

Рисунок 2 – АСМ-изображения поверхности оксида алюминия ($2 \times 2 \text{ мкм}^2$)

Немаловажной характеристикой материала является адгезионная, так как существует высокий риск образования тромбов на имплантируемом материале. Значения силы адгезии и удельной поверхностной энергии были определены на полях сканирования $5 \times 5 \text{ мкм}$ и $10 \times 10 \text{ мкм}$ (таблица 1) [6]. Установлено, что напыление пленки оксида тантала на нержавеющую сталь приводит к уменьшению значений силы адгезии на 61%. Поверхностная энергия при этом составляет $0,42 \text{ мДж/м}^2$. Сила адгезии алюмооксидной пленки значительно выше танталовой и составляет $58,03 \text{ нН}$. Следовательно, данное покрытие менее подходит для медицинского применения.

Таблица 1 – Значения силы адгезии и удельной поверхностной энергии оксидных пленок тантала и алюминия на металлических подложках

Образец	$F_{adh}, \text{ нН} \pm 10 \%$		$\gamma, \text{ мДж/м}^2$	
	$5 \times 5 \text{ мкм}$	$10 \times 10 \text{ мкм}$	$5 \times 5 \text{ мкм}$	$10 \times 10 \text{ мкм}$
Сталь 316 L SS	56,19	49,99	1,19	1,06
Ta ₂ O ₅ / (316 L SS)	36,93	19,69	0,78	0,42
Al ₂ O ₃ / (алюминиевый сплав Д16)	84,91	58,03	1,80	1,23

Заключение. В результате проведенных исследований поверхности стали и алюминиевого сплава с напыленными пленками оксидов тантала и алюминия методом атомно-силовой микро-

скопии установлено, что структура полученных покрытий существенно отличается.

Для пленки оксида тантала на нержавеющей стали характерна плотная гладкая поверхность, для оксида алюминия – нанозернистая микроструктура. Методом АСМ было зафиксировано снижение силы адгезии на 61% после нанесения оксида тантала на нержавеющую сталь, что в дальнейшем позволит уменьшить агрегацию тромбоцитов на поверхности имплантатов. Сила адгезии на поверхности алюмооксидной пленки составила $58,03 \text{ нН}$.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т20УКА-030)

Литература

1. Mahapatro A. Bio-functional nano-coatings on metallic biomaterials / A. Mahapatro // Materials Science and Engineering: C. – 2015. – Vol. 55. – P. 227–251.
2. Davis J.R. Handbook of Materials for Medical Devices / J.R. Davis. – USA: ASM International, 2003. – 341 p.
3. 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.
4. Михайлов В.И. Получение и физико-химические свойства материалов на основе нанодисперсных оксидов алюминия и железа (III): дис. канд. хим. наук: 02.00.04 / В.И. Михайлов. – Сыктывкар, 2016. – 129 с.
5. Новак А.В. Шероховатость пленок аморфного, поликристаллического кремния и поликристаллического кремния с полусферическими зёрнами / А.В. Новак, В.Р. Новак // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 19. – С. 32–40.
6. Кузнецова Т.А. Микронды для определения силы адгезии и удельной поверхностной энергии методом атомно-силовой микроскопии / Т.А. Кузнецова, Н.В. Чижик, Т.И. Ширяева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1 (6). – С. 41–45.

УДК 533.9.082.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА СВЧ РАЗРЯД В ПЛАЗМОТРОНЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

Мадвейко С.И., Тихон О.И., Тодин П.А., Бордусов С.В., Достанко А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время технология плазменной обработки полупроводниковых материалов является неотъемлемой частью технологического процесса изготовления современных устройств микро- и нанoeлектроники. В связи с ростом масштабов производства в промышленности осуществляется переход на обработку кремниевых подложек всё большего диаметра, что обуславливает необходимость разработки, применения и исследования характеристик плазменных

источников, способных обеспечивать качественное выполнение технологических операций на поверхностях большой площади.

Одним из методов плазменной обработки является использование нестационарного сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда. Выполнение современных требований, предъявляемых к новому СВЧ плазмохимическому технологическому оборудованию, осуществляется за счет применения в его конструкции объемных резонаторов.

Конструктивные решения резонатора, являющиеся системой формирования СВЧ поля, позволяют обеспечить формирование СВЧ разряда большого объёма при использовании магнетронов средней мощности [1]. Конструкция разрядного узла и характеристические размеры разрядного объёма в совокупности с прочими факторами (величина подводимой СВЧ мощности, тип волны, давление, тип рабочего газа и др.) оказывают влияние на пробойные условия газового разряда. Величина пробивной напряженности электрического поля в объемном резонаторе $E_0 = 110$ В/см для среднего вакуума может достигаться уже при мощностях свыше 50 Вт [2].

Целью проводимых исследований являлось изучение влияния площади кремниевых пластин, помещённых в объём крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона, на особенности формирования СВЧ разряда и его временные нестабильности.

Для проведения исследования использовалась экспериментальная СВЧ вакуумно-плазменная установка резонаторного типа. Схематическое изображение реакционно-разрядной системы установки представлено на рисунке 1 [1]. В центре объемного резонатора размером $40 \times 40 \times 30$ см располагается выполненная из кварцевой трубы камера диаметром 20 см вакуумируемая разрядная камера длиной 34 см, в которую помещались Si пластины толщиной 0,5 мм. Для генерации вводимой в резонатор через прямоугольное отверстие связи электромагнитной энергии используется СВЧ магнетрон М-105 с рабочей частотой 2,45 ГГц и средней рабочей мощностью 650 Вт.

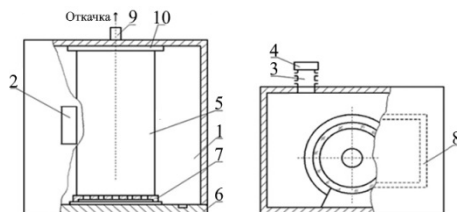


Рисунок 1 – Реакционно-разрядная система СВЧ плазменной установки:

1 – резонатор; 2 – отверстие связи; 3 – волновод; 4 – магнетрон; 5 – реакционно-разрядная камера; 6 – передняя стенка резонатора; 7 – передняя крышка камеры; 8 – смотровое окно; 9 – патрубок для откачки; 10 – задняя крышка камеры

В качестве плазмообразующей среды использовался атмосферный воздух, давление в разрядной камере устанавливалось на уровне 240 Па. При проведении экспериментов регистрировались сигналы анодного напряжения и анодного тока СВЧ магнетрона. Также снимались представленные на рисунке 2 уровни СВЧ электромагнитного переизлучения из резонаторной камеры и оптического свечения плазмы СВЧ разряда при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционно-разрядном

объёме плазмотрона. Для фиксации уровня переизлучения была использована рупорная антенна, оптический сигнал регистрировался с помощью фотозлектронного умножителя.

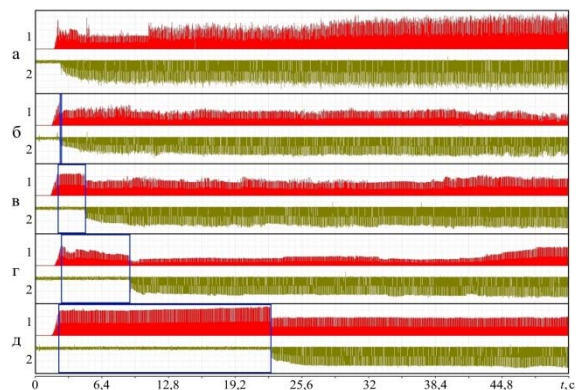


Рисунок 2 – Осциллограммы сигналов уровня электромагнитного переизлучения (1) и оптического свечения СВЧ плазмы (2) при различной площади поверхности обрабатываемых кремниевых пластин: а – без пластин; б – 14 200 мм²; в – 28 400 мм²; г – 42 600 мм²; д – 48 100 мм²

Генерация плазмы СВЧ разряда происходит при достижении в объёме резонатора определенной величины напряженности электрической составляющей электромагнитного поля. Однако при помещении в плазму объектов обработки необходимо учитывать «эффект загрузки» рабочей камеры. В частности, пластины монокристаллического кремния, расположенные в области СВЧ плазмообразования оказывают влияние на процесс формирования плазмы. Это связано с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь Si пластин, что приводит к частичному поглощению ими СВЧ мощности как на стадии возбуждения плазмы СВЧ разряда, так и в процессе её поддержания [3]. Экспериментально установлено, что увеличение площади обрабатываемых кремниевых пластин при неизменных условиях электропитания СВЧ магнетрона приводит к увеличению времени задержки процесса плазмообразования (рисунок 3). Причиной этого может являться расходование СВЧ энергии на нагрев пластин, при котором происходит уменьшение их удельного сопротивления.

Было проведено поимпульсное изучение величины и формы сигналов интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда в различные моменты времени процесса плазмообразования в зависимости от площади поверхности кремниевых пластин в зоне обработки. Полученные результаты представлены в виде диаграмм распределения на рисунке 4. Также был выполнен анализ разброса амплитуды импульсов осциллограмм интегрального оптического свечения плазмы СВЧ на участке 2 (рисунок 4, а). Характер изменения временных нестабильностей оптического свечения приведён на рисунке 5.

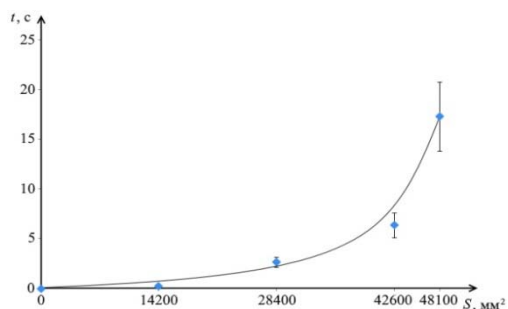


Рисунок 3 – Зависимость времени задержки возбуждения СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

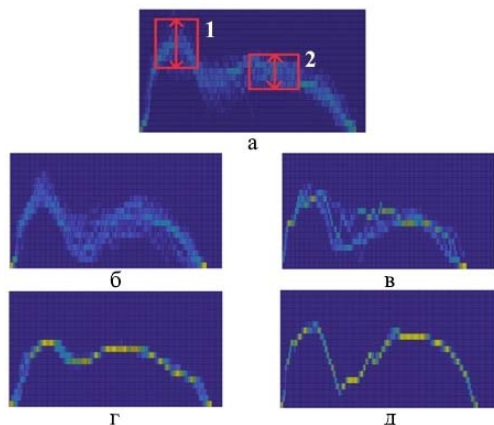


Рисунок 4 – Диаграммы распределения амплитуды импульсов оптического свечения при различной площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционном объеме:

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.

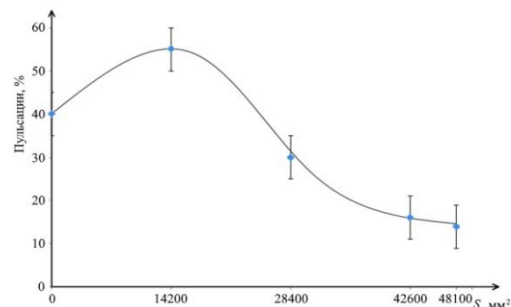


Рисунок 5 – Характер изменения временных нестабильностей оптического свечения плазмы пульсирующего СВЧ разряда от площади поверхности Si пластин, размещенных в реакционной камере

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 (Novi)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-