

Рисунок 3 – Зависимость времени задержки возбуждения СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

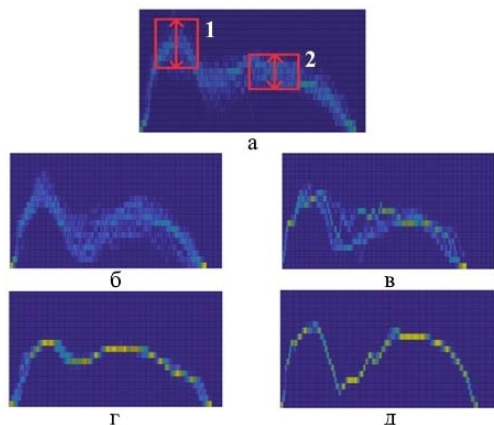


Рисунок 4 – Диаграммы распределения амплитуды импульсов оптического свечения при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционном объеме:

a – без пластин; *б* – 14 200 мм²; *в* – 28 400 мм²; *г* – 42 600 мм²; *д* – 48 100 мм²

Из представленной на рисунке 5 зависимости следует, что при увеличении площади находящейся в области разряда кремниевых пластин наблюдается повышение стабильности (до 4 раз) амплитуды импульсов интегрального оптического свечения плазмы. Рост повторяемости им-

пульсов указывает на повышение стабильности вклада генерируемой магнетроном СВЧ энергии в газовый разряд.

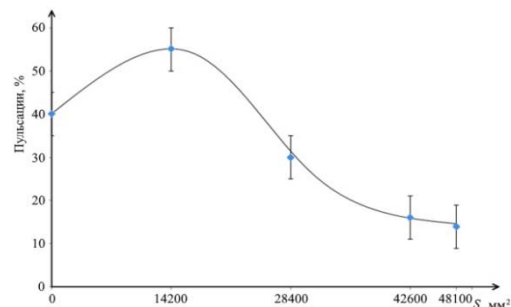


Рисунок 5 – Характер изменения временных нестабильностей оптического свечения плазмы пульсирующего СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

Таким образом, СВЧ плазменный разряд большого объема, формируемый в плазматроне резонаторного типа, характеризуется достаточно высоким уровнем стабильности и способен обеспечить обработку кремниевых пластин диаметром до 200–300 мм, которые широко используются в настоящее время в полупроводниковом производстве.

Литература

1. Бордусов С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Madveika S.I. Theoretical analysis of low vacuum microwave discharge exciting and maintaining conditions in resonator type plasmatron / S.I. Madveika, S.V. Bordusau // Plasma Physics and Technology. – 2015. – V. 2, № 2. – P. 155–158.
3. Investigation of silicon wafers' influence on the local microwave power values in a resonator-type plasmatron/ S. Madveika [et al.] // Plasma Physics and Technology. – 2019. – V. 6, № 3. – P. 239–242.

УДК 621.7.620.186

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Трухан Р.Э.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Кудин Д.В.³, Конеру А.⁴

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

⁴Somnio Global
Новай (Нови)США

Никелевые покрытия, содержащие фосфор, благодаря высокой твердости, износостойкости и коррозионной стойкости, в настоящее время применяют для повышения износостойкости

трущихся поверхностей и защиты от коррозии изделий из стали и цветных металлов, а также защита от электромагнитных помех, в МЭМС [1, 2]. В научно-технической литературе в основ-

ном описаны исследования покрытий NiP, полученных электролитическим и химическим методами [3, 4] и практически отсутствуют сведения о вакуумно-дуговых никелевых покрытиях.

Использование малых добавок фосфора в мишени для распыления приводит к присутствию атомов фосфора на поверхности при формировании покрытия как активных центров кристаллизации и образованию нанокристаллической беспористой структуры.

Внедрение атомов фосфора в кристаллическую решетку Ni в малых количествах (1–2 ат. %) способствует повышению его механических свойств за счет искажений решетки. Свойства вакуумных покрытий могут значительно превосходить электролитические [4].

Целью работы являлось исследование методами атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования морфологии поверхности и механических свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором.

Вакуумно-дуговое никелевое покрытие было нанесено вакуумно-дуговым методом на установке «Булат». Распыляемый катод содержал 6 % фосфора, ток катодной дуги был равен 100 А, напряжение смещения на подложке составляло – 50 В. Покрытие толщиной 2 мкм с концентрацией фосфора 2 ат. % наносили на подложку из нержавеющей стали 08X18H10T.

Поверхность покрытия исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-7001F (JEOL, Япония) с микрорентгеноспектральным анализатором (МРСА).

Морфологию поверхности покрытия исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) со стандартным кремниевым кантилевером типа MPP12120-10 (производство Bruker, США), с радиусом закругления острия 10 нм и жесткостью консоли 4,79 Н/м, в режиме PeakForce QNM. Исследования морфологии и шероховатости поверхности покрытия с использованием АСМ проводилось на полях нескольких размеров.

Измерения микротвердости Н и модуля упругости Е проводились на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (США) с предварительным сканированием поверхности путем внедрения алмазной пирамиды Берковича с радиусом кривизны острия 150 нм с регистрацией 10 деформационных кривых зависимости глубины внедрения от приложенной нагрузки. Нагрузка составляла 5 мН.

По результатам исследования установлено, что на поверхности наблюдаются сферические образования диаметром около 4 мкм, также наблюдаются и более крупные образования с размерами 8 мкм в ширину и 13 мкм в длину

(рисунок 1). При исследовании морфологии поверхности методом АСМ определена шероховатость (Ra, Rq, Rz) на покрытии на полях разных размеров от 60×60 до 1×1 мкм² (таблица 1).

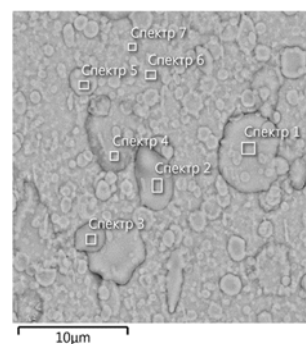
Таблица 1 – Шероховатость поверхности покрытия, полученная методом АСМ

Размер поля, мкм	Ra, нм	Rq, нм	Rz, нм
60×60	121,0	191,0	602,0
40×40	96,3	153,0	349,0
10×10	35,0	49,8	787,0
3×3	17,9	25,4	63,1
1×1	11,4	14,2	32,5

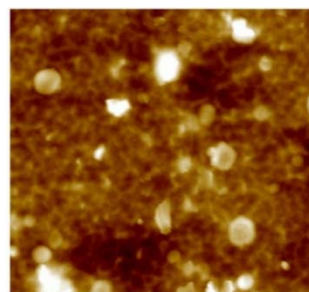
По результатам МРСА установлено, что на поверхности покрытия присутствует несколько фаз, различающихся составом (рисунок 1, а, таблица 2). Некоторые частицы (спектры 1, 4, 6 и 7 на рисунке 1, а) и основная поверхность состоит практически из никеля. Другие частицы (спектры 2, 3, 5 на рисунке 1, а) имеют в своем составе, помимо никеля, фосфор.

Таблица 2 – Данные МРСА

Спектр	P	Cr	Fe	Ni
1	3,09	1,29	4,55	91,07
2	10,31	0,99	4,28	84,42
3	9,17	1,10	4,53	85,20
4	2,41	0,52	4,09	92,98
5	4,86	0,99	4,35	89,80
6	1,43	1,03	4,80	92,74
7	1,64	1,0	5,05	92,15



а



б

Рисунок 1 – Изображения поверхности покрытия NiP:
а – СЭМ с указанием мест анализа МРСА;
б – АСМ

Различия в химическом составе областей на поверхности покрытия вызваны разным содержанием в них фосфорной составляющей. Это приводит к тому что как модуль упругости, так и микротвёрдость имеют такое различие в значениях. По результатам наноиндентирования установлено различие в модуле упругости E и микротвёрдости H на различных фазах от 57 до 228 ГПа и от 2,6 до 9,1 ГПа соответственно. Это свидетельствует о том, что на поверхности покрытия присутствуют различные фазы. Также определены упругая и пластическая составляющие деформации при индентировании на различных фазах. Эти данные получены на основе кривых наноиндентирования. Полученные результаты соответствуют результатам работы [6] о взаимосвязи микроструктурного состояния поверхности и механических свойств покрытия.

Заключение. Методом атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования проведены исследования морфологии поверхности и механических свойств никелевого покрытия, легированного фосфором. По результатам исследования методом АСМ установлено, что на поверхности покрытия содержится большое количество частиц различных размеров. Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что на поверхности покрытия несколько фаз, различающихся содержанием фосфора.

Исследование механических свойств проводили на различных фазах. По результатам НИ установлено существенное отличие в значениях

модуля упругости E и микротвёрдости H из-за содержания фосфора.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф20М-083)

Литература

1. Вопросы изнашивания NiP покрытий / И.Р. Асланян, Л.Ш. Шустер // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Механика и машиностроение. – 2011. – Т. 13, №4(3). – С. 951–954.
2. S Chizhik, Micro and Nanoscale Wear Studies of HDD Slide Bearings By Atomic Force Microscopy / S Chizhik, A Khudoley, T Kuznetsova, K Wierzcholski, A Miszczak // 2010, Proceedings of Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy, Heat and Mass Transfer Institute of NAS, pp 247–252.
3. Microgroove machining on crystalline nickel phosphide plating by single-point diamond cutting / Y. Liu, W. Zhao, T. Zhou, X. Liu, X. Wang // Int J Adv Manuf Technol. – 2017. – Vol. 91. – P. 477 – 484.
4. Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings / M. Palaniappa, S.K. Seshadri // Wear. – 2008. – Vol. 265. – P. 735–740.
5. Kuznetsova T.A., Andreev M.A., Markova L.V., Chekan V.A. Wear resistance of composite chrome coatings with additives of ultradispersed diamonds // Journal of Friction and Wear. – 2001 (22), № 4, pp. 423–428.
6. Углов В.В. Взаимосвязь микроструктурного состояния поверхности и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмо-усиленным химическим вакуумным осаждением / Углов В.В и др. // Перспективные материалы. – 2003. – № 6. – С. 5–11.

УДК 621.3.049

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ МОНТАЖЕ НА ПОДЛОЖКУ

Ланин В.Л., Достанко А.П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Монтаж кристаллов интегральных схем в корпус или на подложку должен обеспечить высокую прочность соединений при термостабильности и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений.

В настоящее время для монтажа кристаллов широко используются методы вибрационной эвтектической пайки поверхности кристалла к основанию корпуса с использованием припоя Au–Si и золотого покрытия соединяемых элементов [1]. Для обеспечения необходимой смачиваемости припоем и предотвращения окисления в процессе пайки используют формирующий газ на основе смеси 10 % водорода и 90 % азота. Нанесение припоя на подложку осуществляется

дозированием проволоки припоя или паяльной пасты, либо припойными прокладками.

Монтаж кристалла на эвтектической сплавной пайке помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и подложки в кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов на последующих технологических операциях и испытаниях, а также к снижению надежности приборов. Установлено, что основными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются: отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микро-