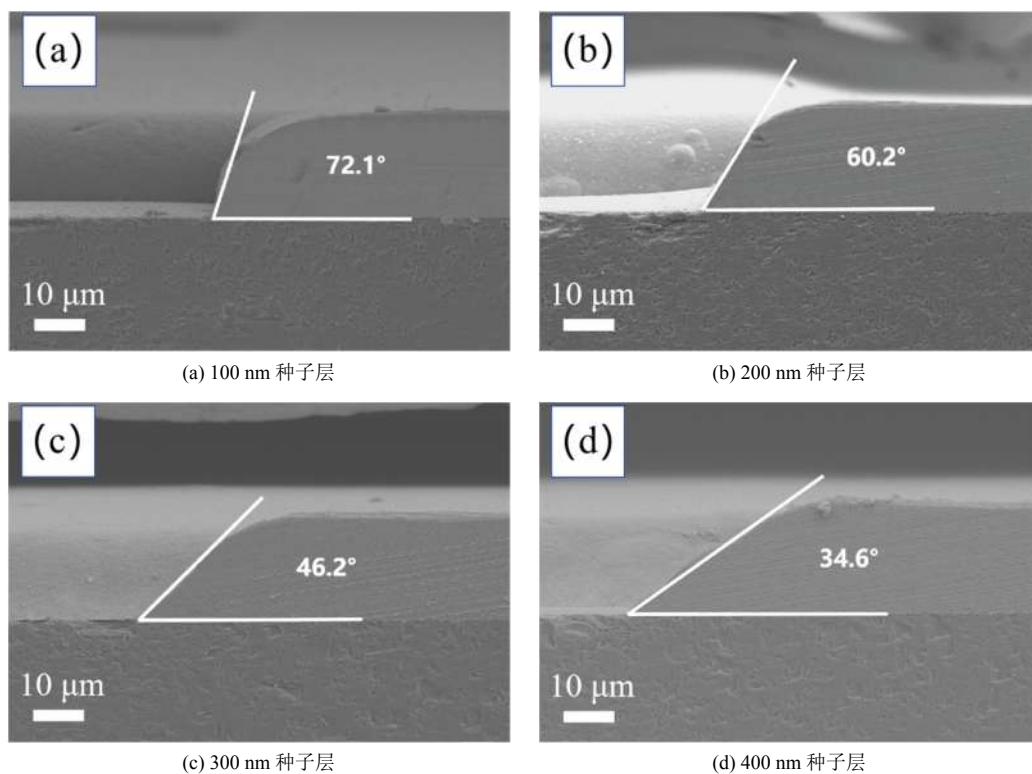


图 10 不同种子层表面镀层侧壁 SEM 图

Fig.10 SEM images of plated sidewalls of different seed layer surfaces

综上所述,种子层厚度的改变直接导致镀层侧壁形貌的变化,种子层厚度为100 nm时,镍的纵向沉积更快,横向生长较小,镀层侧壁呈现圆弧状;随着种子层厚度的增加,横向电沉积速度明显快于纵向沉积速度,且越接近晶圆表面的位置沉积速度越快,镀层侧壁最终呈现斜坡状。对于1 mm×1 mm的结构尺寸,100 nm种子层的镀层侧壁的倾角更大,为72.1°,侧壁更加陡直,结构裸露面积更大,

裸露比为92.5%,横向生长更小,对SiC刻蚀背腔的影响最小。

3 结 论

本文以金为种子层,采用电镀的方式制备SiC刻蚀的厚镍掩膜,探究了种子层厚度对电镀厚镍层的影响。结果表明,电镀镍膜的粗糙度、电镀速率、侧壁形貌对种子层的厚度有很强的依赖性。此外,

随着种子层厚度的增加,镀层的边缘效应和横向生长更加显著,对于制备SiC刻蚀掩膜产生不利影响。采用100 nm金作为种子层电镀可得到更加平整、电镀速率更加均匀、侧壁更加陡直、结构面积偏差更小的镀层,掩膜效果更好。SiC的深刻蚀是制备压力敏感腔的关键工艺,是SiC压力传感器制造的重要一环,而厚镍掩膜的制备则是实现此关键工艺的先决条件。此研究对电镀制备厚镍掩膜有重要意义,为SiC深刻蚀工艺提供基础。

参考文献

- [1] Huang X, Zhang X. Investigating the advanced characteristics of SiC based piezoresistive pressure sensors[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101493.
- [2] 赵洪涛. PN 结温度传感器原理及应用[J]. *电子工程师*, 2006(7): 66-68.
- [3] Han J, Song Y, Tang W, Wang C, et al. Reveal the deformation mechanism of (110) silicon from cryogenic temperature to elevated temperature by molecular dynamics simulation[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(11): 1632-1632.
- [4] Rogers J E, Yoon Y K, Sheplak M, et al. A passive wireless microelectromechanical pressure sensor for harsh environments[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 27(1): 73-85.
- [5] Okojie R S, Lukco D, Chen Y, et al. Reliability assessment of Ti/TaSi₂/Pt ohmic contacts on SiC after 1000 h at 600 °C[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(10): 6553-6559.
- [6] Racka-Szmidt K, Stonio B, Żelazko J, et al. A review: Inductively coupled plasma reactive ion etching of silicon carbide[J]. *Materials*, 2022, 15(1): 123-123.
- [7] 孟祥爽. 欧姆接触对 SiC MOSFET 电学特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [8] 孙亚楠, 石云波, 王华, 等. 碳化硅 ICP 刻蚀的掩膜材料[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(7): 499-504.
- [9] 杨希明, 李晓明, 龚俊锋, 等. 钛铜合金接插件连续电镀及化学镀高磷镍工艺优化[J]. *电镀与涂饰*, 2023, 42(7): 28-36.
- [10] 宫凯勋, 梁庭, 雷程, 等. MEMS 电镀金属掩模工艺研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(11): 27-30.
- [11] 李强, 雷程, 梁庭, 等. 碳化硅表面电镀厚镍工艺研究[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(2): 51-55.
- [12] 李培仪, 王瑞, 雷程, 等. 碳化硅表面电镀速率研究[J]. *电镀与精饰*, 2023, 45(12): 71-77.
- [13] El-Sayed H, Greiner M, Kruse P. Selective electroplating of copper lines on pre-patterned tantalum oxide thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(22): 8962-8968.
- [14] 刘益宏. 4H-SiC 的反应离子刻蚀和电化学刻蚀研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [15] 冯磊, 董经纬, 赖锋, 等. 晶圆电镀装备研发关键技术及其表界面基础[J]. *中国科学: 化学*, 2023, 53(10): 1922-1939.
- [16] 郑宏亮, 刘日富, 陈春华, 等. 图形电镀边缘效应比值研究[J]. *印制电路信息*, 2022, 30(S1): 301-307.
- [17] Luo X B, Zhang S S, Liu Z. Investigating the edge effects of Cu electroplating on the SAMs-coated Si substrate[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, 34(12): 1047-1057.
- [18] Andreatta A G, Lachowicz A, Blondiaux N, et al. Patterning solar cell metal grids on transparent conductive oxides using self-assembled phosphonic acid monolayers[J]. *Thin Solid Films*, 2019, 69(1): 137624-137624.
- [19] Julien G, Agata L, Nicolas B, et al. Selective copper electroplating on patterned self-assembled monolayers for photovoltaic applications[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(10): 15954-15961.
- [20] Baohua T, Haiping S, Lihuan Z, et al. Hermeticity analysis on SiC cavity structure for all-SiC piezoresistive pressure sensor[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 379-379.