Министерство высшего образования и науки Российской Федерации Министерство образования и науки Республики Татарстан Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ

Казанский (Приволжский) федеральный университет Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН» Академия наук Республики Татарстан

І ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР»

Сборник трудов г. Казань, 2-5 декабря 2020 г.

> Казань Издательство «Бук» 2020

УДК 533.9+620.3(063) ББК 22.333+30.600.3 П26

Под редакцией член-корр. Академии наук РТ, профессора, доктора физико-математических наук Б. А. Тимеркаева

П26 **І Всероссийская конференция с международным участием «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»** : сборник трудов / М-во высшего образования и науки Рос. Федерации, М-во образования и науки Респ. Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т и др.]. — Казань : Бук, 2020. — 214 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-00118-671-7.

Материалы конференции предназначены для специалистов, в области физики газоразрядной плазмы, наноматериалов и нанотехнологий. Могут быть полезны для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

> УДК 533.9+620.3(063) ББК 22.333+30.600.3

Организационный комитет

Сопредседатель: Тимеркаев Борис Ахунович,

член-корр. АН РТ, д.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ

Сопредседатель: Гильмутдинов Альберт Харисович,

академик АН РТ, д.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ

Зам. председателя: Файрушин Ильназ Изаилович,

к.т.н., ОИВТ РАН, КФУ

Гайсин Ф.М. – д.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ

Галеев И.Г. – д.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ

Даутов Г.Ю. – член-корр. АН РТ, д.т.н., КНИТУ-КАИ

Исрафилов И.Х. – д.т.н., НИ КФУ

Кудрявцев А.А. – к.ф.-м.н., СПбГУ

Кустова Е.В. – д.ф.-м.н., СПБГУ

Лебедев Ю.А. – д.ф.-м.н., ИНХС РАН им. Топчиева

Мокшин А.В. – д.ф.-м.н., КФУ

Рамазанов К.Н. – д.т.н., УГАТУ

Сайфутдинов А.И. – к.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ

Салахов М.Х. – академик АН РТ, д.ф.-м.н., АН РТ

Смоланов Н.А. – к.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарева

Струнин В.И. – д.ф.-м.н., ОмГУ

Тагиров Л.Р. – член-корр. АН РТ, д.ф.-м.н., КФТИ им. Завойского

Тагиров М.С. – член-корр. АН РТ, д.ф.-м.н., КФУ

Тазмеев Х.К. – к.т.н., НИ КФУ

Файзрахманов И.А. – д.ф.-м.н., КФТИ им. Е.К. Завойского

Шаехов М.Ф. – д.т.н., КНИТУ

Шайхитдинов Р.З. – д.ф.-м.н., БГУ

Предисловие

В городе Казани со 2 по 5 декабря 2020 года на базе Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ состоялась Первая всероссийская конференция международным участием «Газоразрядная плазма синтез рамках данного мероприятия наноструктур». В состоялся исследовательским опытом как экспериментаторов, так и теоретиков, занимающихся физикой газовых разрядов, моделированием процессов в газоразрядной плазме, синтезом наноструктур, физико-химическими газе, процессами плазме И газовых разрядах. явлениями самоорганизации в плазме, взаимодействием плазмы с веществом, И лазерными нанотехнологиями, плазмохимией плазмодинамикой. На конференции были заслушаны 7 пленарных и 35 устных докладов. Состоялась стендовая сессия, в которой были представлены 26 докладов. Сделанные в рамках конференции доклады отразили современное состояние науки в области физики газоразрядной плазмы и синтеза наноструктур. Участников конференции объединил интерес к обсуждаемым проблемам. Конференция стала продуктивной площадкой для обмена идеями и ознакомления с новыми результатами из смежных областей фундаментальной и прикладной науки. Участие большого количества молодых ученых свидетельствует о преемственности научных традиций в представленных на конференции научных школах.

Председатель оргкомитета Б.А. Тимеркаев Зам. председателя оргкомитета И.И. Файрушин

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ, СТРУКТУРЫ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНЫМ СОСТАВОМ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Баранова Л.В.^{1, 2*}, Струнин В.И.^{1, 2**}, Чириков Н.А.^{2, 3}

Аннотация: Для обеспечения оптимального сочетания свойств тонкопленочных слоев пьезоэлектрических структур и достижения требуемых характеристик при разработка конструкции и создании рабочей модели резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ) в СВЧ диапазоне электрических сигналов исследовано влияние технологических режимов формирования пленок нитрида алюминия на морфологию поверхности, структуру и элементный состав пленок, определены оптимальные режимы. **УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ** требованиям пленочным К слоям для пьезоэлектрического преобразователя и брэгговского отражателя. Определено, что пленки нитрида алюминия, формируемые методом магнетронного распыления методами магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере азота и аргона (при расходе 4 cm³/min - Ar и 5 cm³/min - N₂) при температурах подложки 350⁰С и давлении в камере 0,07 Па получаются более высокого качества при при мощности на мишени в 400 Вт, а пленки алюминия, формируемые при постоянной мощности на мишени 900 получаются более высокого качества при температуре подложки 100 °C. Показано, что в пленках нитрида алюминия чрезмерно превышена стехиометрия AI, что свидетельствует о том, что необходимо дорабатывать технологию роста в камере магнетрона, в том числе, меняя технологические параметры роста, а также необходимо устранить все возможные причины загрязнения пленок, возникающие в процессе роста плёнок, возможные утечки газов, в том числе атмосферного воздуха, уровень вакуума и чистоту прекурсоров.

І. Введение. В современной электронике фильтры и резонаторы на акустических волнах различных типов объемных, поверхностных и

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Российская Федерация

²Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, Омск, Российская Федерация

³Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

др. являются одним из важнейших компонентов. Наиболее широко сегодня применяются резонаторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) за счет того, что они обладают воспроизводимостью и совместимы с массовыми технологиями в микроэлектронике. Для того, чтобы продвинуться в гигагерцовую область необходимо было не только менять технологические подходы, но и менять материалы, используемые для этих целей. Поэтому стали активно исследовать тонкопленочные резонаторы и резонаторы с брэгговской отражательной структурой, где в качестве резонансного элемента использовали пьезоэлектрическую пленку из нитрида алюминия AIN или оксида цинка ZnO, возбуждаемую на основном резонансе, при этом удается обеспечить возбуждение таких резонаторов на высших обертонах и получить наиболее высокие операционные частоты [1-3]. Для таких типов устройств технология тонких пленок AIN имеет важное значение. микроэлектронике нитрид алюминия широко применяется резонаторах. датчиках, фильтрах И других **устройствах** поверхностных акустических волн за счет высокой скорости распространения звука, температурной стабильности и высокого электромеханического коэффициента связи, а также благодаря уникальному сочетанию его следующих физических характеристик: теплопроводность, достаточно большая запрещенной зоны, высокая устойчивость к термоударам и устойчивость при нагреве в инертных средах, низкий температурный коэффициент линейного расширения, высокие значения диэлектрической относительной проницаемости **удельного** сопротивления [4-6]. Дальнейшее развитие приборов и устройств микроэлектроники на основе пленок нитрида алюминия связано с применением методов и технологий их формирования, отвечающих требованиям широкого промышленного использования: простая реализация. воспроизводимость техническая параметров. возможность перенесения технологии получения другие установки. Исследование технологических процессов, позволяющих получать материалы с заданными свойствами, является одним из главных направлений такого развития. В свою очередь для решения этой задачи необходимо контролировать и управлять свойствами получаемых пленок, находить их взаимосвязь с технологическими режимами и процессами осаждения [7]. В связи с вышеизложенным, процессов формирования тонких пленок исследование определение наиболее оптимальных режимов их формирования, представляет научный и практический интерес.

II. Постановка задачи. Заметно изменить технологию получения слоистых структур на основе AIN и повысить эффективность технологических процессов станет возможным при успешном решении актуальной с научной и прикладной точек зрения задачи

определения режимов формирования наиболее качественных пленок, возможности контролирования и управления свойствами получаемых пленок.

Цель исследования: определение физических процессов формирования тонких пленок нитрида алюминия методом магнетронного распыления алюминиевой мишени в атмосфере смеси азота и аргона, их взаимосвязь с технологическими режимами.

Основной задачей, решаемой в данной работе было исследование качественного анализа поверхностей пленок алюминия и нитрида алюминия, определение их элементного состава и характеристик шероховатостей поверхностей, нахождение взаимосвязи свойств пленок с процессами и технологическими параметрами магнетронного осаждения, определение режимов формирования.

- **III. Методика эксперимента.** При выполнении работы использовались следующие методы:
- 1. Получение пленочных слоев пьезоэлектрических структур осуществлялось методами магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере азота и аргона (при расходе $4~cm^3/min$ Ar и $5~cm^3/min$ N_2) на установке нанесения многокомпонентных покрытий STEMS116-01. Пленки алюминия осаждались на подложки из ситалла, пленки нитрида алюминия на алюминиевые подложки. Давление в камере составляло $0,07~\Pi a$.
- 2. Для исследования морфологии поверхности пленок, определения их элементного состава и шероховатости использовались методы атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии.
- В таблице 1 представлены технологические параметры формирования исследуемых пленок AIN иAI. Пленки 1.1. и 1.2. отличаются тем, что первая осаждалась на алюминиевую подложку после ее 20-минутного травления, а вторая без травления.

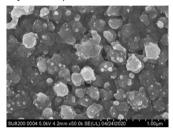
№ обр.	Поток Ar,sccm	Поток N _{2,} sccm	Давление, Па	Температура подложки, ⁰ С	Мощность на мишени, Вт
1.1	4	5	0.07	350	700
1.2	4	5	0.07	350	700
2.	4	5	0.07	350	500
3.	4	5	0.07	350	600
4.	4	5	0.07	350	700
5.	4	5	0.07	350	800
6.	4	5	0.07	350	900
7.	4	5	0.07	350	400
1-AI	10	0	0.07	100	900
2-Al	10	0	0.07	150	900
3-AI	10	0	0.07	200	900

Таблица 1. Режимы напыления пленок нитрида алюминия и алюминия.

Измерения пленок проводились на базе ЦКП «Высокие технологии и новые материалы» Новосибирского государственного университета и в ИФП СО РАН. Изображения поверхностей пленок, а также информация о составе и других свойствах пленок анализировалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе HitachiSU8280 при ускоряющем напряжении электронного пучка 5 кВ с очень высоким разрешением.

IV. Результаты экспериментов и обсуждение

Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) были сделаны снимки морфологии поверхностей образцов толщиной 1 мкм (рисунок 1-3).



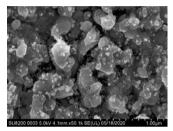
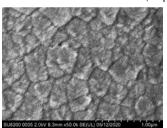


Рисунок 1. Морфология поверхности пленок алюминия (слева образец №1-AI , справа -№2- AI).



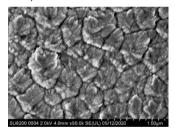
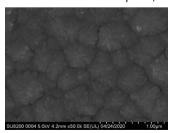


Рисунок 2. Морфология поверхности пленок нитрида алюминия (слева образец №1.1, справа №1.2)



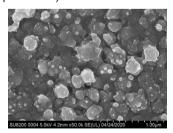


Рисунок 3. Морфология поверхности пленок нитрида алюминия (слева образец №3, справа образец №5).

На изображениях можно различить особенности рельефа масштабом менее десяти нанометров в плоскости. Поверхность очень развитая, множество торчащих объектов изломано-круглой формы. По изображению рельефа поверхности пленок можно оценить размеры и форму зёрен, их равномерность распределения по поверхности. Объекты на поверхности визуально имеют зернистую цветковидную форму с диаметром порядка 400 нм и состоят из ~10 лепестков длиной ~200 нм и толщиной ~80 нм. На поверхности наблюдаются «шапочки» предполагаемых вытянутых от подложки вертикальных кристаллитов.

Как видно из рисунка 2, на морфологию поверхности пленок не повлиял отжиг поверхности подложки перед осаждением на нее пленки нитрида алюминия.

После снимков морфологии поверхности методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) был произведён элементный анализ поверхности образцов. Было проведено элементное картирование («химический маппинг») пленок, которое показало, что во всех пленках алюминий достаточно равномерно распределён по поверхности, в составе поверхности он почти не конкурирует с другими элементами. Кроме ожидаемых в составе пленок алюминия и азота, обнаружено большое количество кислорода и углерода. Наиболее интенсивный сигнал по углероду наблюдался на торчащих вверх неровностях поверхности. Кислород обнаружен в основном по краям неровностей. При этом он распределён более равномерно, нежели углерод, ввиду того, что неровностей очень много.

Nº	Al		N		0		С		0	
	Весов ые %	Доля (атомн ая)%	Весов ые %	Доля (атомн) %	Весов ые %	Доля (атомн ая)%	Весов ые %	Доля (атомн ая)%	Весов ые %	Доля (атомн ая)%
1.1	46,66	53,47	12,77	28,19	2,81	7,23	5,19	10,03	2,21	1,07
1.2	42,74	52,7	12,05	28,61	2,66	7,36	4,94	10,28	2,01	1,05
2.	46,41	54,07	12,9	28,95	2,74	7,18	4,29	8,44	2,73	1,35
3.	45,37	54,37	11,25	25,98	2,88	7,76	5,32	10,75	2,23	1,14
4.	46,61	56,19	13,4	31,12	2,84	7,69	1,96	3,98	2,01	1,03
5.	46,0	54,89	13,99	32,16	3,12	8,35	1,49	3,01	3,08	1,56
6.	№6	4,41	3,14	1,17	1,60	5,25	8,42	49,11	59,08	4,41
7.	№7	4,19	2,94	1,3	1,77	5,78	9,13	50,92	60,35	4,19
1- Al	74,95	83,52	0,12	0,25	3,15	7,89	3,55	6,68	2,72	1,28
2- Al	60,95	80,75	0,41	1,04	3,31	9,86	3,32	7,41	1,54	0,87
3- <i>AI)</i>	53,8	67,09	1,75	4,2	2,77	7,75	8,98	18,89	3,91	2,07

Таблица 2. Элементный состав пленок.

Данные элементного состава пленок (в весовых и атомных %) приведены в таблице 2.

Анализируя значения, представленные в таблице, мы видим, что в пленках нитрида алюминия нарушена стехиометрия - доля атомов алюминия составляет ~54%, а доля атомов азота ~26%. В алюминиевых пленках доля атомарного AI тоже не 100%, как должно быть, а порядка 83,5%, причем, с ростом температуры подложки процентное содержание атомов алюминия в составе пленки уменьшается.

Кроме атомов алюминия и азота в составе пленок обнаружен кислород, углерод и медь. Процентное содержание кислорода в пленках нитрида алюминия ~10%, в пленках алюминия ~7%. Для существенное ппенок апюминия наблюдается количества кислорода с ростом температуры подложки. Кислород обнаружен по краям неровностей. При этом он распределён более равномерно, нежели углерод, ввиду того, что неровностей достаточно много. Наличие кислорода может быть объяснено прокислением алюминия, которое оказывалось более интенсивным для неровностей на поверхности. Выпирающие части обладают развитой поверхностью и поэтому большей энергией поверхности, которая облегчает химическую реакцию окисления в газовой среде сильного окислителя, кислорода. Окисление могло произойти и в первые секунды после вскрытия камеры. Кроме перечисленных элементов в пленках, как Al. так и AlN наблюдается ~8% углерода. который в основном распределён равномерно, за исключением нескольких участков на поверхности. Больше всего атомов углерода неровностях поверхности. Часть углерода, аналогично с кислородом могла попасть на поверхность пленки не во время осаждения, а после. в результате методики элементного картирования.

В пленках также содержится небольшое количество, около 1% меди, причиной мог послужить материал держателя подложки. Таким образом следует отметить, что причины попадания паразитных примесей не обязательно связаны с процессами, происходящими в ростовой камере, существует большая вероятность их внедрения в состав пленки в процессе проведения измерений.

Для исследования морфологии поверхности пленки и сравнения значения шероховатостей измерялись топографии образцов по АСМ-изображениям поверхностей пленок нитрида алюминия, снятых с помощью микроскопа HT-MДТ СолверНекст с размером изображений 10x10 мкм и разрешением 512x512 точек.

По двухмерному изображению рельефа поверхности пленок можно оценить размеры зёрен, их равномерность распределения по поверхности, равномерность их формы и размеров.

На поверхности наблюдается зернистая структура, видны основания столбчатой структуры. Морфология поверхности пленок нитрида алюминия представляет нано-кристаллическую поверхность с размерами зерен 50-100 нм, высота нанопиков достигает 8 нм.

В программе обработки C3M-данных "ImageAnalysis 3.2.4 10128" были определены значения Ra - среднеквадратичной шероховатости по поверхности (объёмной), Rq - средней шероховатости по профилю (по линии).

Шероховатость как по поверхности, так и по профилю для пленок нитрида алюминия увеличивается с ростом мощности на мишени, она минимальна при мощность на мишени в 400 Вт и максимальна при мощность на мишени в 900 Вт. Для пленок алюминия растет с ростом температуры подложки, минимальна при температуры подложки 100 °C и максимальна при температуры подложки 200 °C.

VI. Выводы и заключение

Проведены исследования влияния технологических режимов формирования пленок нитрида алюминия морфологию поверхности, структуру и элементный состав пленок, используемых в конструкции микроэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем. полученных С использованием магнетронного реактивного распыления. Методами растровой электронной микроскопии атомно-силовой микроскопии исследована морфология поверхности, определен элементный состав тонких пленок алюминия и нитрида алюминия, рассчитаны значения Ra среднеквадратичной шероховатости по поверхности (объёмной), Rq - средней шероховатости по профилю (по линии), полученных методом магнетронного распыления.

Расчеты шероховатостей поверхностей показывают, что напыление пленок нитрида алюминия с минимальной шероховатостью происходит при мощности на мишени в 400 Вт, пленок алюминия при температуре подложки 100 °C.

Показано, что в пленках нитрида алюминия чрезмерно превышена стехиометрия AI, что свидетельствует о том, что необходимо дорабатывать технологию роста в камере магнетрона, в том числе, меняя технологические параметры роста, а также необходимо устранить все возможные причины загрязнения пленок, возникающие в процессе роста плёнок, возможные утечки газов, в том числе атмосферного воздуха, уровень вакуума и чистоту прекурсоров.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ РАН на 2013-2020 годы (проект АААА-А19-119052890058-2).

Авторы благодарят сотрудников ЦКП ВТАН НГУи ИФП СО РАН за помощь в проведении измерений.

Литература:

- [1] Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S., Bormashov V.S., Golovanov A. V., Burkov S.I., Blank V.D. Excitation of hypersonic acoustic waves in diamond-based piezoelectric layered structure on the microwave frequencies up to 20 GHz / / Ultrasonics. 2017 V. 78 P. 162-165.
- [2] Lakin KM.Thin film resonator technology / / IEEE Trans. Ultrason. Fcrroelectr. Freq. Control. 2005. V. 52 № 5 P. 707-716
- [3] Zhang H., Pang W, Yu H., Kim E.S. High-tone bulk acoustic resonators on sapphire, crystal quartz, fused silica, and silicon substrates // J. Appl. Phys. 2006. V. 99 P. 124911
- [4] Zhao C., Montaseri M.H., Wood G.S., Pu S.H., Seshia A.A., Kraft M. A review on coupled MEMS resonators for sensing applications utilizing mode localization // Sensors and Actuators A. Phys. 2016. V. 249. P. 93–111
- [5] Zywitzki O., Modes T., Barth S., Bartzsch H., Frach P. Effect of scandium content on structure and piezoelectric properties of AlScN films deposited by reactive pulse magnetron sputtering // Surf. Coatings Technol. 2017. V. 309. P. 417–422
- [6] Lozano M.S., Chen Z., Williams O.A., and Iriarte G.F. Temperature characteristics of SAW resonators on Sc0.26Al0.74N/polycrystalline diamond heterostructures // Smart Mater. Struct. 2018. V. 27. P. 0–8
- [7] Б. И. Сорокин, А. С. Новоселов, Г. М. Квашнин, Н. В. Лупарев, Н. О. Асафьев, А. Б. Шипилов, В. В. Аксёненков. Разработка и исследование композитных акустических резонаторов со структурой «Al/(Al,Sc)N/Mo/алмаз» с высокой добротностью на СВЧ //Акустический журнал, 2019, том 65, № 3. с. 325-331
- [8] Сартаков А.В., Худайбергенов Г. Ж. Моделирование кинетики электронного газа азот -алюминиевой плазмы тлеющего разряда // Вестн . Омского ун-та. 2009. № 4. С. 80–81.

^{*} baranovalv@omsu.ru

^{**} strunin@omsu.ru

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Мяконьких А.В.^{1*}, Руденко К.В.^{1**}

¹Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, 117218 Москва, Россия

Минимальные топологические размеры В современных интегральных приборах наноэлектроники достигли величины 7 – 10 нм, толщина ряда функциональных слоев, составляющих прибор еще меньше – до 2-3 нм. Технологии, обеспечивающие как осаждение, так и анизотропное структурирование слоев с точностью в один атомный монослой и перенос размера маски с минимальным горизонтальным отклонением объединены общим термином ASP Scale Processing). B целом. объем технологий применением низкотемпературной плазмы при изготовлении УБИС достигает 50% от числа операций; им нет альтернатив в рамках существующих тенденций.

Метод атомно-слоевого осаждения (ALD) тонких пленок был изобретен в СССР под названием молекулярное наслаивание [1] и развивался с середины 1970-х годов. Однако наиболее бурное развитие эта тонкопленочная технология, в том числе с использованием низкотемпературной плазмы, получила в 2000-х годов. Микроэлектронике, трансформировавшейся к этому времени в наноэлектронику, стали необходимы контролируемые технологии роста слоев функциональных материалов с уровнем точности в доли нанометра. Одновременно значительно расширился спектр используемых материалов - диэлектриков и металлов в приборах наноэлектроники.

Очень важной для применений в наноэлектронике оказалась конформность ALD-пленок, т.е. независимость толщины от угловой ориентации поверхностей наноструктуры к плоскости подложки, (рис. 1a). Это свойство является основополагающим при переходе от планарной технологии интегральных схем к технологиям 3D интегральных транзисторных и MEMS структур.

Основным отличием атомно-слоевого осаждения ппенок известных плазмостимулированных процессов PVD. использующих механизмы осаждения из объема газа/плазмы, является режим самонасыщения гетерогенной реакции двух (реагентов) поверхности, прекурсоров на приводящий контролируемому росту одного монослоя пленки на подложке. Фазы адсорбции монослоя 1-го прекурсора и реакции, формирующей пленку, которые циклически повторяются, разделены во времени.

Используются бинарные реакции металло-органических неорганических соединений (первый прекурсор) на поверхности подложки с активным газом/плазмой, в результате которых вэтоуаимаоф соединения вида Me. MeO_x. MeN_x. представляющие собой проводники, полупроводники и диэлектрики. Скорость роста составляет 0.03 - 0.15 нм/цикл, в зависимости от естественной толщины монослоя материала растущей пленки. Такой подход обеспечивает точность технологии на уровне моноспоя

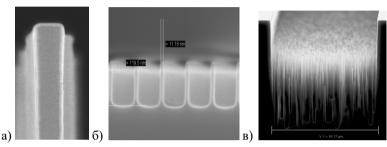


Рисунок 1. а) конформное покрытие структуры пленкой ALD, с толщиной 10 нм, б) приборные fin-структуры полученные в плазменном процессе травления кремния, притический размер - 11 нм, в) самоформирование наноструктур в плазме - «черный кремний» (black silicon)

Плазменное стимулирование реакций образования пленки должно быть достаточно «мягким», чтобы не вызвать десорбции монослоя 1-го прекурсора или его деструкции. Поток высокоэнергетичных заряженных частиц (ионов, электронов) на подложку должен быть сведен к минимуму при достаточно большой концентрации химически активных радикалов плазмы. Например, исследования плазмы O_2 как 2-го прекурсора в ALD-процессах показывают, что в зоне осаждения n_{i+} , $n_e \sim 10^9$ см⁻³, в то время как $n[O^*] \sim 10^{13}$ - 10^{14} см⁻³ (р=15 мТорр), при достаточно высокой мощности, вкладываемой в индуктивный ВЧ-разряд (100-500 Вт, 13.56 Гц).

Необходимость применения плазменных технологий для процессов наноструктурирования В наноэлектронике объясняется высокой требованиями vдаления материала С степенью анизотропии и минимумом повреждений кристаллической структуры приповерхностных слоев одновременно. Это исключает возможность применения как чисто химических подходов, так и физического распыления быстрыми частицами.

Примером формирования наноразмерных структур из кремния является технология анизотропного плазменного травления, включающая конкурирующие процессы полимерной пассивации на стенках и ионно-стимулированной реакции перевода кремния в

газовую фазу SiF_4 на дне формируемой структуры, в низкотемпературной плазме SF_6/C_4F_8 (рис.1 б) [2].

Другим подходом реализации анизотропного травления является плазменные криогенные технологии, позволяющие эффективно подавить изотропную компоненту реакций. Классическим примером такой технологии является криотравление в плазме смеси газов SF_6/O_2 при $T\sim -100^{\circ}C$. При помощи изменения параметров плазмы эффективно достигается управление формой формируемых наноструктур.

Продемонстрировано применение микро- и наноструктур с высокими аспектными отношениями для различных применений в наноэлектронике, 3D-интеграции ИС, преломляющей рентгеновской оптике. В определённых условиях в процессах такого типа возможно достичь эффектов самоформирования наноструктур, в частности кремниевой нано-травы — массива кремниевых вертикальных игл с суб-100 нм размером (рис. 1в). Благодаря исключительной способности к поглощению света видимого диапазона спектра такие структуры получили название «черный кремний».

Для уменьшения бомбардировки боковых стенок формируемых наноструктур рассеянными ионами существенным является низкое давление в камере (2-10 мТорр) и достаточная плотность плазмы в этих условиях, для чего разработаны специализированные HDP-реакторы плотной плазмы.

Тем не менее. плазменные непрерывные технологии структурирования уже В настоящее время сталкиваются невозможностью реализации атомарного уровня точности. Монослойное разрешение при удалении материала подразумевает проведение процессов осаждения либо травления тонких пленок в циклическом режиме.

Атомно-слоевое травление (ALE) реализуется Атомно-слоевое травление (ALE) было предложено значительно позже процесса ALD в связи с длительным поиском механизмов, обеспечивающих самоограничение гетерогенных реакций травления. Простое сокращение времени реакции плазмохимического травления с источниками плазмы не обеспечивает импульсными воспроизводимости толщины удаляемого слоя материала от цикла к циклу и по площади пластины на монослойном уровне. Поэтому атомно-слоевого плазмохимического циклический процесс травления организован как «реверс» процесса ALD, в котором первый шаг цикла предполагает хемосорбцию монослоя активного прекурсора на поверхности, затем – удаление избыточного прекурсора из камеры реактора, и, на следующем шаге активирование реакции взаимодействия подложки с монослоем адсорбата (реакции травления) путем бомбардировки поверхности ионами плазмы химически инертных газов с энергией < 40 - 60 эВ.

Ионный поток облегчает также десорбцию летучих продуктов реакции.

Необходимым условием выбора конкретной реакции для атомнослоевого травления является отсутствие спонтанного ее протекания в отсутствие ионного стимулирования. На примере реализации процесса ALE тонких слоев кремния показаны предельные возможности процесса по минимальной толщине удаляемого слоя за цикл, близкой к моноатомному слою кремния, а также рекордная селективность процесса атомно-слоевого травления нижележащим слоям других материалов. Продемонстрированы возможные применения процессов ALD и ALE. способные значительно **УЛУЧШИТЬ** характеристики современных наноэлектронных структур, а также создать перспективные приборы наноэлектроники [3,4].

Работа выполнена в рамках Государственного задания Физикотехнологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук по теме № 0066-2019-0004, частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №18-20-07-00832.

Литература:

- [1] Кольцов С.И., Алесковский В.Б. //Журн. Физ. Химии. 1968. Т. 42. С. 1210.
- [2] Miakonkikh, A.V., et al // Technology for fabrication of sub-20 nm silicon planar nanowires array (2016) Proceedings of SPIE, 10224, art. no. 102241V.
- [3] Popov, V.P., et al Ferroelectric properties of SOS and SOI pseudo-MOSFETs with HfO₂ interlayers (2019) Solid-State Electronics, 159, pp. 63-70.
- [4] Kuzmenko, V., Miakonkikh, A., Rudenko, K. Atomic layer etching of Silicon Oxide (2019) Journal of Physics: Conference Series, 1410(1), 012023

^{*} miakonkikh@ftian.ru

^{**} rudenko@ftian.ru

ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНОГО ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ

Тазмеев X.К.1*, Тазмеев Г.Х.1**

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны. Россия

Газовые разряды с жидкими электролитными электродами обладают большими возможностями для практических приложений. Многие успешные применения осуществлены с помощью слаботочных разрядов. В сильноточных режимах в плазменный столб поступает значительное количество вещества из жидкого катода. Разряд горит среде. Появляется возможность парогазовой создания плазменного потока, приемлемого для энергоемких технологий, в частности, для газификации отходов полимерных материалов [1, 2]. Однако способы формирования мощных плазменных потоков в газовых разрядах с жидкими электролитными электродами еще далеки от совершенства. Возникают вопросы, связанные с выбором электролита, конструктивным исполнением генератора плазмы, вводом реагентов в плазму и т.д. Экспериментальные исследования в данной работе были направлены на решение этих вопросов.

К выбору электролита (водного раствора). При длительном горении разряда водный раствор, используемый в качестве жидкого электролитного катода, убывает. Требуется дополнительное количество водного раствора. В простейшем варианте вместо раствора можно добавить дистиллированную воду. Этот вариант был изучен в опытах. Суть опытов заключалась в следующем. В гидросистеме объем водного раствора поддерживался постоянным. Дистиллированная вода добавлялась непрерывно во время горения разряда. После добавления определенного количества воды отбиралась проба для анализа. Фиксировались изменения физикохимических свойств водного раствора. В случае водного раствора хлорида натрия они менялись в меньшей степени. Поэтому в качестве электролита был выбран водный раствор хлорида натрия.

К выбору концентрации водного раствора. Вольтамперные характеристики разряда (ВАХ) получились возрастающими. Причем, крутизна менялась в зависимости от концентрации электролита. Чем меньше концентрация, тем круче получалась ВАХ. С практической точки зрения такая ВАХ является очень хорошим свойством разряда, т. к. повышается устойчивость горения и отпадает необходимость балластного резистора в цепи электрического питания.

Соответственно, уменьшаются потери энергии. Опыты показали, что для работы без балластного резистора концентрация водного раствора хлорида натрия должна быть в пределах от 0.05 до 0.2 моль/л.

Генератор плазмы. На рис. 1 представлена схема одного из вариантов генератора плазмы и фотоснимок плазменного потока на его выходе.

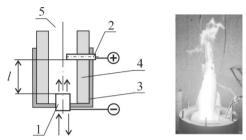


Рисунок 1. Генератор плазмы и плазменный поток. 1 – катодный узел, 2 – анод, 3 – корпус, 4 – футеровка, 5 – выходной канал. Стрелками указаны направления потоков водного раствора и плазмы. / = 20 см.

Анод представляет собой медный стержень с диаметром 25 мм. Он охлаждается водой. Корпус изготовлен из асбоцементных материалов, а футеровка выполнена из огнеупорных кирпичей. Электрическое питание подавалось от выпрямителя с выходным напряжением 2100 В. Балластный резистор использовался при зажигании разряда, а затем его сопротивление уменьшалось до нуля. Мощность генератора плазмы в рабочих режимах находилась в пределах 25-30 кВт. Тепловые потери через катод и анод были сравнительно малы. Их суммарное значение не превышало 30% от мощности генератора плазмы. Для сравнения можно отметить, что в дуговых плазмотронах примерно такие же тепловые потери.

Плазменный поток. Массовый расход потока плазмы принимался равным массовой скорости убыли водного раствора и был в пределах 1.2-1.7 г/с. Температура на расстоянии от анода 0.5 м составила ~ 1500 °C.

Литература:

- [1] Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 10-15.
- [2] Тазмеев А.Х., Фридланд С.В., Мифтахов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 6. С. 43-46.

^{*} tazmeevh@mail.ru

^{**} GKTazmeev@kpfu.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУР МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ

Файрушин И.И.^{1, 2, 3*}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия ²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия ³Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

В последние десятилетия исследования пылевой (комплексной) плазмы, которая образуется в газовых разрядах различных типов ведутся широким фронтом, работают сотни научных групп по всему миру [1]. Большинство опубликованных работ в этой области посвящены фундаментальным вопросам физики пылевой плазмы.

В данном докладе будут рассмотрены свойства газоразрядной пылевой плазмы в русле возможностей ее использования для получения наноструктур металлов и их оксидов. Во-первых, обсуждаются процессы образования наноструктур на поверхностях макрочастиц в условиях комплексной плазмы тлеющего и ВЧ разряда. Диапазон давления рабочего газа в этом случае составляет 1-10 Па. Способ предполагает, что предварительно плазменная пылевая структура ИЗ заряженных макрочастиц [2], на которые будут осаждаться атомы распыляемого материала (электрода либо металлических макрочастиц), формируя нанопленку. Данный способ позволяет более точно контролировать рост наноструктур и их морфологию. Управление данным процессом можно осуществлять путем внешнего воздействия лазерного излучения на пылевую подсистему. Такое воздействие, как это показано, например, в работах [3, 4], влияет на динамику частиц и самым на процесс формирования наноструктур поверхности. Во-вторых, в докладе обсуждаются процессы образования нанопленок и (или) конгломератов наночастиц на различных подложках в условиях газовых разрядов повышенного давления (0.1 - 1 бар) [5, 6]. Например, в работе [5] численно и экспериментально исследован процесс распыления медного электрода, газофазная нуклеация паров металлов и осаждение кластеров и наночастиц на поверхность подложки. В этом случае, можно говорить о формировании в зоне образования наночастиц термической пылевой плазмы. Заметную роль в процесс роста и

коагуляции наночастиц в данных условиях может играть наличие заряда на частицах. Учет заряда [7-9] при моделировании формирования наночастиц в разрядах повышенного давления позволит усовершенствовать описание процесса формирования наноструктур металлов и их оксидов на различных подложках.

Литература:

- [1] Complex and Dusty Plasmas, ed. by V. E. Fortov and G. E. Morfill, CRC Press, Boca Raton, USA (2010).
- [2] Fairushin I.I., Khrapak S.A., and Mokshin A.V. Direct evaluation of the physical characteristics of Yukawa fluids based on a simple approximation for the radial distribution function // Results in Physics 19 (2020): 103359.
- [3] Файрушин И.И., Петров О.Ф., Васильев М.М. Динамика макрочастиц в квазидвумерной плазменно-пылевой системе при направленном внешнем воздействии. Результаты моделирования // ЖЭТФ. 2020, том 157, вып. 3, стр. 567–572.
- [4] Лисин Е. А., Ваулина О. С. Влияние внешних возмущений на динамические характеристики пылевых кластеров (моделирование) // ЖЭТФ. 2012, том 142, вып. 5, стр. 1077-1084.
- [5] Файрушин И.И., Сайфутдинов А.И., Софроницкий А.О. Численные и экспериментальные исследования синтеза наночастиц меди в разряде повышенного давления // Химия высоких энергий. Том 54, 2020 № 2, с. 164–168.
- [6] Сайфутдинов А.И., Файрушин И.И., Кашапов Н.Ф. Исследование различных сценариев поведения вольт-амперных характеристик микроразрядов постоянного тока атмосферного давления // Письма в ЖЭТФ. Том 104, 2016 вып. 3, с. 178-183.
- [7] Файрушин И.И. Аналитический расчет состава термической пылевой плазмы с металлическими частицами // Химия высоких энергий. Том 54, 2020 № 6, с. 497–500.
- [8] Файрушин И.И., Даутов И.Г., Кашапов Н.Ф., Шамсутдинов А.Р. Аналитический расчет распределений электронной плотности и концентрации ионов примеси в термической пылевой плазме с применением модели "желе" для конденсированных частиц // Письма в ЖТФ. 2016, том 42, вып. 23. С. 42-50.
- [9] Fairushin I.I., Dautov I.G., Kashapov N.F. Distribution of the potential and concentration of electrons in low-temperature plasma with hollow microparticles // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2017, V. 14, Issue 12, p. 2555-2560.

^{*} fairushin ilnaz@mail.ru

ВОЗМОЖЕН ЛИ САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ОТСУТСТВИИ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ С КАТОДА?

Горин В.В.

В учебниках по физике плазмы [1-3] такая возможность не рассматривается, как и в Руководстве пользователя пакета COMSOL 5.4 [4]: "Unlike RF discharges, the mechanism for sustaining the [DC] discharge is emission of secondary electrons from the cathode. An electron is emitted from the cathode surface with a specified probability when struck by an ion. These electrons are then accelerated by the strong electric field close to the cathode where they acquire enough energy to initiate ionization." — Tutorial. Однако, если взять готовую модель «DC-Discharge > Positive Column 2D» из пакета COMSOL 5.4, подставить в неё входные параметры: V0 = 500[V], датма = 0; то мы получим, что разряд прекрасно «горит» в модели, несмотря на объяснения её авторов! — См. рисунок 1.

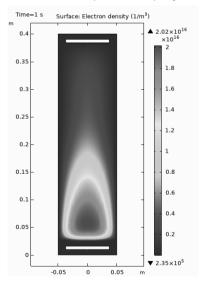


Рисунок 1. В приложении COMSOL 5.4 тлеющий разряд «горит» при напряжении 500 В и Гамма = 0.

Первое, что приходит в голову очевидцу этого программного феномена, - это уверенное предположение об ошибках программирования модели. Второе — сомнение в справедливости «extended fluid model» [5], которая применяется в данном пакете для моделирования тлеющего разряда. И лишь в третью очередь — поставленный здесь вопрос. Однако, прежде чем критиковать авторов модели и программистов, следовало бы убедиться в надёжности установившихся представлений о невозможности горения разряда при коэффициенте ион-электронной эмиссии с катода $\gamma=0$. И тут оказывается, что:

- 1) Экспериментально этот вопрос не изучался.
- 2) Теоретическое представление основано на модели катодного слоя Энгеля-Штеенбека, в которой электронная лавина ионизации зарождается на катоде [1-3].
- 3) Альтернативные модели ионизации не рассматривались.

Действительно, ионизация в самостоятельном тлеющем DCразряде производится электронным ударом, для чего энергия электрона должна превосходить энергию ионизации молекулы (атома) газа. Эту энергию электрон приобретает в зоне катодного падения потенциала, которое может превышать потенциал ионизации в десятки раз. При этом один электрон может образовать лавину размножения электронов. Поэтому представление о том, что лавина берёт своё начало с поверхности катода выглядит вполне естественно: а откуда же ещё?

В модели катодного слоя Энгеля-Штеенбека для упрощения уравнения электронной лавины предложен источник ионизации, пропорциональный абсолютной величине плотности электронного $s = \alpha |\mathbf{J}_{e}| = \alpha n_{e} |\mathbf{V}_{e}|$, где \mathbf{V}_{e} - вектор средней скорости электронов. В одномерной задаче знак абсолютной величины заменяется знаком «плюс» или «минус», в зависимости от ориентации координатной оси к направлению «катод-анод». И в результате получается удобное для решения дифференциальное $dJ_{a}/dx = \pm \alpha J_{a}$. Понятно, однако, что вектор средней уравнение: скорости электронов не имеет прямого отношения к ионизации, а, скорее, подошла бы средне-квадратичная скорость электронов: $\sqrt{V_{a}^{2}} = \sqrt{V_{r_{a}}^{2} + V_{a}^{2}}$, поскольку хаотическая компонента скорости для ионизации ничем не хуже направленной. Но уравнение лавины от этого усложняется. Из широкой распространённости в учебниках модели Энгеля-Штеенбека и сформировалось «общественное мнение» о невозможности разряда без катодной эмиссии электронов, то есть, при нулевой плотности тока электронов на катоде, когда весь катодный ток является ионным.

Одна из альтернативных возможностей такая. В аргоне, кроме ионизации электронным ударом, происходит возбуждение атомов электронным ударом, причём, возбуждение идёт чаще ионизации, и концентрация возбуждённых атомов **Ar*** может превышать почти на порядок концентрацию электронов или ионов **Ar+**. Возбуждённые атомы являются электрически нейтральными, поэтому ничто не мешает им свободно диффундировать по всему объёму разряда, в том числе и в область возле катода. Поэтому в любом месте возможна реакция **Ar* + Ar* -> e- + Ar+ + Ar**, в том числе и у катода. Образовавшиеся электроны поблизости катода могут дать начало лавинам возбуждения и ионизации так же успешно, как в традиционной модели это делали электроны, вышедшие из катода. Энергия таких электронов меньше, чем катодных, но может вполне быть достаточной для поддержания ионизации.

Описанная альтернатива имела возражения. Мой коллега из Института физики НАН Украины (Киев) высказал предположение о том, что такой механизм ионизации, якобы, представляет разновидность вечного двигателя 1-го рода. Будто бы здесь, в «электростатической» системе, энергия на поддержание разряда берётся ниоткуда.

Должен возразить, что данная система не электростатическая (где заряды неподвижны), а стационарная (заряды движутся, но ток постоянный), такая же, как и в традиционном DC-разряде при ненулевой катодной эмиссии электронов. Энергию на ионизацию и возбуждение поставляет внешний источник из внешней цепи: пара образовавшихся заряженных частиц стекает в конечном итоге на электроды, уменьшая их электрический заряд; заряд же электродов восстанавливается током, текущим во внешней цепи. При каждом акте рождения пары (е-, Ar+) в объёме разряда в систему из внешней цепи вносится энергия eU, где e – элементарный заряд, U- напряжение разряда. Однако, эта энергия между электроном и положительным ионом распределяется по-разному, в зависимости от электрического потенциала точки рождения пары. А именно, если принять потенциал катода нулевым, потенциал анода равным U, то потенциальная энергия иона в точке рождения пары составит потенциальная энергия электрона составит $e(U-\varphi(\mathbf{r}))$. $e\varphi(\mathbf{r})$.

Если пара образовалась в плазме разряда, где потенциал близок к анодному, почти вся энергия достанется иону, и затем пойдёт на разогрев газа и катода. Если же образование пары произошло поблизости от катода, то, наоборот, почти вся энергия достанется электрону, и может пойти на возбуждение и ионизацию газа электронным ударом. Для катодной эмиссии электронов при

ненулевом γ в традиционном разряде — всё то же самое, но в крайнем смысле: $\varphi(\mathbf{r}_c) = 0$, и электрону достаётся вся потенциальная энергия пары eU.

Качественно, альтернативная модель конкурентоспособная. Нужны подтверждения либо расчёты для опровержения альтернативы. Вполне возможно, что программный код модели COMSOL 5.4 окажется правильным, подтверждающим эти альтернативную возможность, несмотря на TO. сами разработчики модели и не ожидали от неё такого результата.

Что касается постановки эксперимента с $\gamma = 0$, то нужно:

- 1) подобрать пару материалов «газ + катод» таких, чтобы потенциал ионизации газа превосходил работу выхода электрона из катода, но меньше, чем в два раза (для того, чтобы произошла нейтрализация иона, но на эмиссию второго электрона не хватило бы энергии);
- 2) обеспечить зажигание разряда любым способом, но с последующим выключением этого зажигания.

Вывод. Поставленный вопрос интересен и не имеет умозрительного ответа. Необходимы расчётные и, возможно, экспериментальные исследования.

Литература:

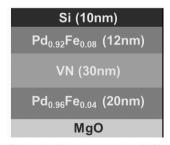
- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда, «Интеллект», Долгопрудный, 2009.
- [2] А.А. Кудрявцев, А.С. Смирнов, Л.Д. Цендин. Физика тлеющего разряда, 2009.
- [3] А. Энгель. Ионизованные газы, ГИФ-МЛ, М.: 1939, С. 232.
- [4] COMSOL 5.4 > Application Libraries > Plasma Module > Direct Current Discharges > positive_column_2D > tutorial, page 4.
- [5] Hagelaar G J M and Pitchford L Plasma Sources Sci. Technol. 14, 2005, 722.

^{*} vvqorin@mail.ru

COMBINED REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING AND MOLECULAR BEAM EPITAXY SYNTHESIS, AND FURTHER STUDIES OF STRUCTURAL, MAGNETIC, AND FERROMAGNETIC RESONANCE PROPERTIES OF THIN-FILM EPITAXIAL Pd_{0.96}Fe_{0.04}/VN/Pd_{0.92}Fe_{0.08} SUPERCONDUCTING SPIN-VALVE HETEROSTRUCTURE

Янилкин И.В.^{1, 2*}, Гумаров А.И.^{1, 2**}, Киямов А.Г.^{1***}, Родионов А.А.^{1****}, Юсупов Р.В.^{1*****}, Aliyev M.N.^{3******}, Тагиров Л.Р.^{1, 2, 4******}

ferromagnet/superconductor/ferromagnet (FSF) lavered heterostructure is one of the possible logic elements in superconducting spintronics [1]. We synthesized a fully epitaxial FSF heterostructure MgO/Pd_{0.96}Fe_{0.04}(20 nm)/VN(30 nm)/Pd_{0.92}Fe_{0.08}(12 nm), which consists of two layers of Pd_{1-x}Fe_x alloy as a ferromagnet and a layer of VN compound as a superconductor (see Fig.1 left). The heterostructure was deposited by reactive magnetron sputtering (BESTEC, Germany) and molecular-beam epitaxy technique (MBE system by SPECS, Germany) onto the (001)-oriented, epi-polished single-crystal MgO substrate [2-4]. The epitaxial growth mode of the layers was verified by low-energy electron diffraction (LEED) (Fig.1 right) and X-ray diffraction (XRD) techniques (Fig. 2). Magnetic properties were studied using VSM magnetometry (QD PPMS-9) (Fig.3 left) and ferromagnetic resonance (FMR, X-band Bruker ESP300 spectrometer) (Fig3 right).



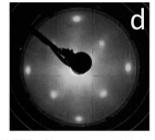


Figure 1. Heterostructure (left) and LEED of its top layer (right).

¹Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia

³Baku State University, Baku, Azerbaijan

⁴Tatarstan Academy of Sciences , Kazan, Russia

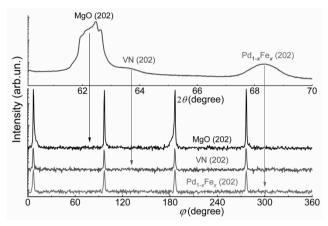


Figure 2. X-ray diffraction φ -scans of sample S4; the Eulerian cradle angle χ was set to 45 degrees to detect the <220> XRD-maxima. The θ -angle values at which the φ -scans were recorded for each material are indicated by vertical arrows.

The specific magnetic moment versus temperature dependence $M(\mathcal{T})$ is presented in Fig. 3 left. It exhibits a clear kink at a temperature of about 125 K, which can be well reproduced by decomposing the $M(\mathcal{T})$ dependence on the magnetic responses of the constituent $Pd_{0.92}Fe_{0.08}$ and $Pd_{0.96}Fe_{0.04}$ layers (shown by dash lines) using $M(\mathcal{T})$ data for reference single-layer films synthesized separately. At a temperature of 5.4 K, an additional diamagnetic contribution arises due to the superconducting transition in the VN layer (not shown). The FMR technique was used to study magnetic anisotropies in the $Pd_{1-x}Fe_x$ layers of the heterostructure (Fig. 3 right). The magnetic anisotropy of the trilayer is the same as for single $Pd_{0.96}Fe_{0.04}$ layer – cubic with tetragonal distortion [2, 4].

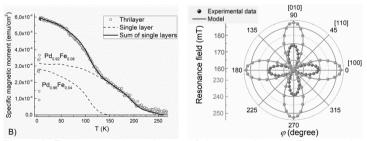


Figure 3. Temperature dependences of the saturation specific magnetic moment for the trilayer film S4 and the reference single films – left; Angular dependence of the FMR field for resonance of the epitaxial MgO/Pd_{0.96}Fe_{0.04}(20 nm)/VN(30 nm)/Pd_{0.92}Fe_{0.08}(12 nm) heterostructure.

Different concentration of iron in the ferromagnetic layers leads to different coercive fields [2], which makes it possible to utilize them like "free" and "fixed" layers (soft-hard pseudo spin-valve) (see Fig.4). On the minor hysteresis loop we obtained parallel (P) and antiparallel (AP) mutual alignment of the ferromagnetic layers magnetizations. Resistive measurements have shown the inverse superconductive spin-valve $(T_c(P) > T_c(AP))$ effect (Fig.4).

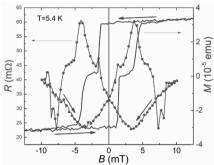


Figure 4. Dependence of electric resistance of the tri-layer MgO/Pd $_{0.96}$ Fe $_{0.04}$ /VN/Pd $_{0.92}$ Fe $_{0.08}$ /Si (S4) spin-valve sample on the magnetic field.

This work was supported by the RSF project No. 18-12-00459. Synthesis and analysis of the films were carried out at the PCR Federal Center of Shared Facilities of KFU.

Литература:

- [1] Linder J., Robinson J. W. A. Nat. Phys. 11, 307 (2015).
- [2] Esmaeili A., Yanilkin I. V., Gumarov A. I. et al., Thin Solid Films 669, 338 (2019).
- [3] Esmaeili A., Mohammed W. M., Yanilkin I. V. et al., Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal 21, 4 (2019).
- [4] Mohammed W. M., Yanilkin I. V., Gumarov A. I. et al., Beilstein J. Nanotechnol 11, 807 (2020).
- [5] Esmaeili A., Yanilkin I. V., Gumarov A. I. et al., Sci. China Mater. 63, 1–10 (2020).
- * yanilkin-igor@yandex.ru
- ** amir@gumarov.ru
- *** airatphd@gmail.com
- **** rodionovshurik@yandex.ru
- ***** ryusupov.kazan@gmail.com
- ***** mammadaliyev@hotmail.com
- ****** Itagirov@mail.ru

ПЛАЗМОСТИМУЛИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ РУТЕНИЯ И НИТРИДОВ ТИТАНА И ТАНТАЛА

Смирнова Е.А.^{1*}, Мяконьких А.В.^{1**}, Рогожин А.Е.^{1***}, Руденко К.В.^{1***}

¹ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия

является перспективным материалом для создания проводников системы металлизации интегральных микросхем [1]. Использование меди в системах металлизации с критическими размерами дорожек менее 10-15 нм затруднительно, поскольку, вопервых, из-за необходимости применения барьерных систем и рассеяния носителей на шероховатостях поверхности дорожки и границах зерен меди сопротивление медных дорожек оказывается слишком большим, во-вторых, устойчивость меди к электромиграции недостаточна при соответствующих плотностях тока. Одним из возможных решений является применение рутения. Преимущества этого материала связаны, во-первых, с высокой температурой плавления И. как следствия, высокой устойчивостью электромиграции, во-вторых, с оптимальным для дорожек с критическими размерами менее 15 нм соотношением длины свободного пробега и удельного сопротивления, в-третьих, с отсутствием необходимости использования барьерных систем. Уже при сечении менее 250-300 нм² сопротивление линий из рутения оказывается ниже, чем для меди.

Одной из основных сложностей в процессах роста тонкой рутениевой пленки является эффект замедленного зародышеобразования. Это проявляется в наличии латентных циклов в начале процесса атомнослоевого осаждения. В случае неполного зародышеобразования на первых циклах это приводит к росту островков на поверхности, что в свою очередь приводит к высокой шероховатости пленок (рисунок 1). В данной работе проводились исследования начальных стадий роста рутения на поверхностях, покрытых различными тонкими пленками и подвергнутых различным предварительным обработкам. Также были разработаны процессы формирования барьерных слоев на основе нитридов титана и тантала путем плазменно-стимулированного осаждения атомных слоев.

Выбор метода нанесения обусловлен требованиями, которые предъявляются к структурам металлизации в ИС. Во-первых, осаждение необходимо проводить в борозды и отверстия с аспектным отношением до 2-3. В этом случае физические методы

(магнетронное распыление и т.п.) не позволяют нанесения осуществить безпустотное заполнение. Во-вторых. является перспективным селективное осаждение пленок по принципу металлна-металл [2], что возможно только в методе атомно-слоевого осаждения. Необходимость плазменного варианта метода, в котором химической между активация реакции первым вторым прекурсорами происходит за счет активных частиц плазмы связана с тем, что система металлизации формируется, когда приборный слой ИС уже сформирован и процесс должен обладать ограниченным термическим бюджетом.

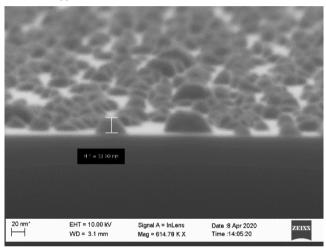


Рисунок 1. Неоптимизированный процесс атомно-слоевого осаждения рутения

Ппенки Ru наносили на различные подложки методом плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения температуре образца 400°C С использованием металлоорганического прекурсора Ru(EtCp)₂ и плазмы O₂. Давление при осаждении поддерживалось на уровне 65-80 мТорр. Прекурсор содержался в барботере, который нагревался до 70°C и доставлялся в реактор аргоном со скоростью потока 150 ст.см³/мин. Во время плазменной фазы мощность ВЧ ІСР разряда была 75 Вт, поток газа – 60 ст.см³/мин. Все процессы осуществлялись в полупромышленной vстановке FlexAL (Oxford Instruments Plasma Technology. Великобритания).

Было показано, что задержка зародышеобразования во время осаждения рутения может составлять до нескольких сотен циклов, и ее эффекты существенно зависят от материала интерфейса (нижележащего слоя). Это также определяет шероховатость

получаемых пленок. Измерения методом атомно-силовой микроскопии показали, что образующиеся пленки имеют характерную шероховатость, которая возникает из-за постепенного образования зародышей на поверхности. Анализ проведенных экспериментов по осаждению рутения на TiN и TaN показал, что наиболее быстрое зародышеобразование, не приводящее к заметной шероховатости, наблюдается на нитриде тантала. Таким образом, стимуляция зародышеобразования приводит к уменьшению шероховатости пленок. Было установлено, что пленки металлов, осажденных плазменно-стимулированным осаждением (TiN и TaN) второго прекурсора, оптимизированного по составу для получения пленок с минимальным электрическим сопротивлением, являются благоприятными для осаждения.

Слой нитрида тантала, полученный за 5 циклов, достаточен для качественного зародышеобразования и результирующей шероховатости 0,4 нм, что сопоставимо с исходной шероховатостью кремниевой подложки. Дальнейшее увеличение толщины слоя нитрида тантала приводит к увеличению шероховатости из-за вздутия пленки.

Показано, что даже на подготовленной поверхности, на которую предварительно было нанесено 5 циклов нитрида тантала, наблюдается задержка зарождения рутения до 100 циклов. Установлено, что после завершения нуклеации наступает линейная стадия роста с постоянной скоростью роста пленки за цикл (рисунок 2). Установлена температурная зависимость скорости роста рутения, которая растет с температурой от 0,023 нм за цикл до 0,044 нм за цикл в диапазоне температур 300-400°C (рисунок 3).

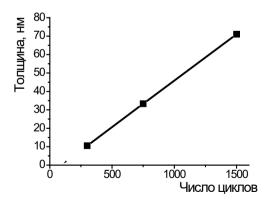


Рисунок 2. Зависимость толщины пленки Ru от количества циклов ALD при 400 ° C на предварительно обработанной поверхности

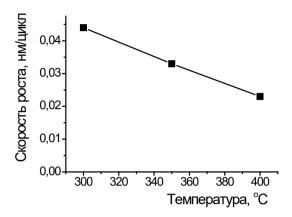


Рисунок 3. Температурная зависимость скорости роста рутения

Результаты могут быть использованы для разработки процессов осаждения рутения в траншеи в системах металлизации ИС, а также для разработки перспективных процессов селективного осаждения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме №0066-2019-0004, частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 18-29-27029 мк.

Литература:

- [1] L. G. Wen et al ACS Applied Materials & Interfaces 2016, 8, (39), 26119-26125
- [2] I. Zyulkov et al ACS Applied Materials & Interfaces 2020, 12, (4), 4678–4688
- * smirnova@ftian.ru
- ** miakonkikh@ftian.ru
- *** rogozhin@ftian.ru
- **** rudenko@ftian.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИН СЛОЕВ В ПРОЦЕССАХ ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ И ТРАВЛЕНИЯ

Гайдукасов Р.А.^{1*}, Клементе И.Э.^{1**}, Мяконьких А.В.^{1***}, Руденко К.В.^{1****}

¹ФТИАН им. К.А. Валиева РАН. Москва. Россия

Продолжающее масштабирование элементов интегральных схем предъявляет все более высокие требования к точности процессов их изготовления, среди которых большая часть выполняется в плазме (травление функциональных слоев, осаждение и т.п.). Воспроизводимость результатов таких процессов существенно страдает в результате так называемого дрейфа параметров вследствие изменения технологических условий (температура стенок реактора, образовавшиеся на них переосажденные продукты реакций и т.п.). Для борьбы с дрейфом приняты два подхода: первый, наиболее прямой, - регулярное кондиционирование выполняемое механическими, реакторов. химическими плазмохимическими методами (например, травление в кислородной плазме загрязнений), и второй, основанный на внедрении методик детектирования окончания процесса.

Методики мониторинга параметров тонких пленок в ходе технологических процессов (in situ) должны удовлетворять ряду требований, главное из них — отсутствие возмущения технологического процесса. В данной работы реализованы и исследованы в технологических установках метод лазерной интерферометрии и метод спектральной эллипсометрии.

Первый метод является широко используемым и обеспечивает бесконтактное измерение в течение процесса. Он основан на измерении коэффициента отражения от образца, покрытого осаждаемой или удаляемой пленкой. При толщинах пленок порядка длины волны существует зависимость коэффициента отражения пленки от ее толщины. Для таких систем не нужно наличие специальных портов на реакторах и её можно легко использовать для in situ контроля тонких пленок. Недостатком метода является неоднозначный характер зависимости коэффициента от толщины, который требует знания начальной толщины пленки.

Метод был реализован на установке плазмохимического травления Plasmalab Dual System 100 производства Oxford Instruments, UK. В работе показана возможность применения метода для мониторинга толщины пленки оксида кремния на кремниевой подложке при плазмохимическом травлении (Рисунок 1). В работе впервые предложено использовать этот метод для измерения изменений

показателя преломления пленок пористых диэлектриков при адсорбции в порах плазмообразующего газа. Разрешение метода по толщине пленки может быть менее 10 нм, по показателю преломления менее 0,05.

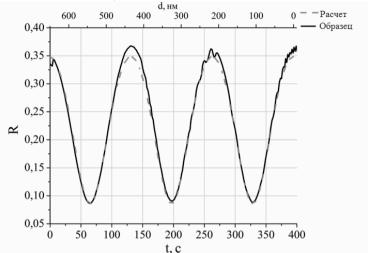


Рисунок 1. Экспериментальные и теоретические графики травления пленки оксида кремния с изначальной толщиной d=643 нм.

Другой исследованный подход — спектральная эллипсометрия, основанный на изменении состояния поляризации света, отраженного от образца. Поскольку состояние поляризации может быть измерено с гораздо более высокой точностью, чем интенсивность, метод обладает разрешающей способностью по толщине пленки до долей нанометра и может быть также эффективно использоваться для измерения адсорбции.

Недостатком метода являются требования к наличию специальным образом ориентированных оптических окон, которые должны быть защищены от осаждения пленок. Следующая проблема заключается в разработке оптических моделей образцов, которые учитывали бы все слои, с возможными обратными отражениями. Также при изменении температур модель должна учитывать изменение оптических параметров и толщин слоев.

В работе было исследовано атомно-слоевое осаждение (ALD) Al₂O₃ на подложки монокристаллического кремния [1]. Разработанная модель учитывала температуру пластины in situ до начала процесса и ее изменение во время осаждения, что имело решающее значение для разработки нового процесса и понимания химических плазмостимулированного реакций. Цикл атомно-слоевого из этапов дозировки первого прекурсора осаждения состоит (триметилалюминий). продувки реактора. окисления физисорбированного прекурсора в кислородной плазме, продувки. В него естественным образом встраиваются эллипсометрические измерения, позволяющие наблюдать результат «полуреакций» (рисунок 2). Результат диагностики процесса показан на рисунке 3. Видно, что после образования сплошной пленки наблюдается устойчивый циклический рост, причем надежно измеряется не только скорость роста в нанометрах за цикл, но и адсорбированный слой прекурсора. Предложенная методика может быть применена для изучения задержки нуклеакции в первых циклах осаждения.

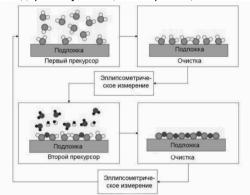


Рисунок 2. Цикл атомно-слоевого осаждения с двумя эллипсометрическими измерениями, позволяющий изучать полуреакции процесса осаждения.

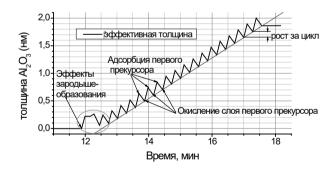


Рисунок 3. Мониторинг процесса атомно-слоевого осаждения.

Также с помощью спектральной эллипсометрии было проведено экспериментальное исследование кинетики роста оксида кремния на начальной стадии плазменного окисления кремния (рисунок 4) [2]. Пластины монокристаллического кремния с удаленным в буферном растворе НF естественным окислом незамедлительно загружались в реактор через вакуумный шлюз. После включения плазмы наблюдался рост толщины оксида кремния. Установлена зависимость скорости окисления от параметров плазмы. Показан

насыщающийся характер зависимости – с ростом толщины оксида скорость окисления падает так как затрудняется диффузия активных частиц с поверхности оксида к кремнию.

Исследованный процесс может быть применен для прецизионного создания окисленных слоев кремния в технологии микроэлектроники а также в устройствах фотоники.

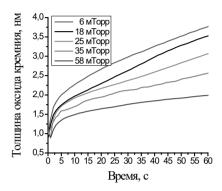


Рисунок 4. Мониторинг процесса плазменного окисления

Таким образом в работе реализованы оптические методы in situ невозмущающего контроля характеристик наноразмерных слоев в плазменных процессах, которые могут быть применены для оптимизации плазменных процессов создания наноструктур.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Физикотехнологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук по теме № 0066-2019-0004.

Литература:

[1] Clemente I.E., Miakonkikh A.V. International Conference on Microand Nano-Electronics 2016, vol. 10224, Zvenigorod, Russian Federation [2] Clemente I., Miakonkikh A., Averkin S. & Rudenko K. 2018. Journal of Physics: Conference Series, 1124, 081038

^{*} gaydukasov.r@gmail.com

^{**} clemente.iosif@gmail.com

^{***} miakonkikh@ftian.ru

^{****} rudenko@ftian.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЗОНДА ЛЕНГМЮРА И ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ФТОРБРОМУГЛЕРОДОВ

Кузьменко В.О.1*, Мяконьких А.В.1**, Руденко К.В.1***

¹Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Фторбромуглеродные плазмы представляют интерес для исследования из-за актуальности для задач микроэлектроники. Одно ИЗ направлений их использования процесс низкоповреждающего травления пористых диэлектрических плёнок с низкой диэлектрической проницаемостью. В производстве интегральных схем при изготовлении системы металлизации используются пористые диэлектрики ультранизкой диэлектрической проницаемостью, для того чтобы уменьшить задержки при передаче сигнала. Однако при плазменном травлении диэлектрика во фторсодержащей плазме его диэлектрическая проницаемость увеличивается. Радикалы фтора проникают в поры. где могут образовать полярную связь, что приводит к увеличению диэлектрической проницаемости. Бром спонтанно не реагирует с кремнием, поэтому бромсодержащие соединения должны защищать поверхность пор от воздействия радикалов фтора. В работах [1-2] проводилось исследования процессов криогенного травления плёнок диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью в индуктивно-связанной плазме фторбромуглеродов. Результаты этих работ свидетельствуют о том, что деградация плёнок при травлении в различных фторбромсодержащих плазмах происходит по разным причинам. Для детального понимания механизмов деградации диэлектрика был проведён анализ плазмы C₂F₄Br₂.

В настоящей работе исследовалась плазма в типичной технологической установке плазмохимического травления Plasmalab 100. Индуктивно-связанная плазма возбуждается индуктором, подключенным к ВЧ-генератору (2 МГц). Камера имеет форму цилиндра с алюминиевыми стенками диаметром 380 мм и высотой 450 мм. Откачка реактора производится турбомолекулярным насосом до базового вакуума ~10-6 Торр.

Диагностика плазмы $C_2F_4Br_2$ проводилась при давлениях 5-25 мТорр и мощности, вложенной в разряд, равной 1000-2500 Вт. Для исследований методом зонда Ленгмюра использовалась оборудование ESPion (Hiden Analytical), позволяющее измерять

зондовые вольтамперные характеристики в диапазоне -100 - +20 В. Измерения проводились при помоши цилиндрического вольфрамового зонда длиной 10 мм и диаметром 0.15 мм. Опорным зондом служили стенки камеры, площадь поверхности которых намного больше плошади поверхности зонда. В результате плотность тока через плазменный слой измерительного зонда намного больше, чем через слой опорного зонда и практически вся разность потенциалов падает на плазменном слое измерительного зонда. Кроме того, были проверены другие условия корректности ленгмюровских измерений _ бесстолкновительный движения частиц в слое, отсуствие электрических и магнитных полей и изменения геометрии зонда в результате травления. Поверхность зонда поддерживалась свободной от загрязнения непроводящими пленками за счет ионной чистки. Параметры плазмы были получены из вольтамперных характеристик зонда (рисунок 1а) с помощью теории ограниченного орбитального движения.

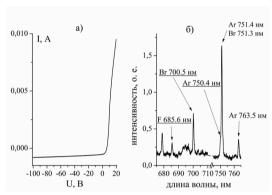


Рисунок 1. a) Вольтамперная характеристика зонда Ленгмюра, б) Оптический эмиссионный спектр плазмы

Для проведения оптической эмиссионной актинометрии с помощью акустооптического спектрометра «Кварц 2000» были измерены спектры излучения исследуемых плазм с небольшой (4%) добавкой инертного газа аргона в качестве актинометра (рисунок 1б). Концентрация радикалов в плазме определялась через отношение интенсивностей атомных линий искомых частиц и линии аргона, чья концентрация определялась из уравнения состояния идеального Коэффициенты пропорциональности между отношением концентраций отношением интенсивностей определяются скоростями возбуждения верхнего состояния, соответствующего атомному переходу, прямым электронным ударом. скоростей возбуждения были вычислены с учетом максвелловских функций распределения электронов по энергиям с электронными температурами, полученными методом зонда Ленгмюра, по сечениям возбуждения вычисленным в борновском приближении [3].

Из анализа вольтамперных характеристик были получены значения электронных температур в плазме С₂F₄Br₂ при вложенной в разряд, равной 1000-2500 Вт и давлениях 5-25 мТорр. Электронные температуры уменьшаются с ростом давления и слабо линейно увеличиваются с увеличением мошности. температур лежат в диапазоне 1.3-2.6 эВ. Концентрация электронов и положительных ионов определены из зондовых характеристик и рисунке 2. Концентрации приведены на заряженных vменьшаются ростом давления, что вызвано падением электронной температуры. Концентрация электронов гиперболически уменьшается с увеличением давления и линейно растет с ростом мощности. Концентрация положительных ионов при высоких давлениях примерно на порядок больше, чем концентрация электронов, что говорит O значительной концентрации отрицательных ионов.

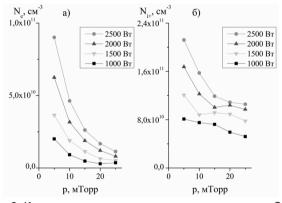


Рисунок 2. Концентрации заряженных частиц в плазме $C_2F_4Br_2$ в зависимости от давления для различных вложенных мощностях: а) концентрация электронов, b) концентрация положительных ионов

Воздействие радикалов из плазмы на диэлектрические плёнки может приводить к их деградации, поэтому большой интерес представляет концентрации радикалов. Концентрации атомов фтора и брома были определены методом оптической эмиссионной актинометрии для различных давлений и мощности, вложенной в разряд, равной 2000 Вт (рисунок 3). Концентрация фтора возрастает с ростом давление, что вызвано увеличением числа частиц в камере. Концентрация брома при высоких давлениях меньше, чем концентрация фтора почти на порядок, что может быть связано с

расходом атомарного брома на образование устойчивых при низкой электронной температуре бромсодержащих соединений.

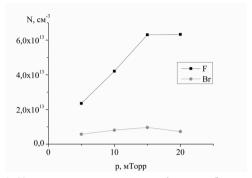


Рисунок 3. Концентрации радикалов фтора и брома в плазме $C_2F_4Br_2$ в зависимости от давления для мощности 2000 Вт

Таким образом, в настоящей работе была исследована индуктивносвязанная плазма $C_2F_4Br_2$ в типичной технологической установке плазмохимического травления. Была разработана детальная актинометрическая модель определения концентрация радикалов F и Br в плазме. Обнаружена значительная концентрация отрицательных ионов в плазме. Концентрация атомарного фтора превышает концентрацию брома, что может объяснить деградацию диэлектриков при травлении в плазме $C_2F_4Br_2$, что наблюдается и для плазмы CF_3Br в ICP разряде.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Физикотехнологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук по теме № 0066-2019-0004, частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №18-29-27025

Литература:

- [1] Rezvanov A., Miakonkikh A. V., Vishnevskiy A. S., Rudenko K. V., Baklanov M. R., J. Vac. Sci. Technol. B, 35 (2), 021204 (2017). DOI: 10.1116/1.4975646
- [2] Орлов А. А., Резванов А. А., Мяконьких А. В., Наноиндустрия, S96-2, 684, (2020). DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.684.687
- [3] Sobel'man I. I., Vainshtein L. A., Yukov E. A., Excitation of Atoms and Broadening of Spectral Lines (Physica-Verlag, Heidelberg, 1995), p. 1-58

^{*} kuzmenko.vo@phystech.edu

^{**} miakonkikh@ftian.ru

^{***} rudenko@ftian.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ TSV СТРУКТУР.

Долгополов В.М.^{1*}, Варакин В.М.^{1**}, Иракин П.А.^{1***}

¹АО НИИТМ, Зеленоград, Россия

Целью данной работы было усовершенствование существующей технологии глубокого анизотропного травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных TSV-структур, а именно поднятие селективности к маске и уменьшение шероховатости поверхностей.

Эксперимент

Отработка реактора и технологии для глубокого травления кремния проводились на базе конструктива установки ПЛАЗМА ТМ 200-02, разработанной в ОАО «НИИ Точного Машиностроения».

Разряд зажигается в реакционной камере (диаметром 400 мм). ICР источником с помощью ВЧ генератора (частота 13,56 МГц, мощность до 3 кВт) через согласующее устройство. Для задания необходимого отрицательного смещения на охлаждаемый электродподложкодержатель от отдельного НЧ генератора (частота до 600 кГц, мощность до 300 Вт) через согласующее устройство подавалось смещение. Высоковакуумная система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов обеспечивала предельный остаточный вакуум 1·10-3Па.

В данном эксперименте была изменена с высокой (13,56 МГц) на низкую (50-600 кГц) частота подачи отрицательного смещения на охлаждаемый электрод-подложкодержатель от отдельного генератора с целью уменьшения шероховатости поверхностей травления и увеличения селективности травления к маске фоторезиста.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились на пластинах диаметром 200 мм. На пластинах предварительно были сформированы маски из оксида кремния толщиной 0,6 мкм и фоторезиста толщиной 3,15 мкм. На фоторезисте присутствуют отверстия диаметрами 8 и 12 мкм.

Основные характеристики процесса травления пластин диаметром 200 мм:

Средняя скорость травления кремния: ≈2,27мкм/мин;

Равномерность травления, измеренная в стандартных 5 точках: ≈±1,75%;

Средняя селективность к маске: ≈32:1;

Подтрав под маску: ≈236 – 570 нм:

Угол наклона профиля: ≈90 ± 0,5°;

Величина «scallop» менее 40 нм.

Выводы

Получены значения неоднородности процесса травления в пределах ≈±1,75 %, глубокие отверстия с аспектным соотношением 7-12 и снижением шероховатости стенок со 130 нм до 40 нм, при скорости травления кремния ≈2,3 мкм/мин, а также увеличена селективность травления к маске с 20 до 32, что позволяет применять установку для промышленного производства.

Литература:

- [1] «Исследование и разработка оборудования и технологии глубокого травления кремния» О.П. Гущин и др., Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение, стр. 561-564.
- [2]«Ключевые процессы технологии микросистемной техники: плазмохимические процессы глубокого анизотропного травления кремния» И.И. Амиров и др., Нанотехнологии и наноматериалы, №4(66) июль-август, стр. 8-13.
- [3] Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В., «Анизотропное травление глубоких канавок в кремнии во фторсодержащей плазме», 2008 год, стр. 653-656.
- [4] Oxford Plasma Technology, «Deep Si Etching at room temperature: the "Bosch" process». URL: http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_1.htm (дата обращения: 18.01.2020).
- [5] Oxford Plasma Technology, «High Rate Bosch Process by ICP Accelerator». URL: http://www.oxfordplasma.de/process/sibo_acc.htm (дата обращения: 18.01.2020).
- [6] Samsung begins to produce 64GB DDR4 modules based on TSV chips. URL: http://www.kitguru.net/components/memory/anton-shilov/samsung-begins-to-produce-64gb-ddr4-memory-modules-based-on-tsv-chips/ (дата обращения: 18.01.2020).
- [7] Micron's 320GB/sec Hybrid Memory Cube comes to market in 2013, threatens to finally kill DDR SDRAM. URL: http://www.extremetech.com/computing/152465-microns-320gbsec-hybrid-memory-cube-comes-to-market-in-2013-threatens-to-finally-kill-ddr-sdram (дата обращения: 18.01.2020).

^{*} step455@mail.ru

^{**} VarakinVM@yandex.ru

^{***} irakinp@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ В НИХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Данилаев М.П.^{1*}, Вахитов И.Р.², Евтюгин В.Г.², Куклин В.А.^{1, 2}, Лунев И.В.², Осин Ю.Н.², Рогов А.М.², Тагиров Л.Р.^{2, 3}

Основная проблема при получении полимерных композитов, наполненных углеродными наночастицами, состоит В плохой смачиваемости этих частиц полимером. Это приводит недостаточной однородности распределения таких частиц полимерной матрице и низкой воспроизводимости физических характеристик композиции. В данной работе приводятся результаты исследований нового подхода к получению полимерной композиции в плазме газового разряда с одновременным формированием углеродных наночастиц.

Исследования проводились для полистирольной пленки. получаемой в плазме барьерного коронного разряда переменного тока [1-3] в системе электродов игла-плоскость. В таком разряде существуют две области с повышенной плотностью тока: область вблизи игольчатого электрода и область стримера. В этих областях возможно формирование углеродных наночастиц. Полученные частицы встраиваются в полимерную пленку и имеют хорошую адгезию к ней. Высокая адгезия обусловлена наличием переходного слоя на поверхностях этих частиц. Переходной слой состоит из молекул полимера (полистирола), имеющих достаточно сильные связи с углеродной частицей. В работе отмечено, что в этих областях средние значения температуры различны. Поэтому аллотропная форма образующихся в этих областях углеродных частиц различна.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на: идентификацию типов углеродных частиц (просвечивающая электронная микроскопия и дифракция электронов); подтверждения наличия переходного слоя на поверхностях этих частиц; исследования механических (зондовая микроскопия) и электрических (диэлектрическая спектроскопия) свойств пленок при разных условиях их получения. Результаты экспериментов подтверждают возможность получения полимерной

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева - КАИ, Казань, Россия ²Казанский федеральный университет. Казань. Россия

³ФИЦ Казанский научный центра, физико-технический институт им.Е.К.Завойского. Казань. Россия

композиции с углеродными наночастицами, в которой частицы имеют высокую адгезию к полимерной матрице. Показано, что аллотропные формы частиц зависят от амплитуды напряженности электрического поля. При значениях напряженности электрического $|E| < E_0 \quad (E_0 \sim 7 \div 8 \frac{\kappa B}{c_M})$ вблизи игольчатого электрода. формируются фуллерен подобные частицы (Onion-like carbon), средний размер которых составляет ~200 нм. При $|E| > E_0$ в областях стримеров формируются аморфные частицы сажи и ее кристаллитов (multilayered graphitic sheets), средний размер которых составляет ~350÷400 нм, а также фуллерен подобные частицы формируются в близи игольчатого электрода. Механические свойства полученных полимерных пленок определяется несколькими факторами, в том числе: числом поперечных связей между полимерными молекулами, размерами углеродных частиц и их агломератов, а также разнообразием аллотропных форм таких частиц. Сравнение результатов диэлектрической спектроскопии образцов полимерных пленок подтверждает однородность распределение углеродных частиц в исследуемых образцах. Работа выполнена при поддержке гранта российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) No 18-48-160024).

Литература:

[1] M.P.Danilaev, E.A.Bogoslov, Yu.E.Polsky, I.V.Yanilkin, I.R.Vakhitov, A.I.Gumarov, L.R.Tagirov. Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol.9. No.3. Pp. 385–388.

Электронная и атомно-силовая микроскопия проводилась на базе Междисциплинарного центра "Аналитическая микроскопия" КФУ.

- [2] Takeshi Akasaka, Atsuhiro Osuka, Shunichi Fukuzumi, Hideki Kandori, Yoshio Aso Chemical Science of π-Electron Systems. Springer. Japan. 2015. P.777.
- [3] Yasuda H.K. Plasma Polymerization, London: Academic, 1985.

^{*} danilaev@mail.ru

ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П.А. Тополянский^{1*}, С.А. Ермаков^{1*}, А.П. Тополянский^{1*}

¹ ООО «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Описан процесс создания ретенционных покрытий микроплазменным напылением из порошковых материалов, а также плазменно-импульсным осаждением с использованием прутковых или проволочных материалов. Приведены основные характеристики новых установок для микроплазменного напыления УПНН-170 и плазменно-импульсного осаждения PPD-ATOM-106. Отличительными характеристиками разработанного оборудования является малогабаритность, низкая энергоемкость и простота обслуживания.

В настоящее время проблемы сколов облицовок из-за низкой адгезионной прочности к металлу коронок и зубных протезов [1] продолжают встречаться довольно часто. Поэтому поиск и **усовершенствование** новых процессов. **у**величивающих адгезионную прочность облицовок с дентальными металлическими поверхностями обеспечивающих И защиту ΟТ негативных последствий использования металла в полости рта, является актуальной задачей.

Для улучшения адгезионных характеристик облицовок из полимеров и керамики к штампованным и литым протезам используются разрешенные к применению ретенционные покрытия, наносимые микроплазменным напылением (МПН) [2-4], а также методом плазменно-импульсного осаждения (ONU) свойств образцов Проведенные исследования покрытиями по сравнению с образцами без покрытий, показали более плотное прилегание облицовочных материалов напыленным поверхностям за счет высоконадежного механического зацепления с развитой поверхностью. Прочность сцепления при нормальном отрыве материала облицовки в случае использования напыленного покрытия по сравнению с традиционными методами предварительной обработки повышается в 3-5 раз. При этом зубные протезы и несъемные коронки имеют более высокую устойчивость к разрушающим нагрузкам.

Сущность МПН состоит в нанесении покрытий из отдельных частиц порошкового материала, нагретого и ускоренного с помощью

аргоновой плазменной струи при температуре нагрева изделий не более $100-150^{\circ}$ С. В отличие от мощных плазменных установок микроплазменные процессы используются для нанесения покрытий на тонкостенные и малогабаритные детали для исключения их перегрева и деформаций. Процесс характеризуется минимальными шумовыми характеристиками. В качестве порошковых материалов для МПН применяются титановые сплавы или сплавы на кобальтовой основе, аналогичные или близкие по химическому составу к каркасу протеза. Фракционный состав порошка - +45-100 мкм. Основные свойства наносимых покрытий: толщина 100-150 мкм, пористость 10-15%, адгезионная прочность 20-60 МПа, параметр шероховатости R_a 20-25 мкм (для сравнения, после пескоструйной обработки параметр шероховатости R_a составляет 2.5-10 мкм).

Для нанесения порошковых материалов разработана установка микроплазменного напыления УПНН-170 (рис. 1) и порошковый дозатор ПД-170 (рис. 2), основанный на эжекционно - импульсном принципе подачи порошка. Технические характеристики разработанной установки: потребляемая мощность 2,5 кВт, номинальный ток 40-60 A, номинальное рабочее напряжение 42 B, расход аргона 5 л/мин, занимаемая площадь, не более 0,5 м2, масса, не более 40 кг.



Рисунок 1. Установка для МПН УПНН-170 и вид плазменной струи в режиме МПН

ПИО покрытий относится к процессам электрофизической обработки, в которых покрытие формируется за счет расплавления электрода (анода) и оплавления локальной зоны детали (катода) при подаче на них импульсов тока обратной полярности и генерирования плазменного потока. Покрытие осаждается при воздействии плазмы газового разряда и межэлектродной среды в

условиях неподвижно закрепленного держателя с вращающимся электродом и перемещения относительно него коронки или протеза. Для ПИО покрытий используются прутковые или проволочные присадочные материалы из титановых или кобальтовых сплавов. Образуемое покрытие характеризуется повышенной адгезионной прочностью по сравнению с покрытиями, нанесенными МПН. Толщина наносимых покрытий - 50-100 мкм. Параметр шероховатости поверхности покрытий R_a - 10-20 мкм.



Рисунок 2. Порошковый дозатор ПД-170



Рисунок 3. Установка для ПИО PPD-ATOM-106



2



б

Рисунок 4. Вид коронок с нанесенным адгезивным покрытием: а - методом ПИО: 6 - методом МПН

Для ПИО разработана установка PPD-ATOM-106 (рис. 3) с техническими характеристиками: потребляемая мощность 1,5 кВт, рабочее напряжение 20-100 В, расход газа до 10 л/мин, частота импульсов 50-500 Гц, длительность импульсов 20-100 мс, диаметр электрода 1,0-3,2 мм, длина электрода 100 мм, скорость вращения электрода до 1800 об/мин, занимаемая площадь, не более 0,5 м2, масса, не более 25 кг.

Изготовление облицованных коронок и зубных протезов при использовании рассмотренных выше процессов (рис. 4) предполагает выполнение следующих этапов: штамповку или литье металлических коронок и зубных протезов, обезжиривание, абразивно-струйная обработка наружной поверхности, нанесение покрытия методом МПН или ПИО, обработка поверхностей адгезивными системами, окончательное нанесение облицовок из

полимера или керамики по традиционным технологиям. При использовании ПИО абразивно-струйная обработка не используется.

За счет увеличения площади контакта при образовании шероховатой и пористой поверхности адгезия облицовки с каркасом повышается, а также уменьшается просвечивание металла через облицовку.

Плазменные ретенционные покрытия могут наноситься также на корневую и коронковую части штифтовых вкладок.

Литература

- [1] Restorative Dentistry. By: Italian Academy of Restorative Dentistry. 2012. 688 p.
- [2] Alontseva D., Borisov Y., Voinarovych S., Kyslytsia A., Kolesnikova T., Prokhorenkova N., Kadyroldina A. Development of technology of microplasma spraying for the application of biocompatible coatings in the manufacture of medical implants. Przeglad Elektrotechniczny. 2018. № 7. pp. 94-97
- [3] Lugscheider E., Bobzin K., Zhao L., Zwick J. Assessment of the Microplasma Spraying Process for Coating Application. Advanced engineering materials. 2006. № 7. pp. 635-639
- [4] Besov A.V., Maslyuk V.A., Stepanchuk A.N., Napara-Volgina S.G., Orlova L.N. Theory, production technology, and properties of powders and fibers cobalt-chromium powder alloys and retention coatings made from them for orthopaedic stomatology. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2005. Vol. 44 (5). pp. 207-210
- [5] Jiao Z., Peterkin S., Felix L., Liang R., Oliveira J.P., Schell N., Scotchmer N., Toyserkani E., Zhou Y. Surface Modification of 304 Stainless Steel by Electro-Spark Deposition. Journal of Materials Engineering and Performance. JMEPEG ASM International. https://doi.org/10.1007/s11665-018-3579-0

^{*} topoljansky@mail.ru

ИСКЛЮЧЕНИЕ НЕПЕРЕНОСИМОСТИ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

П.А. Тополянский^{1*}, С.А. Ермаков¹, А.П. Тополянский¹

¹ ООО «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен безвакуумный и бескамерный плазмоструйный процесс осаждения тонкоплёночного покрытия на основе соединений кремния из газовой фазы. Для реализации этого процесса малогабаритный используется плазмохимический реактор. Одновременно с нанесением покрытия осуществляется плазменная стерилизация поверхности. Приведены основные характеристики установки TesisDent-118 для плазмохимического осаждения из газовой фазы кремнийсодержащих покрытий. Отличительными характеристиками разработанного оборудования отсутствие применения вакуумных камер, малогабаритность, низкая энергоемкость и простота обслуживания.

Для изготовления несъемных зубных протезов применяются металлические конструкции. В дальнейшем они могут облицовываться керамическими или полимерными материалами. Искусственные коронки и протезы испытывают механические нагрузки при жевательных движениях, химическое и биологическое воздействие в ротовой среде под влиянием слюны, пиши, лекарств. а также постоянных изменений температуры и влажности. В этих условиях одной из частых проблем пациентов, которые используют облицованные коронки и зубные протезы, является образование трещин и сколов облицовок в условиях экстремальных напряжений сдвига и нормальных нагрузок. Основной причиной этой проблемы является частичное или полное ослабление фиксации облицовки, за низкой адгезионной прочности К металлической еë Кроме наличие любых поверхности. этого металлических конструкций в полости рта может приводить к гальванозу, появлению аллергических реакций и привкуса металла, колонизации микроорганизмов и образованию биоплёнок, переходу токсичных элементов из металлов в организм, сдвигу рН среды ротовой полости.

Простое смачивание адгезивными системами на основе силанов в виде жидкостей для создания химической связи с металлами вызывает много вопросов. С материаловедческих позиций модификация металлических поверхностей может осуществляться либо за счет диффузионного процесса и, соответственно,

изменения химического состава поверхностного слоя, процесса формирования покрытия с четкой границей раздела. Для надежной фиксации облицовок из полимера или металлическую поверхность зубных протезов коронок И целесообразно модифицировать путем нанесения покрытий с взаимным диффузионным проникновением элементов покрытия и металла. При этом в химическом составе покрытия и материала облицовок должны быть одноименные элементы. Важно отметить, что создание таких покрытий на металлической поверхности возможно только в условиях повышенной температуры в контакте покрытие - подложка и увеличенного давления потока осаждаемых ионизированных частиц. Также определяющим фактором является общее время воздействия этих параметров на металл.

С учетом этих требований применительно к коронкам и зубным протезам разработан процесс и установка TesisDent-118 (рис. 1) для химического осаждения из паровой фазы многослойного тонкопленочного кремнийсодержащего покрытия PateksDent. Данная технология относится к безвакуумным и бескамерным процессам плазмоструйного осаждения тонкоплёночных покрытий газовой фазы при использовании малогабаритного плазмохимического реактора и температуре нагрева деталей. не 100-150°C. осуществляется превышающей Процесс одновременной плазменной активацией реакционного газового потока и локальной зоны детали, на которое наносится покрытие. Для осаждения покрытия используются жидкие прекурсоры на элементоорганических и неорганических жидкостей. Покрытие PateksDent явпяется аморфным, благодаря использованию прекурсоров с элементами аморфизаторами, а также в связи с высокими скоростями охлаждения, равными (1010- 10^{12}) К/c. характеризуется химической инертностью, коррозионностойкостью, является прозрачным и обеспечивает повышенные гидрофильные и электроизоляционные свойства поверхности. Технические характеристики установки TesisDent-118: напряжение питания 220 В, потребляемая мощность, не более 5 расход аргона, не более 5 л/мин, расход жидких технологических реагентов, не более 0.5 г/ч, занимаемая площадь. не более 0.5 м^2 . масса, не более 40 кг.

Данный технологический процесс нанесения кремнийсодержащего покрытия PateksDent на коронки и протезы состоит из их обезжиривания в ультразвуковой ванне, промывке дистиллированной водой, сушке при температуре порядка 100°С и установке на вращающееся планетарное устройство (возможно индивидуальное нанесение покрытия). При вращении планетарного устройства каждая позиция с коронкой или протезом оказывается в зоне воздействия атмосферной плазменной струи, которая омывая

изделие, наносит кремнийсодержащее покрытие толщиной порядка 0,3-1 мкм. Заданная толщина покрытия обеспечивает его сплошность, равномерность и бездефектность. Длительность нанесения покрытия составляет от долей до нескольких минут. Для повышения эффективности фиксации коронок и протезов на культе зуба покрытие PateksDent наносится и на все внутренние поверхности.

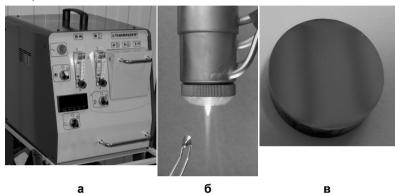


Рисунок 1. Установка для нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий TesisDent-118 (а), процесс индивидуального нанесения покрытия PateksDent на коронку из стали 12X18H10T (б) и вид полосы покрытия на образце-свидетеле (в)

Разработанная технология обеспечивает повышенные адгезионные и когезионные характеристики наносимого покрытия в условиях испытаний методом Scratch Testing по ISO 20502:2005, ASTM C1624-05 (2015). Исследования технологических остаточных напряжений в зоне перехода покрытие - подложка показали образование остаточных напряжений сжатия, способствующих залечиванию микродефектов поверхности и повышению работоспособности в условиях циклических нагрузок. Данные условия обеспечиваются цикличностью процесса осаждения покрытия, поддержанием и температуры контролем заданной И скорости вращения. рабочие параметры процесса Оптимальные осаждения для минимизации напряжений зависят от свойств материала коронок и протезов (химического состава, шероховатости, теплопроводности и др.), конкретной их конструкции, условий осаждения.

Наносимое покрытие отвечает требованиям бездефектности, характеризуется диффузионным проникновением элементов подложки в покрытие, обеспечивающее надежную адгезионную связь с металлом. Химический состав покрытия PateksDent

показывает близость к химическому составу покрытий, наносимых газопламенным осаждением и методом CVD, для которых была доказана повышенная адгезионная прочность облицовочных материалов.

Таким образом, технология создания облицованной коронки или зубного протеза состоит из нанесения покрытия PateksDent на металлическую OCHOBV. смачивания раствором сипановой адгезивной системы методом протирки, окунания или распыления. В качестве силанового связующего слоя используются различные органосилановыми адгезивные системы С агентами. окончательного нанесения полимерных или керамических облицовочных материалов на поверхность путем традиционного изготовпения.

Разработанное оборудование является простым и экономичным и может наносить покрытия на коронки и зубные протезы при атмосферном давлении, как на наружную, так и внутреннюю поверхность.

При использовании кремнийсодержащего покрытия PateksDent можно отказаться от применения других технологий фиксации облицовок за счет механического зацепления. Покрытие PateksDent можно также наносить на внутренние поверхности коронок и протезов, что позволит обеспечить образование химических связей со связующим материалом непосредственно при креплении коронки на культю зуба.

Разработанное оборудование может найти применение в стоматологических клиниках и лабораториях для изготовления коронок и зубных протезов, а также в научно-исследовательских лабораториях и кафедрах медицинских университетов. При этом разработанные покрытия могут использоваться не только для коронок и зубных протезов, но и для нанесения покрытий на различные детали имплантационного назначения для ортопедии и травматологии.

^{*} topoljansky@mail.ru

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

Никифоров С.А.^{1*}, Цивильский И.В.^{1**}, Гильмутдинов А.Х.^{1***}, Рубля Р.С.^{1****}

¹КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

Горелки с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) обычно используются в спектроаналитических приложениях (СИСП) в качестве источников ионов высокой чистоты и в технологических целях (ТИСП) как перспективный инструмент для газофазного синтеза порошков для аддитивного производства. Общая схема применения индуктивно-связанной плазмы приведена на рисунке 1.

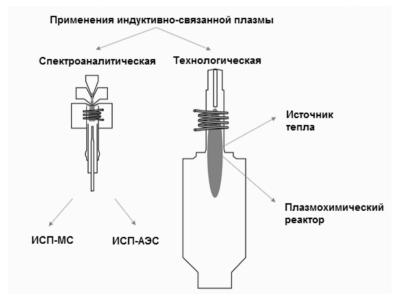


Рисунок 1. Основные области применения аналитической и технологической индуктивно-связанной плазмы.

Принцип работы спектроаналитической и технологической ИСП одинаков. Соответственно общую схему решения задачи ИСП можно разделить на следующие этапы:

1. Решение уравнения Пуассона в терминах магнитного векторного потенциала в трех областях: аргоновая плазма, медная катушка и

окружающий воздух. Источниковый член в правой части уравнения включает ток катушки и индукционный ток:

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \cdot (\vec{J}_{coil} + \vec{J}_{ind})$$

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \cdot (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})$$
(1)

2. По найденным значениям векторного потенциала во всех трех областях необходимо рассчитать электрическое и магнитное поля, а также плотность индукционного тока в плазме:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t},$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A},$$

$$\vec{I}_{ind} = \sigma \vec{E}.$$
(2)

В формуле (2) первым слагаемым в правой части можно пренебречь, если плазма рассматривается в приближении локального термодинамического равновесия, когда плотности электронов и ионов равны, а заряд скомпенсирован. В таком случае $\nabla \phi \to 0$.

- 3. Система уравнений Навье Стокса решается с учетом теплообмена и электромагнитных эффектов: к уравнению движения добавляется сила Лоренца $\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$, мощность излучения плазмы и объем нагрева добавляются к уравнению теплопроводности.
- 4. Согласно найденной температуре аргона, его локальная электропроводность рассчитывается согласно уравнению Саха, и шаги 1–4 повторяются снова на каждом временном шаге. Электропроводность смеси горячих газов рассчитывается согласно подходу, разработанному Линднером [1].

Для демонстрации решения была разработана цифровая модель СИСП представленная на рисунке 2.

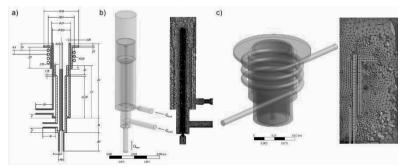


Рисунок 1. а) основные размеры в миллиметрах; b) геометрия газонаполненной области и частичное сечение трехмерной сетки для решения газодинамической задачи; c) геометрия и частичная трехмерная сетка для решения связанной газодинамической-электромагнитной задачи.

Алгоритм позволяет получить нестационарное распределение полей температуры и скорости СИСП представленное на рисунке 2.

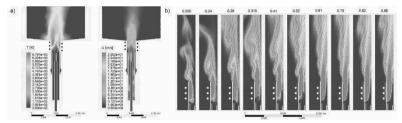


Рисунок 2. Расчетные профили: а) температуры и скорости спектроаналитической ИСП при t = 0,3 [c]; b) Температура на разных временных шагах с нормированными векторами скорости вблизи выхода горелки. Время в секундах показано вверху каждого кадра.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-42-160015) и Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 075-03-2020-051 (номер темы fzsu-2020-0020).

Литература:

[1] H. Lindner, A. Bogaerts, Multi-element model for the simulation of inductively coupled plasmas: Effects of helium addition to the central gas stream, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 66, Issue 6, 2011, p. 421-431, https://doi.org/10.1016/j.sab.2011.04.007

^{*} SANikiforov@kai.ru

^{**} ivtsivilskiv@kai.ru

^{***} albert.gilmutdinov@kai.ru

^{****} ratmir.rublya@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ

Мельников А.С.^{1*}, Цивильский И.В.^{1**}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

В аддитивном производстве предъявляются определённые требования к качеству используемого сырья. Так, металлические порошки должны иметь определённый фракционный состав, форму и структуру частиц. Большие возможности имеет способ синтеза и обработки частиц в индуктивно-связанной плазме (ИСП). В этом случае могут быть получены частицы идеально сферической формы необходимого размера, а также композитные частицы типа «ядро – оболочка». Однако необходимо задать определённые параметры обработки (скорости потоков, температуры, массовый расход порошкового сырья). Один из путей определения оптимальной технологии является математическое моделирование.

В настоящей работе рассматривается подход описания с помощью математической модели процессов испарения и конденсации паров металлических частиц при их обработке в ИСП.

Скорости частиц описываются уравнением:

$$\rho_{p} \frac{du_{p}}{dt} = \frac{\sqrt[3]{4}C_{d}\rho(u - u_{p})}{d_{p}} |u_{rel}| + g(\rho_{g} - \rho), \tag{1}$$

где ρ_p – плотность частицы, ρ – плотность газа, u_p – скорость движения частицы, u – скорость течения, d_p – диаметр частицы, C_d – коэффициент переноса.

Нагрев, плавление, кипение и конденсация описываются с учётом уравнения баланса энергии:

$$Q = hS(T_g - T_p) + A\sigma\varepsilon(T_p^4 - T_a^4), \tag{2}$$

где h — коэффициент теплопроводности, A — площадь поверхности частицы, σ_{SB} — постоянная Стефана — Больцмана, ε — коэффициент излучения, T_g , T_p , T_a — соответственно температуры газа, частицы и окружающей среды. При этом фазовые переходы происходят при постоянной температуре частицы [1].

Полностью расплавленная частица начинает испаряться, при этом плотность потока паров согласно уравнению Максвелла:

$$I = k_c (c - c_g), \tag{3}$$

где k_c – коэффициент массопереноса, c – концентрация паров над поверхностью частицы, c_e – концентрация паров в объёме газа.

Образующиеся пары материала частицы распространяются в соответствии с уравнением баланса плотности:

$$\frac{d\rho_{v}}{dt} + (u \cdot \nabla)\rho_{v} = D\Delta\rho_{v} + S(\rho_{v}), \tag{4}$$

где $ho_{_{V}}$ – плотность пара, D – коэффициент диффузии, S – источниковое слагаемое.

Распределения полей температуры, давления, газовых потоков получены из ранее разработанной модели ИСП-реактора [2]. Моделирование осуществлялось с помощью пакета Matlab.

Рассматривались частицы из никеля (Ni, 40 мкм) и оксида алюминия (Al_2O_3 , 70 мкм). Массовый расход порошка $3\cdot10^{-5}$ кг/с. На рисунке 1 представлены результаты моделирования динамики 5 частиц Ni, полностью испаряющихся за 0,13 c, и 5 частиц Al_2O_3 , испаряющихся за 0,175 c.

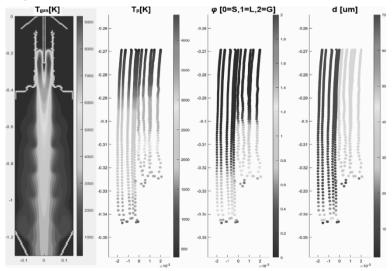


Рисунок 1. Слева направо: поле температур плазмы; температура, фаза и диаметр частиц вдоль их траекторий

Также выполнено моделирование в ANSYS облака паров испарившегося металла при различных скоростях газовых потоков (рисунок 2).

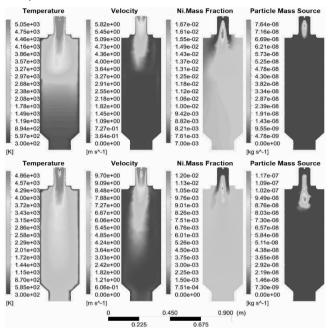


Рисунок 2. Распределения полей при разных скоростях потока: температура, скорость, массовая доля Ni, массовый источник частиц

Оценённая плотность паров является определяющим параметром для последующего моделирования конденсации паров с образованием многокомпонентных частиц.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-42-160015) и Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 075-03-2020-051 (номер темы fzsu-2020-0020).

Литература:

- [1] M. I. Boulos. The inductively coupled R. F. (radio frequency) plasma. 1985, Pure & Appl. Chem., Vol. 57, No. 9, pp. 1321–1352
- [2] I. V. Tsivilskiy et al. 2020, J. Phys. D: Appl. Phys. 53, 455203. DOI: 10.1088/1361-6463/aba45f

^{*} melnikovas@stud.kai.ru

^{**} ivtsivilskiy@kai.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ ОТРАБОТАННЫХ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нагулин К.Ю.^{1*}, Назаров Р.^{1**}, Гайсина А.Р.^{1***}, Гильмутдинов А.Х.^{1****}

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

Основной причиной задержки в развитии аддитивных технологий является недостаточный ассортимент высококачественных порошковых материалов. А так же невысокая эффективность использования порошкового материала. В процессе послойного построения деталей часть порошка подвергается химическому и термическому воздействию. Как пример — изменения фракционного состава, форма частиц, химический состав его частиц и т.д.

В качестве объектов исследования выступали порошки жаропрочные порошки никелевых сплавов (марки ЭП648). Для сравнения исследовались три разные партии: исходный порошок, отработанный в 3D машине и восстановленный в потоке индуктивно-связанной плазмы.

Для плазменной обработки использовали лабораторную установку в основе, которой: радиочастотный (5,2 МГц) кварцевый плазматрон с мощностью 40 кВт подробно описанную в [1-2].

На рисунке 1 приведены микрофотографии частиц исходного, использованного и восстановленного в плазме порошка сплава Эп648.

SEM изображения частиц исходного (а), использованного (б) в 3D машине и восстановленного в плазме (в) порошка сплава ЭП648, представленные на рисунке 2, позволяют выявить изменения в морфологии частиц в ходе использования порошка в технологии SLM и последующего восстановления в потоке индуктивно-связанной плазмы. Исходный порошок (рис.2а) среднего качества характеризуется достаточно широким интервалом размеров частиц, имеются частицы вытянутой формы и сателлиты.

В результате многократного использования и просеивания исключаются частицы с удлинением, но проявляются спеченные агломераты двух и более частиц (рис.2б). Впоследствии обработки в плазме происходит сфероидизация мелких частиц и продемонстрированных агломератов.

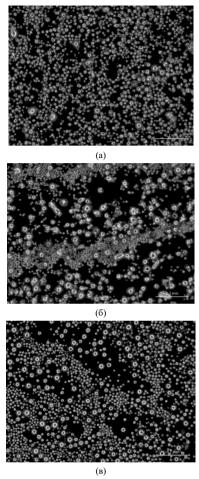


Рисунок 1.Изображение в оптическом микроскопе частиц исходного (а), использованного (б) и восстановленного в плазме (в) порошка сплава ЭП648.

Поверхность сфероидизированных частиц гладкая, с выраженным рисунком дендритной структуры, что повышает качество порошкового материала, обеспечивает высокую текучесть.

В заключение данного исследования можно сделать вывод, что данный вид обработки порошков (с помощью индуктивно-связанной плазмы) существенно повышает качество вторичных порошков (частиц утратившие свою сферичность), а так же в перспективе данная технология позволит создавать уникальные градиентные

сплавы и проводить «ресайлинг» отходов металлургического производства и значительно снизить стоимость производства.

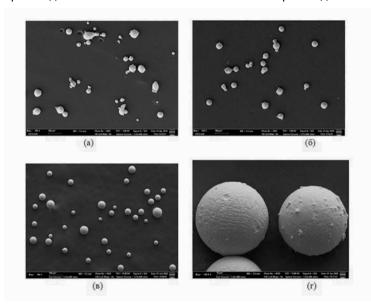


Рисунок 2.SEM изображение частиц исходного (а), использованного (б) и восстановленного в плазме (в),(г) – морфология поверхности сфероидизированной частицы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации госконтракт № 075-03-2020-051 по теме № ФЗСУ-2020- 0020 и гранта РФФИ совместно с Академией наук Республики Татарстан (контракт № 18-42-160015).

Литература:

- [1] K. Nagulin, R. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov, Plasmochemical Processing Of Powder Materials For Heat-Protective Coatings, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [2] M. Voronov, K. Nagulin, R. Nazarov, A. Gilmutdinov, Numerical Simulation Of The Powder Particles Behaviour In A Technoligical Icp, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).

^{*} knagulin@mail.ru

^{**} nazarov.ramis@yandex.ru

^{***} fullaigul@gmail.com

^{****} albert.gilmutdinov@kai.ru

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ, ИСПУСКАЕМЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКА ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ.

Носков А.И.1*, Дробышев С.В.1**, Лоскутова П.С.1***

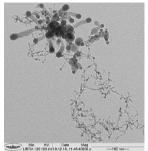
¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева-КАИ, Казань, Россия

Использование жаропрочных, нержавеющих металлических и композиционных порошков позволило расширить область применения 3D-машин в таких направлениях, как авиация, медицина и космос [1-2]. В настоящее время известно несколько методов аддитивного производства [3]. Наиболее популярными и экономичными методами изготовления деталей являются:

- 1) Сплавление порошка в слое с лазерным лучом (Laser Beam Powder Bed Fusion). Powder bed fusion (PBF) (синтез на подложке) категория процессов 3Д-печати, в котором энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала. Laser Beam (лазерное плавление) группа по источнику энергии, который Синтез на подложке использует для расплавления материала.
- 2) Directed energy deposition (DED) Осаждение направленной энергией (ОНЭ). «Прямой подвод энергии непосредственно в место построения» или послойное формирование изделия методом внесения строительного материала непосредственно в место подвода энергии.

Большинство научных исследований направлено на оптимизацию процесса лазерного спекания или на качество конечного продукта. Однако в литературе нет подробной информации о наночастицах (НЧ), образовавшихся при повторной конденсации исходного металлического порошка после лазерного плавления. В данной работе НЧ, испускаемые во время лазерной обработки порошковых материалов из нержавеющей стали, подробно охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Результаты. На рис. 1-3 представлены изображения, полученные на ПЭМ, металлических порошков и соответствующие дифракции электронов в выбранной области для трех типов устройств аддитивного выращивания. Изображения ПЭМ ясно показывают, что металлические порошки повторно конденсировались после лазерной обработки. Это привело к образованию множества НЧ которые собрались в цепочки. Средний размер НЧ в основном находится в диапазоне 5-11 нм.



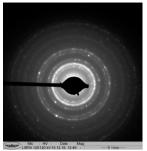
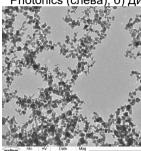


Рисунок 1. а) ПЭМ-изображения наночастиц металлического порошка, сформированного в лазерном комплексе LC-10 IPG-Photonics (слева); б) Дифрактограмма этой области (справа)



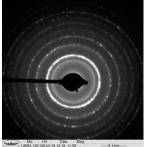
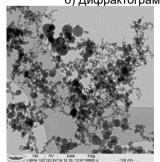


Рисунок 2. а) ПЭМ-изображения наночастиц металлического порошка, сформированных на принтере EOS M270 (слева); б) Дифрактограмма этой области (справа).



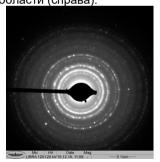


Рисунок 3. а) ПЭМ-изображения наночастиц металлического порошка, сформированных в Insstek MX-Mini (слева); б) Дифрактограмма этой области (справа).

В результате изучения образцов методом электронной дифракции было обнаружено, что на электронограммах всех трех образцов присутствует яркий набор колец (2,02; 1,43; 1,17; 1,01; 0,90), которые

можно отнести к альфа-Fe (карта ICDD № 60696) и довольно небольшое количество размытых колец малой интенсивности, что затрудняет идентификацию этих фаз. Для более детального анализа мы провели исследования с использованием микроскопии высокого разрешения с использованием оборудования HAADF STEM.

Вывод. Результаты исследований показывают, что в процессе аддитивного производства изделий появляется значительное количество мелкодисперсных конденсированных частиц размером 3-40 нм, которые образуются в результате взаимодействия лазерного излучения и металлического порошка (технологии LB-PBF и DED). НЧ представляют собой агломераты с близким фазовым составом. Получена зависимость размера частиц индуцированной плазмы от ее температуры. Проведен краткий анализ влияния полученных НЧ на организм человека. Безопасный режим - это vстановка дополнительных зашитных барьеров. высокоэффективных фильтров, мошной системы вентиляции. объем всего рабочего помещения, обрабатываемого за час, и использование специальной одежды для предотвращения попадания частиц в организм человека. Исследования в этой области следует продолжить, чтобы получить более подробные и точные результаты.

Литература:

- [1] Mark Curles German selective laser melting specialist mulls IPO // Industrial laser solutions. 15.08.2014.
- [2] Renishaw [Regional head office], «What is metal additive manufacturing», https://www.renishaw.com/en/laser-melting-metal-3d-printing-systems--15240
- [3] Globatek Group JSC, «DMD technology direct metal deposition», http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/dmd_tech/
- [5] Composition monitoring using plasma diagnostics during direct metal deposition (DMD) process. Joonghan Shin,J. Mazumder. Optics and Laser technology. Volume 106, october 2018, p. 40-46.
- [6] M. Milan, J.J. LasernaDiagnostics of silicon plasmas produced by visible nanosecond laser ablation. Spectrochim. Acta Part B, 56 (2001), pp. 275-288
- [7] M. Li, T.P. Duffey, J. Mazumder Spatially and temporally resolved temperature measurements of plasma generated in percussion drilling with a diode-pumped Nd:YAG laser. J. Appl. Phys., 84 (1998), pp. 4122-4127

^{*} ainoskov@kai.ru

^{**} warlordik 009@mail.ru

^{***} polinalsk12@gmail.com

СПОСОБ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ В ОБЪЁМЕ ПОЛОГО КАТОДА СИЛЬНОТОЧНОГО НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Островерхов Е.В.^{1*}, Денисов.В.В, Ковальский С.С

¹ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

Обработка изделий ионно-плазменным методом больших вакуумных объемах, это актуальная задача и по сей день. В промышленном производстве важную роль играет количество изделий обрабатываемых за один цикл. В настоящее время в производственных процессах ионно-плазменной обработки применяются комбинированные методы. В одном вакуумном цикле производят азотирование, а затем нанесение покрытий. Для решения подобных задач требуется создать плазмогенератор большого объёма для обработки крупногабаритных протяжённых изделий. Однако в протяженных плазмогенераторах появляются проблемы связанные с однородностью распределения плазмы в объёме рабочей вакуумной камеры. Неравномерность распределения плазмы возникает в связи с использованием одного источника электронов для несамостоятельного тлеющего разряда.

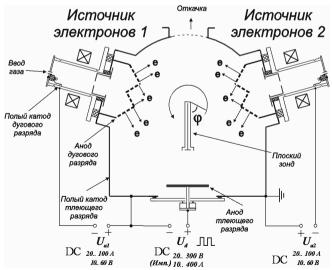


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки №1

Решить данную задачу можно применив два и более источника электронов расположенных симметрично относительно друг друга. При проектировании крупногабаритных систем требуется спрогнозировать распределение плазмы в объёме рабочей камеры [1-2]. Даная работа посвящена реализации применения принципа суперпозиции распределения ппазмы В системе двумя источниками электронов. На рисунке приведена схема экспериментальной установки №1. Вакуумная камера с размерами 600X600X600 мм позволяет обрабатывать детали относительно небольшого размера. Для обработки крупногабаритных изделий протяженной формы требуется использовать вакуумные камеры соответствующего размера и соотношения сторон. В нашем распоряжении была камера диаметром 600мм и высотой 1200 мм (соотношение сторон 1:2). Вторая часть работы посвящена реализации применения принципа суперпозиции для масштабирования электродной системы с двумя источниками электронов. На рисунке 2 показана экспериментальная установка No₂

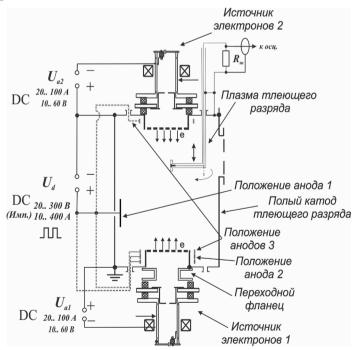


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки №2

В ходе работы мы выяснили, что принцип суперпозиции распределения плазмы применим как для электродных систем с двумя источниками электронов, так и для масштабирования таких систем. Так же в ходе экспериментов были определены оптимальные форма и расположение анода несамостоятельного тлеющего разряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00370 A.

Литература:

- [1] V.V. Denisov, Yu.H. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas 26, 123510 (2019).
- [2] V.V. Denisov, S.S. Kovalsky, N.N. Koval, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverchov, P.M. Schanin. Ion current density distribution in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 927. P.176-184.

^{*} evgeniy86evgeniy@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Ковальский С.С.^{1*}, Денисов В.В.¹, Островерхов Е.В.¹

¹ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

Несамостоятельные формы дуговых разрядов низкого давления перспективными формирования объемной являются ДЛЯ низкотемпературной плазмы и использования в технологических применениях. Импульсный режим горения разрядов давления позволяет повышать мгновенную мощность в разряде на порядок при сохранении той же средней мощности и имеет ряд особенностей, в частности изменяется величина и распределение значений основных параметров генерируемой плазмы в объеме вакуумной камеры. Целью данной работы было оценить влияние условий горения несамостоятельного дугового разряда низкого давления, формируемого плазменным источником с накаленным и полым катодом в системе с полым анодом в импульсном режиме, на основные характеристики разряда и динамику формирования ппазмы.

Генератор плазмы с накаленным и полым катодом устанавливался на верхнем основании цилиндрической камеры, внутренние стенки которой являлись анодом разряда (Рисунок 1). Высота камеры составляла 120 см, а диаметр – 60 см.

Вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до остаточного давления 2 10⁻³ Па, после чего через генератор плазмы напускался рабочий газ. В качестве рабочего газа выступали аргон или азот.

Электропитание накала генератора плазмы осуществлялось от источника постоянного тока. Электропитание разряда импульсного осуществлялось ОТ источника напряжения параметрами: выходное напряжение (30-500) В, длительность импульсов (0,1-10) мс, частота повторения импульсов (1-200) Гц. Эквивалентная схема источника питания включает выходной емкостной накопитель и эквивалентную индуктивность проводов. Источник питания имеет защиту по превышению максимального тока, срабатывающую при значении тока разряда 800 А.

Измерения параметров плазмы проводились одиночным электрическим зондом, который устанавливался на верхнем основании камеры через ввод Вильсона на расстоянии ~18 см от оси генератора плазмы. Для измерения продольного распределения

параметров плазмы зонд перемещался на расстояние 20-80 см от верхнего основания камеры.

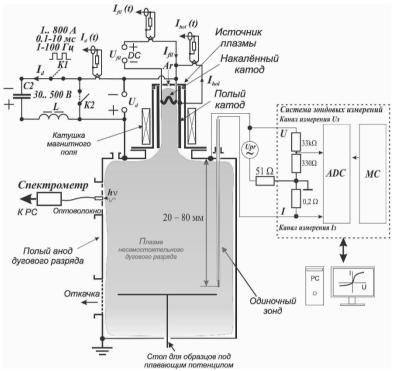


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Измерение величины тока И напряжения смещения производилась автоматизированной системой зондовых измерений, схематично представленной на рисунке 1. Обработка полученных зондовых характеристик производился графическим методом. Измерения проводились при рабочем давлении 0,6 Па в атмосфере аргона. Показания зонда фиксировались в моменты времени от 100 мкс до 500мкс от начала разрядного импульса с шагом 100 мкс при общей длительности импульса тока разряда около 550 мкс квазистационарный (Рисунок Выход режим горения В несамостоятельного дугового разряда происходил в среднем после длительности 500 мкс.

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости изменения величины основных параметров плазмы в разные моменты разрядного импульса, характеризующие динамику изменения параметров

плазмы на расстоянии 60 см от верхнего основания (половина высоты камеры) при разных напряжениях горения разряда.

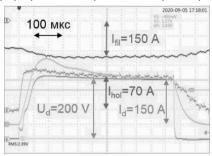


Рисунок 2. Характерные формы токов и напряжений, где U_d – напряжение горения разряда, I_d – ток разряда, I_{fil} – ток накаленного катода, I_{hol} – ток полого катода.

Из графиков видно, что в течение разрядного импульса температура электронов спадает, стремясь к значениям, характерным для стационарного режима горения разряда. Отдельного внимания заслуживает факт, что при напряжении 200 В скорость роста концентрации плазмы выше, чем при 300 В, что объясняется меньшим сечением ионизации при 300 В и, как следствие, меньшей долей энергии первичных электронов (электроны с накаленного катода) потраченной на генерацию плазмы.

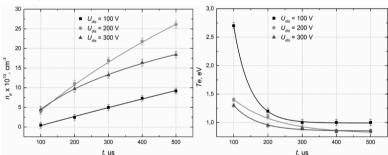


Рисунок 3. Зависимости изменения величины основных параметров плазмы в разные моменты разрядного импульса на расстоянии 60 см от верхнего основания при разных напряжениях разряда (слева-направо: концентрация плазмы и температура электронов).

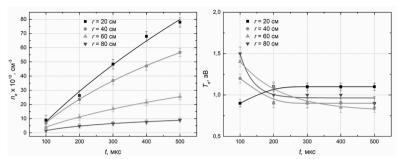


Рисунок 4. Зависимости изменения величины основных параметров плазмы в разные моменты разрядного импульса при изменении расстояния от верхнего основания камеры. Напряжение горения разряда 200 В (слева-направо: концентрация плазмы и температура электронов).

Анализ продольных распределений показывает приблизительно одинаковый характер изменения величины концентрации плазмы по длине камеры вне зависимости от момента измерения.

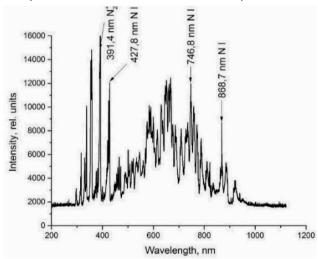


Рисунок 5. Спектр излучения азотной плазмы при параметрах разряда: напряжение горения 100 В, ток разряда 240 А, ток накала 113 А, рабочий газ — азот, давление 0,6 Па, Ток катушки магнитного поля 0,6 А, частота повторения импульсов 200 Гц, коэффициент заполнения 14 %.

Стоит отметить, что в начале импульса на расстоянии 20 см от верхнего основания камеры кроме основной группы плазменных

электронов в явном виде наблюдалась вторая группа со средней температурой 3 – 5 эВ.

В дальнейшем импульсный режим горения несамостоятельного разряда планируется использовать для тлеюшего ионноплазменного азотирования поверхности материалов. Для оценки атомарного эффективности генерации азота проводились эмиссионных спектров азотной ппазмы исследования использованием спектрометра Ocean Optics HR4000. Характерный вид спектра представлен на рисунке 5. В процессе исследований

было выявлено увеличение интенсивности свечения на линиях 746,8 нм и 868,7 нм, соответствующих атомарному азоту, при увеличении магнитного поля плазменного источника с накаленным и полым катодом для разных режимов горения разряда. Это указывает на увеличение числа реакций диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов с образованием атомарного азота в исследуемой области.

Полученные результаты говорят о перспективности использования импульсного режима горения несамостоятельного дугового разряда в протяженных вакуумных камерах при повышенных значениях напряжения горения несамостоятельного дугового разряда для обработки поверхности металлических материалов и изделий.

^{*} kovalskiy ss@bptvac.ru

НАНЕСЕНИЕ ТВЕРДЫХ, КОРРОЗИОННО- И ИЗНОСОСТОЙКИХ A-C:H:SIOX ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Гренадёров А.С.^{1*}, Жульков М.О.^{1, 2**}, Оскомов К.В.^{1, 1***}, Соловьёв А.А.^{1, 1****}, Хлусов И.А.^{3*****}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия ²Национальный медицинский исследовательский центр им. академика Е.Н.Мешалкина, Новосибирск, Россия ³Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации. Томск. Россия

Для создания медицинских имплантатов и изделий используют нержавеющие стали, например, AISI 304, 316 или 321, а также титан и сплавы на его основе, например, Ti-6Al-4V и Ti-6Al-7Nb. Недостатками данных материалов является низкая износостойкость и как следствие, попадание в организм частиц изношенного материала. также недостаточная коррозионная стойкость. приводящая к деградации имплантата. Все это приводит к серьезным необратимым для человеческого организма последствиям [1, 2].

Одним из способов устранения данных недостатков является модификация поверхности материала имплантата с помощью биосовместимых, коррозионно- и износостойких покрытий [3, 4]. Углеродные покрытия, легированные кремнием или оксидом кремния (DLC:Si, DLC:SiOx, a-C:H:SiOx, a-C:H:Si:O), в последнее испытывают большой интерес поскольку время обладают физико-механических, уникальным сочетанием высоких биологических трибологических И свойств [5-7]. Наиболее распространенные методы получения таких покрытий: магнетронное распыление графитовой кремниевой мишени. И также плазмохимический метод в смеси кремний и углеродсодержащих газов/жидкостей с использованием высокочастотного смещения подложки.

работе a-C:H:SiOx настоящей нанесение покрытий на нержавеющую сталь AISI 316L осуществлялось марки плазмохимическим методом С использованием импульсного биполярного потенциала смещения подложки. качестве плазмообразующего прекурсора использовался полифенилметилсилоксан (ПФМС), содержащий углерод, кислород, водород и кремний. Технологические условия нанесения позволяют изменять содержание элементов в покрытии, тем самым, управляя его свойствами.

Для проведения экспериментов использовалась вакуумная ионноплазменная установка объемом $0,2\,\mathrm{m}^3$ с турбомолекулярной системой откачки, оснащённая плазмогенератором с накалённым катодом. Предельное остаточное давление в рабочей камере составляло $7\cdot10^{-3}\,\mathrm{\Pi a}$, а рабочее давление аргона $8\cdot10^{-2}\,\mathrm{\Pi a}$. Расход ПФМС составлял $1\pm0,1\,\mathrm{m}$ л/ч. Амплитуда отрицательного импульса биполярного смещения, прикладываемого к подложке, варьировалась в диапазоне от 0 до 700 В, частота следования импульсов и коэффициент заполнения составляли 100 кГц и 60%, соответственно.

В работе было показано, что при данном расходе ПФМС существует оптимальная величина потенциала смещения (-300 В) при которой а-C:H:SiO_x покрытие обладает высокой твердостью H (18 \pm 1 ГПа), индексом пластичности H/E (0,11 \pm 0,01) и сопротивлением пластической деформации H³/E² (200 \pm 20 МПа). При этой величине потенциала смещения наблюдается низкое значение коэффициента трения менее 0,08 и скорости износа менее 8.5·10⁻⁷ мм³/H·м. Дальнейшее повышение смещения вплоть до -700 В хоть и приводит к снижению скорости износа до 8·10⁻⁷ мм³/H·м, но коэффициент трения увеличивается до ~0,12 и наблюдается локальное отслоение покрытия.

Кроме этого, показано, что $a-C:H:SiO_x$ покрытие, нанесенное на поверхность стали AISI 316L способствует повышению коррозионной стойкости. В частности, помощью С метода поляризационной потенциодинамики установлено, нанесения a-C:H:SiO_x покрытия снижается плотность тока коррозии j_{corr} с 1.1×10⁻⁷ A/cm² до 6×10⁻⁹ A/cm², плотность тока пассивации j_p с 2.2×10⁻⁶ A/cm² до 7×10⁻⁷ A/cm², а также повышается величина потенциала пробоя Еь с 352 до 901 мВ. В качестве электролита использовался раствор 3% хлорида натрия NaCl.

Проведенные медико-биологические исследования показали, что нанесенное a-C:H: SiO_x покрытие не является цитотоксичным по отношению к мононуклеарным клеткам крови человека (жизнедеятельность клеток составляет более 90%), а также способствует снижению адгезии тромбоцитов.

Полученные результаты свидетельствует о возможности потенциального использования a-C:H:SiO_x покрытий в медицине, в частности при создании имплантатов.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ №19-19-00186 и частичной финансовой поддержки гранта Президента РФ МК-1234.2020.8.

- [1] Rockwood and Green's fractures in Adults: 8th Ed. / Под ред. С.М. Court-Brown, J.D. Heckman, M.M. McQueen [et al.].- Philadelphia: Lippincot-Raven Publishers, 2014. V. 1- 2. 2416 р.
- [2] Тихилов Р.М., Шубняков И.И., Коваленко А.Н., Тотоев З.А., Лю Бо, Билык С.С. / Структура ранних ревизий эндопротезирования тазобедренного сустава // Травматология и ортопедия России. 2014. Т. 72. №2. С. 5-13.
- [3] Handbook of Antimicrobial Coatings. Editors: A.Tiwari, A. Chaturvedi. Elsevier. 2018. P. 596.
- [4] Surgical Tools and Medical Devices. Second Edition. Editors: Waqar Ahmed, Mark J. Jackson. Springer International Publishing Switzerland. 2016. P. 691.
- [5] Meskinis S. and Tamuleviciene A. / Structure, Properties and Applications of Diamond Like Nanocomposite (SiOx Containing DLC) Films: A Review // Materials science. 2011. V. 17. №4. P. 358-370.
- [6] Feng Wen, Jiaqi Liu, Jianlu Xue / The Studies of Diamond-Like Carbon Films as Biomaterials: Review // Colloid and Surface Science. 2017. V. 2. P. 81-95.
- [7] D. Bociaga, A. Sobczyk-Guzenda, W. Szymanskic et al / Mechanical properties, chemical analysis and evaluation of antimicrobial response of Si-DLC coatings fabricated on AISI 316 LVM substrate by a multi-target DC-RF magnetron sputtering method for potential biomedical applications // Applied Surface Science. 2017. V. 417. P. 23-33.

^{* 1711}Sasha@mail.ru

^{**} medicus-maligna@mail.ru

^{***} oskomov@yandex.ru

^{****} andrewsol@mail.ru

^{*****} khlusov63@mail.ru

СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ГАЗО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Денисов В.В.^{1*}, Денисова Ю.А.¹, Коваль Н.Н.¹, Ковальский С.С.¹, Леонов А.А.¹, Островерхов Е.В.¹, Савчук М.В.¹, Яковлев В.В.¹

¹ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

Разработка новых материалов с улучшенными свойствами для различных сфер применения является актуальной задачей. В подавляющем большинстве случаев эксплуатационные характеристики изделий зависят от свойств поверхности. Одними из наиболее эффективных и экологичных способов упрочнения поверхности металлических изделий являются электронно-ионноплазменные методы модификации, включающие методы ионноплазменного диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными элементами (азотирование. цементация. борирование и т.д.). плазменно-ассистированное напыление функциональных покрытий, электронно-пучковая обработка, ионная имплантация и другие. Особого внимания заслуживают методы генерации газоразрядной плазмы при низком, около 1 Па, давлении, при котором, возможно независимое управление всеми основными параметрами рабочего процесса (рабочее давление, ток разряда, горения разряда, температура воздействия на подложку и др.). Одной из основных проблем внедрения методов упрочнения поверхности материалов и изделий на основе плазмы разрядов низкого давления является высокая степень неоднородности концентрации газо-металлической плазмы, формируемой в больших, более 0,1 м³, вакуумных объемах. Одним перспективных методов формирования однородной низкотемпературной газоразрядной плазмы в больших вакуумных объемах является использование несамостоятельного сильноточного (до нескольких сотен ампер) тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. По способу генерации плазма, формируемая в полом катоде, может быть отнесена к пучковоплазменным образованиям низкого давления. Под пучковоплазменным образованием понимается плазменная среда, для формирования которой необходимо, во-первых, наличие электродной системы, в которой стабильно зажигается разряд низкого давления в определенных диапазонах рабочих параметров, а, во-вторых, инжекция пучка дополнительных заряженных частиц, например, электронов, которая значительно расширяет диапазоны рабочих параметров по напряжению горения, току, рабочему а главное позволяет независимо друг от друга регулировать эти рабочие параметры. Упрощенная схема системы пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом приведена на рисунке 1. Пучок электронов, инжектируемый из источника электронов на основе плазменного эмиттера в плазму, формируемую в полом катоде основного тлеющего разряда, ускоряется в прикатодном падении потенциала тлеющего разряда и затем рассеивается в результате первоначального отклонения при инжекции через сетчатый эмиссионный электрод сложной формы, ионизации, возбуждения молекул и атомов рабочего газа, упругого рассеивания в кулоновских взаимодействиях. Особенностью

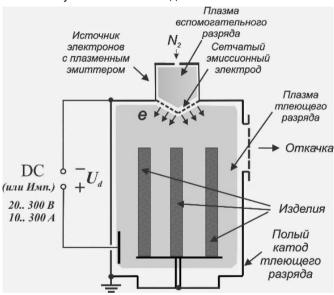


Рисунок 1. Схема системы генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления

является относительно низкое (100-200 В) напряжение горения основного тлеющего разряда. Доля электронного компонента тока на полый катод тлеющего разряда, под потенциалом которого находится и сетчатый эмиссионный электрод, получаемого в результате инжекции в несколько раз выше доли электронной компоненты тока, получаемой за счет процессов вторичной ионноэлектронной эмиссии со стенок полого катода. Именно инжекция пучка частиц определяет основные свойства плазменного

образования. В такой системе существует возможность генерации стационарной плазмы с концентрацией в диапазоне (109-10¹²) см⁻³ при давлении около 1 Па. возможность независимой регулировки такими параметрами как рабочее давление, ток разряда, энергия ионов на подложку, плотность ионного тока на подложку, состав рабочей также позволяет смеси. формировать низкотемпературную плазму в больших вакуумных объемах с низкой степенью неоднородности [1,2]. При исследовании импульсного режима горения сильноточного тлеющего разряда были достигнуты токи разряда до 800 А при низком (0.025-0.25 Па) давлении в полом катоде объемом 0,34 м³ при напряжениях горения разряда 400 В и длительности разрядных импульсов около 1 мс. Концентрация плазмы при давлении 0.025 Па достигала 10¹² см⁻³, а степень ионизации плазмы около 16 %. [2].

В результате цикла исследований разработаны режимы ионноплазменного азотирования ряда конструкционных инструментальных сталей в пучково-плазменных образованиях. генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом. В частности разработана методика управления фазовым составом поверхности штамповых сталей 4Х5МФС. Х12МФ. X12M процессе ионно-плазменного азотирования. позволяющая избегать формирования поверхности хрупкого нитридного («белого») слоя, состоящего из фаз ε-Fe₂₋₃N и v'-Fe₄N.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00370 А.

- [1] V.V. Denisov, Yu.H. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, P.M. Schanin The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas 26, 123510 (2019).
- [2] V.V. Denisov, S.S. Kovalsky, N.N. Koval, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverchov, P.M. Schanin lon current density distribution in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 927. P.176-184.
- [3] В.В. Яковлев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, Е.В. Островерхов, А.О. Егоров, М.В. Савчук Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом // Известия ВУЗов, Физика. 2020. № 10. 109-116.

^{*} volodyadenisov@yandex.ru

ПЛАЗМЕННО-РАСТВОРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ

Смирнова К.В.^{1*}, Извекова А.А.^{1**}, Иванов А.Н.^{1***}, Шутов Д.А.^{1****}, Рыбкин В.В.^{1****}

¹ФГБОУ ВО "ИГХТУ". Иваново. РФ

Аннотация. В работе представлены данные по получению наночастиц оксида меди из раствора нитрата меди под действием газового разряда. Полученные материалы исследованы с помощью ТГА, РФА, СЭМ и эергодисперсионного анализа. Размер получаемых частиц изучен методом динамического рассеяния света. Получаемые частицы имеют размер порядка 29,43 нм и состав СиО, после высокотемпературной обработки.

Применение наноматериалов различной структуры и размеров на основе благородных металлов, с годами становится все более йоннитуа практикой для катализа. биомидицины микроэлектроники, топливных элементов. Уже достаточно расширена научно-исследовательская база по изучению свойств, кристаллической структуры таких материалов. Так же хорошо изучены методы получения таких частиц. Одним из последних и перспективных методов является плазменно-растворный синтез [1]. Наночастицы оксидов переходных металлов, таких как железо, никель, кобальт, цинк и медь, находят широкое применение в различных областях науки и техники. Оксид меди является полупроводником р-типа с шириной запрещенной зоны 1,2 эВ, благодаря этому он является перспективным материалом для различных областей применения. Наночастицы CuO используются в качестве катализаторов [2], в микроэлектромеханических системах (M9MC) [3].

В работе использовалась водные растворы, которые готовились растворением 5 ммоль/л $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ в дистиллированной воде. Объем раствора 200 мл помещался в H-образную стеклянную ячейку, плечи которой разделены целлофановой мембраной. Более подробно схема ячейки процесса описана в работе [4]. Разряд зажигался путем подачи высокого напряжения на титановые электроды, расположенные над раствором на расстоянии 5 мм. Ток разряда 50 мА, время горения разряда 10 минут. Под действием разряда в анодной части ячейки образовывался коллоидный раствор тёмно-коричневого цвета. Синтезированные вещества центрифугировались и подвергались сушке на воздухе при температуре 50 °C в течение 24 часов на стеклянных подложках.

Рентгеноструктурный анализ порошков проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 3М (Буревестник, Россия, CuKα-излучение). Термогравиметрический (TFA) сканирующая дифференциальная калориметрия выполнялись на приборе синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Германия). Изображения поверхности порошков получены при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3. порошков Рентгенограммы синтезированных демонстрируют ярко Состав большое копичество выраженных рефлексов. полученного вещества, после высокотемпературной обработки, CuO. Данные ТГА подтверждают данные, полученные при помощи рентгеноструктурного анализа.

Фотографии, полученные с сканирующего электронного микроскопа (рис.1.), показали, что полученные вещества являются эллипсоидными частицами нанометрового диапазона. Данные, полученные исследованием коллоидного раствора методом динамического рассеяния света показали, что средний размер получаемых частиц 29,43 нм.

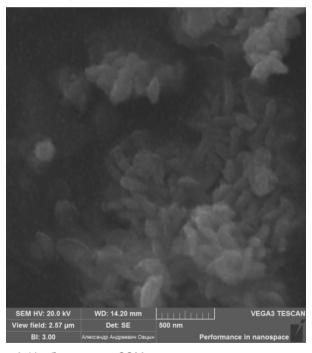


Рисунок 1. Изображение с СЭМ порошков оксида меди, полученных в плазменно-растворной системе.

- [1] Saito, G. Nanomaterial Synthesis Using Plasma Generation in Liquid / G. Saito, T. Akiyama // Journal of Nanomaterials, 2015. V. 2015. P 21.
- [2] M. Nasrollahzadeh, S. Mohammad Sajadi, A. Rostami-Vartooni, Green synthesis of CuO nanoparticles by aqueous extract of Anthemis nobilis flowers and their catalytic activity for the A3 coupling reaction, J. Colloid Interface Sci. 459 (2015) 183e188.
- [3] K. Zhang, Y. Yang, E.Y.B. Pun, R. Shen, Local and CMOS-compatible synthesis of CuO nanowires on a suspended microheater on a silicon substrate, Nanotechnology 21 (2010), 235602.
- [4] Shutov, D.A. Synthesis of CdO ultradisperse powders using atmospheric pressure glow discharge in contact with solution and the investigation of intermediate products/ D.A. Shutov, K.V. Smirnova, M.V. Gromov, V.V. Rybkin, A.N. Ivanov // Plasma Chem. Plasma Process. 2017. V. 38, № 1. P. 107-121.

^{*} smirnovakv1@gmail.com

^{**} esket@yandex.ru

^{***} ivanovan@isuct.ru

^{****} shutov@isuct.ru

^{*****} prof.rybkin@gmail.com

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЬЕРНОГО МИКРОРАЗРЯДА, ГЕНЕРИРУЕМОГО СИНУСОИДАЛЬНОЙ И ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМОЙ СИГНАЛА НАПРЯЖЕНИЯ

Гайнуллина С.В.^{1*}, Сайфутдинова А.А.^{2**}, Сайфутдинов А.И.^{1***}, Асадуллин Т.Я.¹

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия ²КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

Диэлектрические барьерные тлеющие разряды известны уже достаточно давно. Однако в последние годы возник новый виток исследований характеристик этих разрядов. Это связано с тем, что барьерные диэлектрические разряды находят широкий спектр применения в приложениях при давлениях порядка атмосферного – от плазменной аэродинамики до разложения газообразных веществ в плазме и плазменной медицины [1-4]. Стоит отметить, что малые пространственно-временные масштабы барьерных разрядов при атмосферном давлении затрудняют его прямое экспериментальное исследование. О параметрах разряда приходится судить из интегральных измеряемых величин. В частности, из измерений осциллограмм тока и напряжения, из оптических измерений и др. При этом зачастую на практике полезно знать и управлять пространственно-временными параметрами плазмы Помимо изменения частоты и амплитуды питающего напряжения большую популярность набирают экспериментальные исследования, посвященные исследованиям влияния формы питающего напряжения на характеристики разряда [5,6].

В представленной работе была сформулирована следующая цель: проведение численных и экспериментальных исследований влияния формы сигнала питающего напряжения на пространственные и временные характеристики барьерного микроразряда в аргоне. В в рамках численных экспериментов работе предполагается рассмотреть следующие типы питающего напряжения: синусоидальный и прямоугольный, треугольный и пилообразный. В рамках экспериментальных исследований предполагается собрать источник питания для барьерного разряда с варьируемой синусоидальной и прямоугольной формами сигнала напряжения.

Для определения пространственно-временных характеристик барьерного разряда использовалась расширенная гидродинамическая модель, описывающая параметры газоразрядной плазмы. Подробное описание модели представлено в работе [7].

Численные расчеты проводились для приложенных амплитуд напряжения V_0 от 1.2 до 6 кВ с частотой f от 10 до 100 кГц. Давление аргона предполагалось равным 1 атм, а температура газа 300 К. На рис. 1. представлены временные зависимости напряжения V на электродах, падений потенциала V_g на разрядном промежутке и плотность полного тока J в барьерном разряде («расчетные осциллограммы») для различных напряжений, подаваемых на электроды.

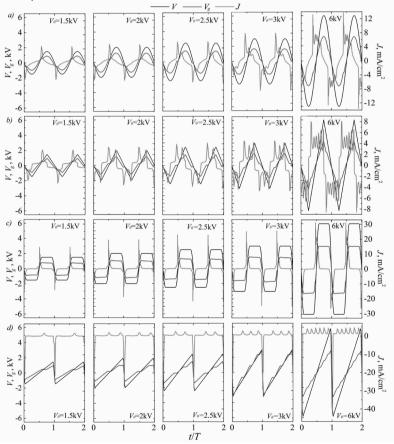


Рисунок 1. Расчетные осциллограммы напряжения V, приложенного к электродам, падения напряжения Vg на разрядном промежутке и плотности тока J в микроразряде диэлектрического барьера для различных амплитуд (1,5 кВ, 2 кВ, 2,5 кВ, 3 кВ, 6 кВ) а) синусоидальной, б) треугольной в) прямоугольной и г) пилообразной формы напряжения питания.

Наблюдается принципиальная зависимость пространственных и временных характеристик барьерного микроразряда атмосферного давления в аргоне от формы прикладываемого напряжения. В частности, видно, что в случае прикладывания к электродам питающего напряжения прямоугольной формы наблюдаются всегда два импульса тока на полупериод независимо от величины напряжения. амплитуды питающего При этом синусоидального и треугольного сигналов напряжения количество импульсов тока при увеличении амплитуды питающего напряжения **у**величивается. Исходя из этого. пространственно-временные параметры плазмы барьерных разрядов для различной формы сигналов при равных прочих условиях будут существенно отличаться. При пилообразном сигнале напряжения на быстром нарастания напряжения наблюдаются фронте прямоугольного сигнала, а на медленном – треугольного и синусоидального.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан компактный источник питания (рис.2) для генерации килогерцовых сигналов напряжения в диапазоне частот от 10 до 70 кГц и варьируемым напряжением от 1кВ до 3 кВ с возможностью генерации синусоидального и прямоугольного сигналов на основе импульсного трансформатора. Были проведены тестовые экспериментальные исследования ПО генерации барьерных разрядов в потоке аргона (рис. 3). Наблюдалось визуальное отличие барьерного разряда: при синусоидальном сигнале наблюдались множественные филаменты, а при импульсном сигнале разряд был более диффузным. Эти факты свидетельствуют о том, что при синусоидальном сигнале формируются множественные импульсы плотности тока, а при прямоугольном – один.



Рисунок 2. Внешний вид источника питания;

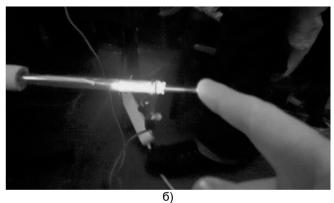


Рисунок 3. Плазменная «холодная» струя в аргоне, генерируемая с помощью собранного источника питания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90101.

- [1] Kogelschatz U., Eliasson B., and Egli W. From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges // Pure Appl. Chem. 71, 1819-1828, (1999).
- [2] Zhang Z., Qiu Y., and Lou Y., Surface modification of polytetrafluoroethylene film using the atmospheric pressure glow discharge in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 36, 2980 (2003).

- [3] Deng X. T. and Shi J. J., Effects of microbial loading and sporulation temperature on atmospheric plasma inactivation of Bacillus subtilis spores // Appl. Phys. Lett. 87, 153901 (2005).
- [4] Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A. Applied plasma medicine // Plasma Process. Polym. 5, 503 (2008)
- [5]. Akishev Yu. S., Dem'yanov A. V., Karal'nik V. B., Pan'kin M. V., and Trushkin N. I. Pulsed Regime of the Diffusive Mode of a Barrier Discharge in Helium // Plasma Physics Reports, Vol. 27, No. 2, pp. 164–171, (2001)
- [6]. Benard N. and Moreau E. Role of the electric waveform supplying a dielectric barrier discharge plasma actuator // Applied Physics Letters 100, 193503 (2012).
- [7] Saifutdinov A. İ., Saifutdinova A. A., and Timerkaev B. A. Plasma Physics Reports, 4, 351–360, (2018)

^{*} sabinazaz@mail.ru

^{**} aliva 2007@list.ru

^{***} as.uav@bk.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ФРАКЦИЙ ДИСПЕРСНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННОЙ МНОГОФРАКЦИОННОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ В ПЛОСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Тукмаков Д.А.^{1*}

¹ИММ КазНЦ РАН, Казань, РФ

Одним из развивающихся разделов современной механики жидкости и газа является динамика неоднородных сред [1-12]. В данной статье исследуются нестационарные течения неоднородных сред- газовых взвесей твердых частиц. Теоретическим основам математических моделей динамики неоднородных сред посвящены работы [1-4]. В некоторых практических приложениях требуется исследование течений запылённых сред в электрическом поле [6-12]. В связи с нелинейностью некоторых математических моделей возникает необходимость В применении вычислительной математики [13-16]. В математической модели, применяемой в текущем исследовании, учитывается воздействие дисперсной компоненты смеси нескольких сил аэродинамической природы, а также силы Кулона.

В данной работе дисперсная среда описывается как многофракционная смесь, состоящая из частиц различных размеров с различными свойствами материалов, из которых состоят частицы. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье-Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена:

$$\begin{split} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho_1 \, u_1\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho_1 \, v_1\right)}{\partial y} &= 0 \;, \\ \frac{\partial \left(\rho_1 \, u_1\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_1 \, u_1^2 + p - \tau_{xx}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_1 \, u_1 v_1 - \tau_{xy}\right) &= -\sum_{i=2}^n \; F_{xi} + \sum_{i=2}^n \; \alpha_i \, \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial \left(\rho_1 \, v_1\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_1 \, u_1 \, v_1 - \tau_{xy}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(p + \rho_1 \, v_1^2 - \tau_{yy}\right) &= -\sum_{i=2}^n \; F_y + \sum_{i=2}^n \; \alpha_i \, \frac{\partial p}{\partial y}, \\ (1) \\ \frac{\partial \left(e_1\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left[e_1 + p - \tau_{xx}\right] u_1 - \tau_{xy} \, v_1 + \lambda \frac{\partial \tau_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left[e_1 + p - \tau_{yy}\right] v_1 - \tau_{xy} \, u_1 + \lambda \frac{\partial \tau_1}{\partial y}\right) &= 0. \end{split}$$

$$\begin{split} &=\sum_{i=2}^{n} Q_{i} - \left|F_{xi}\right| \left(u_{1} - u_{i}\right) - \left|F_{y}\right| \left(v_{1} - v_{i}\right) + \sum_{i=2}^{n} \alpha_{i} \left(\frac{\partial \left(\rho u\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho v\right)}{\partial y}\right), \\ &\tau_{xx} = \mu \left(2\frac{\partial u_{1}}{\partial x} - \frac{2}{3}D\right), \ \tau_{yy} = \mu \left(2\frac{\partial v_{1}}{\partial y} - \frac{2}{3}D\right), \ \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_{1}}{\partial y} + \frac{\partial v_{1}}{\partial x}\right), \\ &D = \frac{\partial u_{1}}{\partial x} + \frac{\partial v_{1}}{\partial y}. \end{split}$$

Динамика каждой фракции дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения энергии, записанными с учетом теплообмена, обмена импульсом с несущей фазой и с учетом силы Кулона, действующей на частицы фракции дисперсной фазы:

$$\begin{split} \frac{\partial \rho_{i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{i} u_{i})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_{i} v_{i})}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial (\rho_{i} u_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i} u_{i}^{2}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{i} u_{i}v_{i}) &= F_{xi} - \alpha_{i} \frac{\partial p}{\partial x}, \end{split} \tag{2} \\ \frac{\partial (\rho_{i} v_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i} u_{i}v_{i}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{i} v_{i}^{2}) &= F_{yi} - \alpha_{i} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial (\rho_{i} v_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{i} u_{i}v_{i}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_{i} v_{i}^{2}) &= -Q_{i}, \\ \rho_{i} &= \alpha_{i} \rho_{i0}, \quad e_{i} &= \rho_{i} C_{vi} T_{i}, \\ \frac{\partial^{2} \varphi}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} \varphi}{\partial y^{2}} &= \rho q &= q \sum_{i=2}^{n} \rho_{i} \\ F_{xi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_{i}}{(2r_{i})} C_{di} \rho_{1} \sqrt{(u_{1} - u_{i})^{2} + (v_{1} - v_{i})^{2}} (u_{1} - u_{i}) + \alpha_{i} \rho_{1} \left(\frac{\partial u_{1}}{\partial t} + u_{1} \frac{\partial u_{1}}{\partial x} + v_{1} \frac{\partial u_{1}}{\partial y}\right) + \\ + u_{1} \frac{\partial u_{1}}{\partial y} + 0.5 \alpha_{i} \rho_{1} \left(\frac{\partial u_{1}}{\partial t} + u_{1} \frac{\partial u_{1}}{\partial x} + u_{1} \frac{\partial u_{1}}{\partial y} - \frac{\partial u_{i}}{\partial t} - u_{i} \frac{\partial u_{i}}{\partial x} - u_{i} \frac{\partial u_{i}}{\partial y}\right) - q_{0} \rho_{i} \partial \varphi / \partial x, \\ F_{yi} &= \frac{3}{4} \frac{\alpha_{i}}{(2r_{i})} C_{d} \rho_{1} \sqrt{(u_{1} - u_{i})^{2} + (v_{1} - v_{i})^{2}} (v_{1} - v_{i}) + \alpha_{i} \rho_{1} \left(\frac{\partial v_{1}}{\partial t} + u_{1} \frac{\partial v_{1}}{\partial x} + v_{1} \frac{\partial v_{1}}{\partial x} + v_{1} \frac{\partial v_{1}}{\partial y} - \frac{\partial v_{i}}{\partial t} - v_{i} \frac{\partial v_{i}}{\partial x} - v_{i} \frac{\partial v_{i}}{\partial y}\right) - q_{0} \rho_{i} \partial \varphi / \partial y - \rho_{i} g, \end{split}$$

$$\begin{split} V_{i} &= \left[u_{i}, v_{i}\right], i = 1, 2; C_{di} = \frac{24}{Re_{1i}} + \frac{4}{Re_{1i}^{0.5}} + 0.4, \quad , \\ M_{1i} &= \left|\overline{V_{i}} - \overline{V_{i}}\right| / c \; , \; \; Re_{1i} = \rho_{1} \left|\overline{V_{i}} - \overline{V_{i}}\right| 2r / \mu, \; \; Pr = C_{p}\mu / \lambda \end{split}$$

Здесь p, ρ_1 , u_1 , v_1 —давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей x и y соответственно; T_1 , e_1 —температура и полная энергия газа; ρ_i , T_i , e_i , u_i , v_i — средняя плотность, температура, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости фракции дисперсной фазы в направлении осей x, y; φ -потенциал электрического поля создаваемого дисперсной компонентой смеси, q-удельный массовый заряд вещества дисперсной фазы. Температура несущей среды находится из уравнения $T_1 = (\gamma-1)(e_1/\rho_1 - 0.5(u_1^2 + v_1^2))/R$, где R- газовая постоянная несущей фазы. Внутренняя энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_i = \rho_i C_{\rho_i} T_i$, где C_{ρ_i} — удельная теплоемкость единицы массы вещества i-ой фракции дисперсной фазы.

В уравнение энергии для несущей фазы входит тепловой поток теплообмена между газом и фракцией дисперсной фазы $Q_i = 6\lambda\alpha_i Nu_i (T_1-T_i)/(2r)^2$. Относительное число Нуссельта- Nu_i определяется с помощью известной аппроксимации в зависимости от относительных чисел Маха, Рейнольдса и от числа Прандтля [2]:

$$Nu_i = 2 \exp(-M_{ii}) + 0.459 Re_{ii}^{0.55} Pr^{0.33}$$
.

Система уравнений дополнялась соответствующими начальными и граничными условиями. На твёрдых поверхностях задавались граничные условия Дирихле для составляющих скорости несущей и дисперсной фазы и граничные условия Неймана для остальных функций [2,11].

Уравнения математической модели динамики газовзвеси решались явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [14]. Для получения монотонного численного решения применялась схема нелинейной коррекции [15]. Уравнение Пуассона описывающее электрическое поле решалось методом установления [16].

- [1] Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука, 1978, 336 с.
- [2] Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003, 284 с.
- [3] Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесях частиц металлов. Новосибирск, 2015.
- [4] Тукмаков А.Л., Тонконог В.Г. Численное моделирование вскипающих потоков в каналах переменного сечения // Казань :

- Печать-Сервис-XXI век, 2012. 114 с.
- [5] Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударноволновой раздет газовзвесей //Доклады академии наук, 2016, том 466, № 4, с. 418–421.
- [6] Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. Численное моделирование разреженной пылевой плазмы в нормальном тлеющем разряде// Теплофизика высоких температур, 2012, том 50, № 5, с. 611–619.
- [7] Арутюнян Р.В. Математическое моделирование тепло- и электропереноса при воздействии сильноточного импульса на электрод //Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16. № 2. С. 138-144.
- [8]Даутов Г.Ю., Сабитов Ш.Р., Файрушин И.И. Исследование распределений потенциала и концентрации электронов в пылевой плазме //Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 4. С. 29-32.
- [9] Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Динамика заряженной газовзвеси с начальным пространственно неравномерным распределением средней плотности дисперсной фазы при переходе к равновесному состоянию // Теплофизика высоких температур, том: 55, № 4, 2017, С. 509-512.
- [10] Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Генерация акустического возмущения движущейся заряженной газовзвесью// Инженернофизический журнал, 2018, №5, С.1-7.
- [11] Тукмаков А.Л., Кашапов Н.Ф., Тукмаков Д.А., Фазлыйяхматов М.Г. Процесс осаждения заряженной полидисперсной газовзвеси на поверхность пластины в электрическом поле //Теплофизика высоких температур, 2018, том 56, выпуск 4, с.498–502.
- [12] Тукмаков Д. А. Численное моделирование колебаний электрически заряженной гетерогенной среды, обусловленных межкомпонентным взаимодействием //Изв. вузов. ПНД. 2019. Т. 27, вып. 3. С. 73-85.
- [13] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы –М.:Наука, 1989, 432 с.
- [14] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей В 2-х томах, Т.2, Москва: Мир, 1991, 552 с.
- [15] Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование, 1993, т.5, №3, с.74-83.
- [16] Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы, Т.2, М.: «Наука», 1977, 401 с.

^{*} tukmakovDA@imm.knc.ru

СРАВНЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

Саттаров А.Г.^{1*}, Сочнев А.В.^{1**}, Зиганшин Б.Р.^{1***}

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

На сегодняшний день теория точечного взрыва [1] широко применяется для описания ударных волн, возникающих вследствие пробоя среды (в частности воздуха). Подобие процесса взрыва и оптического взрыва было замечено еще Ю.П. Райзером, несмотря на существенные различия в энергиях [2]. Существует ряд работ, в которых приводится фиксация ударных волн, их сравнение с теоретическими данными и объяснение процесса [3-5] (рис. 1).

Для решения ряда практических задач требуется оценить параметры ударной волны на поверхности материала. Одним из подходов для такой задачи является численное моделирование — это позволит визуализировать потоки газа и оценить давление и скорость газа в течении времени.

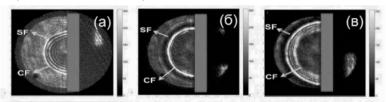


Рисунок 1. Ударная волна при воздействии лазера на поверхность [6]: a) 2,4 нс; б) 5,6 нс; в) 8,8 нс;

Для осуществления численного расчета требуется задать входные параметры. В таком случае необходимо применить теорию точечного взрыва для оценки параметров газа после взрыва. Из нее можно найти избыточное давление p_2 , скорость газа V_2 , скорость распространения ударной волны D и радиус ударной волны r_2 . В ходе анализа было определено, что разряд является сферическим взрывом, т.е. ν =3. Важно сказать, что эти параметры задаются в некий момент времени после разряда, т.е. спустя некоторое время после того, как случился разряд.

При моделировании энергия ударной волны задавалась как 10% от исходной энергии импульса. При энергии импульса лазера $E_{\text{имп}}$ =0,33 Дж энергия ударной волны E_0 =0,033 Дж, а параметр E =0,028

Дж. При таких характеристиках в момент времени 0,44 мкс радиус ударной волны r_2 .=0,001285 м, что соответствует безразмерному характеристическому размеру l=0,1867 [1]. Безразмерный характеристический радиус $l=\frac{r_2}{r_0}$, где $r_0=\left(\frac{E_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{\nu}}$. При l=0,1867 решение перестает быть автомодельным. С этого момента предлагается осуществлять моделирование (рис. 2).



Рисунок 2. Модель ударной волны

Для задания характеристик также требуется задать их распределение. Если распределение скорости, согласно теории точечного взрыва, почти линейное, то распределение давления описывается сложной степенной зависимостью.

Целью исследования ставится определение зависимости движения ударной волны от типа распределения давления.

Для нахождения вида графика требуется использовать уравнение (1), откуда можно построить график распределения давления на расстоянии радиуса ударной волны. Как видно из графика, существует т.н. «плато давлений», где давление составляет около 35% от давления на фронте ударной волны (рис. 3).

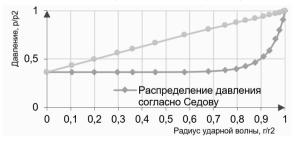


Рисунок 3. График распределение давления от центра пробоя до фронта волны при задании начальных условий

При помощи аппроксимации было определено, что уравнение, описывающее начальное распределение давления при радиусе r_2 =0.01285 м, равно

$$p_2 = 1,23*10^{32}*r^8 - 5,72*10^{29}*r^7 + 1,09*10^{27}*r^6 - 1,09*10^{24}*r^5 + 6,13*10^{20}*r^4 - 1,90*10^{17}*r^3 + 2,95*10^{13}*r^2 - 1,71*10^9*r + 781729,2, \tag{1}$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, а x и y – это координаты точки.

Для численного моделирования использовалось программное обеспечение Ansys Fluent 17.2. Длина поля 0,02 м, высота 0,015 м, плотности (density-based решатель основе нестационарное время (transient time), 2D постановка задачи, ортогональность сетки 1. Выходное условие Pressure-outlet с проницаемыми стенками и давлением 101325 Па на бесконечности. Для расчета применялась невязкая модель жидкости, воздух выбран в качестве идеального газа. Давление окружающей среды 101325 Па, температура 293 К.В одном случае давление задавалось по линейному распределению, в другом давление задавалось согласно распределению Л.И.Седова. Исходный радиус ударной волны равняется 0,001285 м, давление на ударной волне 2137958 Па. Ниже представлены результаты моделирования

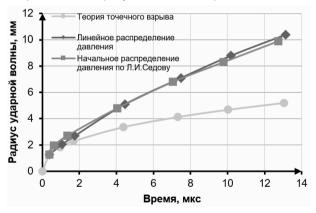


Рисунок 4. Зависимость координаты ударной волны от времени в зависимости от вида начального распределения давления

Как видно из графиков, при распределении начального давления, согласно Седову, давление ударной волны оказывается более точным чем линейное распределение. Распределения Седова меняется от случая к случаю, что делает подбор начальных условий более трудоёмким, и при возможности следует использовать его.

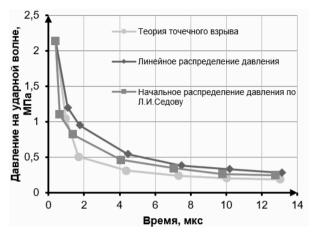


Рисунок 5. График зависимости давления за фронтом ударной волны от времени

- [1] Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике. восьмое, переработанное изд. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [2] Райзер, Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
- [3] Porneala C., Willis D.A. Time-resolved dynamics of nanosecond laser-induced phase explosion // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. №15. C. 1-7.
- [4] Wang Y., Yuan H., Fu Y., Wang Z. Experimental and computational investi-gation of confined laser-induced breakdown spectroscopy // Spectroschimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2016. p. 44-52.
- [5] Brieschenk S., Hruschka R., O'Byrne S., Kleine H. High-speed timeresolved visualisation of laser-induced plasma explosions // Harald Kleine, 28th Interna-tional Congress on High-Speed Imaging and Photonics. Canberra: 2009.
- [6] Chelikani, L. Dynamic response of laser ablative shock waves from coat-ed and uncoated amorphous boron nanoparticles / L. Chelikani, V. Pinnoju, P. Ver-ma et al. // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1793, № 120024. doi: 10.1063/1.4971706.

^{*} agsattarov@kai.ru

^{**} avsochnev@kai.ru

^{***} brziganshin@gmail.com

МОДЕЛЬ И ДИФРАКЦИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОЦК РЕШЕТКАХ НАНОПРОВОЛОК И ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА НАНОТРУБКАХ

Халитов 3.Я. 1* , Файзуллин Р.Р. 2** , Одинцов В.Л. 1*** , Кокшевская В.А. 2

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ., Казань, Россия

В последние десятилетия как в зарубежных, так и в отечественных научных центрах ведутся успешные разработки элементов наноэлектроники на основе углеродных нанотрубок и нанопроволок [1-7]. Однако более значительного расширения поля исследований можно достигнуть путем синтеза различных цилиндрических структур на внутренних и внешних поверхностях металлических, полупроводящих и диэлектрических нанотрубок.

Цилиндрическая ахиральная 3D-структура, аналогичная обычному ОЦК кристаллу, может образоваться при осаждении атомов на внешней поверхности нанотрубки; в случае внутренней поверхности структура будет подобной. При этом сначала на цилиндре располагается первый слой шаров, образующих на его поверхности квадратную двумерную сетку с *п*_В узлами вдоль окружности. Затем в углублениях первого слоя размещаются шары второго слоя и так далее (рис.1а, атомы, принадлежащие соседним слоям, показаны разными цветами).

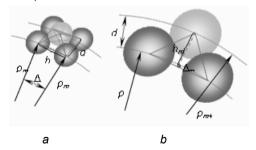


Рисунок 1. Радиальная ОЦК-структура: *a*) 3D-изображение, *b*) продольная проекция.

Простое рассмотрение задачи в соответствии с обозначениями на рис. 1 дает цилиндрические координаты атомов:

$$\begin{cases} \rho_{_{m+1}} = \rho_{_{m}} \left[1 - \left(\frac{2\pi}{n_{_{B}}} \right)^{^{2}} \right] + \frac{\pi}{n_{_{B}}} \sqrt{3(\rho_{_{0}})^{^{2}} - (\rho_{_{m}})^{^{2}}} \\ \rho_{_{mv}} = \left[\nu + 1 - (-1)^{^{m}} \right] \frac{2\pi}{n_{_{B}}} & \text{, где } \rho_{_{0}} = \frac{n_{_{B}} d_{_{a}}}{2\pi} \, , \\ z_{_{mn}} = na + \left[1 - (-1)^{^{m}} \right] \frac{a}{4} \end{cases}$$

 d_a – диаметр шара (атома). Следует обратить внимание, что радиусов формула ДЛЯ слоев является рекуррентным соотношением. Очевидно, что круговой «параметр идентичности» b будет расти вместе с номером слоя m, что приведет к «проваливанию» шаров (m + 1)-го слоя в структуру m-го. Вследствие этого здесь, в отличие от слоистых нанотрубок, толщина слоя d также зависит от номера слоя: в публикации [8] это явление было радиальной релаксацией структуры. названо соприкосновения шаров (m + 1)-го слоя с шарами (m - 1)-го слоя рост блока заканчивается и далее начинается рост нового блока с удвоенным параметром *пв.* Рассмотрим дифракцию на структуре, меньшей одного блока.

Пусть $\{R, \ \phi^*, \ z^*\}$ — цилиндрическая система координат в обратном пространстве, совпадающая с кристаллографической системой $\{\rho, \ \phi, \ z\}$ по направлениям. Тогда амплитуда в случае решетки будет иметь вид:

$$A(R, \varphi^*, z^*) = \left[\sum_{n} \exp(2\pi i a z^* n)\right] \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{n_B-1} \exp\{2\pi i [R\rho_m \cos(\varphi_{m\nu} - \varphi^*) + \Delta z_m z^*]\},$$

где M — число слоев структуры. После разложения по цилиндрическим волнам определение максимумов решеточных сумм по n и v дает:

$$z^* = \frac{h}{a}$$
, $q = kn_B$, $h = 0, \pm 1, \pm 2, ...$, $k = 1; 2; 3; ...$

где q — номер члена ряда по цилиндрическим волнам. Подставляя, нетрудно получить, что интенсивность четких (k = 0) рефлексов на четных слоевых плоскостях (h — четный) и нечетных будет иметь вид:

$$I_{h0}(R) = n_B^2 \left[\sum_m J_0(2\pi R \rho_m) \right]^2$$
,

$$I_{h_0}(R) = n_B^2 \left[\sum_m (-1)^m J_0(2\pi R \rho_m) \right]^2,$$

соответственно. Интенсивность диффузных ($k \neq 0$) рефлексов при четной сумме индексов h + k:

$$I_{hk}(R, \varphi^*) = 4n_B^2 \cos^2(kn_B \varphi^*) \left[\sum_{m=0}^{M-1} J_{kn_B}(2\pi R \rho_m) \right]^2$$
,

а при нечетной -

$$I_{hk}(R,\varphi^*) = 4n_B^2 \cos^2(kn_B \varphi^*) \left[\sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m J_{kn_B}(2\pi R \rho_m) \right]^2.$$

Примеры расчета профилей интенсивности четких рефлексов вдоль слоевой линии и диффузных — в слоевой плоскости представлены на рис. 2 и 3. Четкие рефлексы образуют приблизительно целочисленную серию h0l, причем рефлексы с четным l расположены на слоевых плоскостях с четным h, а рефлексы с нечетным l - на слоевых плоскостях с нечетным h. Это соответствует правилу погасания для ОЦК структуры: имеют место только рефлексы с четной суммой индексов.

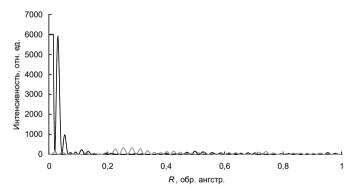
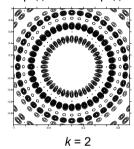


Рисунок 2. Четкие рефлексы от ОЦК структуры с d_a = 3 при n_B = 30 (h – четное – черная, нечетное – красная, I_{h00}^{max} = 57600).

Столь существенную разницу в интенсивностях четких рефлексов можно объяснить тем, что в данной структуре из всей совокупности семейств рассеивающих плоскостей h0l только поверхности семейства h00 образуют эквидистантную последовательность плоскостей, в остальных семействах межплоскостные расстояния не постоянны, что подавляет дифракционные явления. При этом

недостаточная подавленность рефлекса h00 на нечетных слоевых плоскостях может объясняться тем, что, строго говоря, структура, в силу кривизны, является «не совсем центрированной», то есть «не совсем ОЦК». Однако на порядок меньшая радиальная ширина рефлекса h00 на нечетных слоевых плоскостях вызывает сомнение в такой интерпретации и позволяет вновь, как и в слоистых решетках, предположить действие эффекта псевдоортогональности.

Распределение интенсивности диффузных рефлексов на слоевых плоскостях имеет радиальный характер; кратность оси симметрии распределения определяется из аргумента косинуса и равна $2kn_B$.



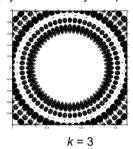


Рисунок 3. Распределения интенсивности диффузных рефлексов 0*kl* в плоскости $\{R, \phi^*\}$ от блоков с $n_B = 10$.

- 1. П.Н. Дьячков. Электронные свойства и применение нанотрубок. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 488 с.
- 2. J. Zhang, L. Zhang, X. Peng, and X. Wang, *J. Mater. Chem.*, 12 (2002) 802.
- S. Lyu, Y. Zhang, H. Ruh, H. Lee, and C. Lee, Chem. Phys. Lett., 367 (2003) 717.
- 4. H. J. Yuan, S. S. Xie, D. F. Liu, Q. Yan, Z. P. Zhou, L. J. Ci, J. X. Wang, Y. Gao, L. Song, L. F. Liu, W. Y. Zhou, and G. Wang, *Chem. Phys. Lett.*, 371 (2003) 337.
- 5. Y. Jiang, X. Meng, W. Yiu, J. Liu, J. Ding, C. Lee, and S. T. Lee, *J. Phys. Chem. B*, 108 (2004) 2784.
- 6. D. Xu, Y. J. Xu, D. P. Chen, G. L. Guo, L. L. Gui, and Y. Q. Tang, *Chem. Phys. Lett.*, 325 (2000) 340.
- 7. H. Choi and S. Park, J. Am. Chem. Soc., 126 (2004) 6248.
- 8. Д.Н. Валеева, И.К. Насыров, З.Я. Халитов. Дифракция на двумерной идеальной радиальной цилиндрической решетке. Вестник КГТУ, №1, 2009, с. 67-69.

^{*} zufar.khalitov@mail.ru

^{**} rrfayzullin@kai.ru

^{***} odintsovkai1997@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ГАЗА НА ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Шамсутдинов Р.С.^{1**}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Аннотация. Проведены эксперименты ПО изучению сверхзвукового потока газа на поперечный тлеющий разряд в случае, когда сверхзвуковое истечение газа попадает в область фарадеева темного пространства, т.е. положительный столб заканчивается, не доходя до сверхзвуковой струи. А также в случае. сверхзвуковое истечение газа попадает область стопба. Установлено. положительного что организация сверхзвукового потока изменяет картину свечения тлеющего разряда, создавая пространственную неоднородность межэлектродном пространстве.

Ключевые слова: тлеющий разряд, сверхзвуковой поток газа, сопло, конфузор.

Введение

Сверхзвуковая прокачка газа может существенно изменить как газодинамические параметры, так электрические характеристики, такие как концентрации заряженных частиц. напряженность электрического поля, в межэлектродном промежутке тлеющего разряда [1-5]. В работах [1-3] авторами был изучен вопрос влияния электрических характеристик разряда газодинамических параметров потока в сверхзвуковых соплах с центральным телом. В них было показано, что сверхзвуковая прокачка газа позволяет существенно повысить устойчивость разряда и увеличить энерговклады в разряд. В работах [4-5] было показано, как с помощью сверхзвуковой прокачки газа можно управлять распределением внутренних характеристик тлеющего разряда. Однако диапазон давлений. при которых наиболее отчетливо проявляется эффект сверхзвуковой прокачки газа в параметрах тлеющего разряда, оказался не таким широким. В основном, этот эффект зависит от разрядных объемов, месте дислокации ядра сверхзвукового потока, величины тока и, конечно, самого давления. Поэтому в данной работе продолжены исследования процессов. происходящих при взаимодействии тлеющего разряда с поперечным потоком газа, проходящим со сверхзвуковой скоростью через ядро разряда.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для изучения тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке состояла из систем вакуумирования, газоснабжения, электрического питания, измерительных приборов, а также вакуумной колбы, внутри которой осесимметрично были размещены сверхзвуковое сопло, конфузор, система электродов (Рисунок 1.). Электроды располагаются вдоль прямой. перпендикулярной оси симметрии сопла и конфузора, на расстоянии 12-35 мм друг от друга. Давление измерялось на трех участках: на входе в сопло, в пространстве под куполом, восстановленное давление после конфузора. Расход газа определялось с помощью ротаметра типа РС-5. Источником питания служил источник постоянного тока, позволяющий плавно регулировать напряжение в пределах от 0 до 5 кВ. Источник имеет встроенное балластное сопротивление, устройство поджига, а также амперметр и вольтметр. Система вакуумирования представляла собой вакуумный насос, ресивер и вакуумную колбу.

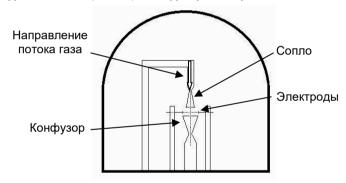


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Сопло и конфузор изготовлены из фторопласта. Конфузор служит для организации скачков уплотнения и восстановления давления. Сопло представляет собой особый газовый канал для изменения скорости газа, состоящий из конфузорной и диффузорной частей. размеры сверхзвукового сопла Геометрические следующие: диаметр сопла в критическом сечении d1 = 0,5 мм, на выходе и D1 = 5 мм, площадь критического сечения S1 = π·d12/4 = 0,196 мм2. площадь выходного сечения сопла S2 = $\pi \cdot D12/4$ = 19,625 мм2. Длина закритической части сопла составляет I1 мм. Геометрические размеры конфузора: диаметр в критическом сечении d2 = 4 мм и на входе D2 = 10 мм соответственно. Площадь критического сечения $S3 = \pi(d2-d3)2/4 = 0.785$ мм2, площадь входного сечения сопла S4 =πD22/4 = 78,5 мм2. Длина докритической части конфузора составляет 20 мм.

Эксперимент

Первоначально, под колбой и в ресивере создавали давление на уровне 5 Торр. Далее осуществляли тлеющий разряд и с помощью ротаметра организовали подачу сверхзвукового потока воздуха в область разряда. Давление в области разряда поднимали до 17 Торр. На Рис. 2, Рис. 3 приведены фотографические снимки разряда для разных токов и расходов газа.

Обсуждение результатов экспериментов

На рисунке 2 давление газа и ток разряда соответствуют случаю, когда сверхзвуковое истечение газа попадает в область фарадеева темного пространства, т.е. положительный столб заканчивается, не ДО сверхзвуковой струи. На фотографии сверхзвуковой струи абсолютно не светится и виден как черный столб диаметром в 5 мм. Края этого столба светятся, четко выделяя его границы. Причем свечение вблизи сверхзвуковой струи имеет красноватый цвет, в то время как положительный столб светится белым цветом. Этот факт объясняется тем, что сверхзвуковая струя работает как инжекционный насос, уводя частицы газа вблизи границы потока. Тем самым, вблизи сверхзвуковой струи создается тонкая область разрежения газа. Несмотря на небольшие значения напряженности электрического поля в области фарадеева темного пространства, большее разрежение газа обеспечивает достаточную для возбуждения атомов кислорода приведенную напряженность электрического поля Е/N. Такое условие выполняется с обеих сторон сверхзвуковой струи.



Рисунок 2. Картинка свечения разряда. Сверхзвуковой поток газа находится в фарадеево темном пространстве



Рисунок 3. Картинка свечения разряда. Сверхзвуковой поток газа находится в положительном столбе

На рисунке 3 давление газа и сила тока соответствуют случаю, когда сверхзвуковое истечение газа попадает в область положительного столба. В этом случае положительный столб разрывается. Так же, как и предыдущем случае, положительный столб не светится. Но свечение наблюдается с обеих сторон сверхзвуковой струи.

Выводы

Таким образом, организация сверхзвукового потока позволяет повлиять на картину свечения тлеющего разряда, создавая пространственную неоднородность в межэлектродном пространстве. Это, в свою очередь, дает возможность искусственно создавать не только разные яркости излучения разных участков положительного столба, но и подобрать разные цвета излучения.

- [1] I.G. Galeev, V.E. Goncharov, B.A. Timerkaev, V.G. Toropov, A.K. Faskhutdinov // High temperature. Volume 28 Issue Page 623-626 Published 1990.
- [2] I.G. Galeev, V.E. Goncharov, B.A. Timerkaev, V.G. Toropov, I.K. Fakhrutdinov // High temperature. 1992. Volume 30 Issue 3 Page 342.
- [3] B.A. Timerkaev, R.S. Shamsutdinov, D.I. Israfilov, B.R. Shakirov, Glow discharge in a longitudinal supersonic flow. (2019) Applied Physics, (6), pp. 34-41
- [4] B.A. Timerkaev, B.R. Zalyaliev. Glow Discharge in a Transverse Supersonic Gas Flow at Low Pressures. High Temperature, 2014, Vol. 52, No. 4, pp. 471–474.
- [5] A.I. Sairutdinov, B.R. Zalyaliev, B.A. Timerkaev. Control of the Glow Discharge Parameters at Low Pressures by Means of a Transverse Supersonic Gas Flow. High Temperature, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 632–638. Original Russian Text © A.I2016, published in Teplofizika Vysokikh Temperatur, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 669–675.

^{*} btimerkaev@gmail.com

^{**} shamsutdinovrustam@yandex.ru

СИНТЕЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ В УТОПЛЕННОМ В МАЗУТ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Фельцингер В.С.^{1**}, Ахметвалеева А.Р.^{1***}, Зайнутдинова Д.А.^{1****}, Залялиева А.А.^{1*****}, Даутов Г.Ю.^{1******}, Абрамова¹

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

В данной работе предложена экспериментальная установка и описан метод синтеза карбида кремния в утопленной в толщу углеводородного сырья электрической дуге. В составе отложений на катоде обнаружены карбид кремния и углеродные нанотрубки. Полученный образец проанализирован на оптическом микроскопе. А также подтверждена твердость карбида кремния.

Карбид кремния SiC является стабильным соединением, по твердости уступающая лишь алмазу. Именно это свойство делает карбид кремния незаменимым абразивным материалом. В то же время возможные области применения карбида кремния гораздо шире. Стоит упомянуть, что карбид кремния обладает прекрасными полупроводниковыми свойствами, благодаря которым он имеет широкие возможности применения в силовой электронике, в качестве светоизлучающих диодов и другие. Для каждой области применения карбида кремния должна быть найдена своя технология его синтеза. Например, для применения в наноэлектронике совершенно не подходят экстремальные методы синтеза, при происходит которых неконтролируемое структуроформообразование кристаллов и практически невозможно управлять процессом синтеза.

Сегодня известны множество технологий синтеза карбида кремния. Стоит упомянуть, например, метод Ачесона, основанный на явлении синтезируемого материала испарения путем пропускания электрического тока (сотни тысяч Ампер) по сопротивлению, погруженному в смесь составных элементов и последущей их конденсации. Такой способ синтеза карбида кремния достаточно прост, малозатратен, не требует создания особо высоких значений температуры, использует распространенные компоненты и позволяет получать тонны конечного продукта. Однако неравномерность прогрева печи не позволяют предсказать результат синтеза.

CVD является одним из наиболее подходящих методов, используемых для производства карбида кремния в различных формах тонкопленочных порошков, волокон и наностержней в системе Si-C-HCI. Также возможен CVD-процесс под давлением

аргоновой атмосферы с использованием в качестве прекурсоров CH_3SiCl_3 и H_2 без металлических катализаторов. Таким путем, был получены нанопроволоки карбида кремния кубической сингонии достаточно высокой чистоты и однородного диаметра порядка 70 нм.

Известен также плазмохимический метод синтеза, который позволяет получить высокодисперсные порошки карбидов. Характеристики получаемых порошков зависят от используемого сырья, технологии синтеза и типа реактора. Частицы таких всего представляют чаше собой монокристаллы размерами от 10 до 100-200 нм и более. Основные условия получения наночастиц этим методом — протекание реакции вдали от равновесия и высокая скорость образования зародышей твердой фазы при малой скорости их роста.

Поиск новых путей управляемого синтеза карбида кремния надежными способами актуален простыми И как исследователей, так и производственников. В данной работе предложена методика синтеза карбида кремния с помощью утопленного дугового разряда. Экспериментальная установка включает в себя керамический сосуд с углеводородным сырьем, в которое опускается система электродов катод-анод, сильноточный источник электрического питания, измерительные приборы. Анод представляет собой графит цилиндрической формы, диаметром 12 мм, а катод - железный стержень диаметром 8 мм. В графитовом стержне просверлены несколько небольших отверстий, в которые вмонтированы кремниевые осколки.

Зажигание дуги между погруженными в углеводородное сырьё электродами онжом осуществить либо путем подачи высоковольтного импульса, либо путем непосредственного кратковременного замыкания электродов друг с другом. И в том. и в другом случае зажигается дуговой разряд в ограниченном объеме, стенками которого является поверхностно кипящее сырьё. Сложные молекулы поставляются в область разряда с поверхности кипящей полости, которая ограничивает плазменную область дугового Под воздействием электрической разряда. ДУГИ происходит разложение сложных молекул углеводородов на простые фракции. Давление в плазменной области несколько отличается атмосферного давления, ввиду высокой вязкости мазута. Как раз это давление позволяет поддержать внутри углеводородного сырья плазменную область. Эффективность такого разряда разложения углеводородов и синтеза углеродных наноструктур было доказана в работах [1-4].

При высокой температуре плазмы происходит разбиение сложных молекул углеводородов на более мелкие фракции, а также образование атомарного углерода. В то же время с поверхности анода происходит испарение атомов кремния и атомов углерода. В

плазме эти атомы заряжаются и следуют к электродам, где соединяются либо в нанотрубки, либо в карбид кремния. Наличие ионов приводит к большим скоростям взаимодействия. Наличие охлаждающей жидкости в виде мазута определяет место и скорость закалки. Это позволяет получать порошки с заданными составом, формой и размером частиц. При плазмохимическом синтезе обеспечиваются высокие скорости образования и конденсации соединения и достаточно высокая производительность.

Эксперимент продолжался в течение 120 секунд при токе 100A и напряжении 20В. В ходе эксперимента было выдержано постоянное расстояние между электродами. Дуговой разряд осуществлялся в толще углеводородного сырья. Выделившиеся при этом легкие углеводороды, содержащие в составе водород, метан и ацетилен, собирались в специальные емкости. За время эксперимента на катоде образовался нарост объемом порядка 1 см³. Этот нарост был проанализирован с помощью оптического микроскопа, снимки которых представлены на (Рис. 1-2).

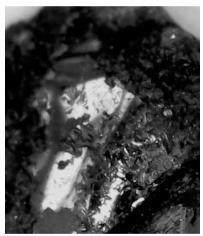


Рисунок 1. Микроскопический снимок отложений на катоде.

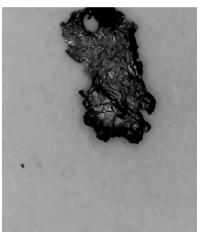


Рисунок 2. Микроскопический снимок отложений на катоде.

Как видно из снимков в отложениях на катоде содержится большое количество наночастиц карбида кремния. На отдельных участках отложений заметно наличие углеродных нанотрубок. В дальнейшем были проведены испытания полученных образцов на твердость. Например, если слегка надавливая на образец продвигать его по поверхности стекла, то на стекле остается глубокая трещина. На Рис.3 приведены следы от отдельных нано и микрочастиц карбида кремния, образованные в результате натирания этих частиц, расположенных между поверхностями двух стекол.

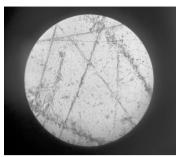


Рисунок 3. Микроскопический снимок следов нанодисперсных образований карбида кремния на стекле.

Заключение. Таким образом, использование утопленного в жидкое углеводородное сырьё электродугового разряда позволяет синтезировать карбид кремния требуемых размеров и в большом количестве. Если размеры образцов карбида кремния можно спрогнозировать длительностью действия разряда, то качества можно добиться регулировкой величины тока.

Результаты исследований электродугового разложения тяжелого углеводородного сырья с помощью утопленных электродов показали практическую целесообразность такого разряда для получения карбида кремния.

- [1] Г.Р. Ганиева, Б.А. Тимеркаев. Плазмохимическое разложение тяжелых углеводородов. Нефтехимия, 2016. Т. 56. №6. С. 651-654 [2] Г. Р. Ганиева, Д. И. Зиганшин, М. М. Аухадеев, Б. А. Тимеркаев. Электрические микроразряды в жидкостях и перспективы их применения в плазмохимии. Инженерно-физический журнал. Т.87. №3. Май-июнь. С.677 -681. 2014
- [3] A.O. Sofronitskiy, A.A. Andreeva, B.A. Timerkaev. Carbon nanotubes formation in the decomposition of heavy hydrocarbons creeping along the surface of the glow discharge. Journal of Physics: Conference Series 669 (2016) 012062, 1-4.
- [4] Timerkaev B.A., GR Ganieva, AA Kaleeva, ZK Israfilov, AO Sofronitskii. Growing of Carbon Nanotubes from Hydrocarbons in an Arc Plasma. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 92(5), 1248-1252, 2019. DOI 0.1007/s10891-019-02040-3
- * btimerkaev@gmail.com
- ** vasiliyfe@mail.ru
- *** ah_alina.ru@mail.ru
- **** zajjnutdinova-dinara@mail.ru
- ***** adelinaza@mail.ru
- ***** dautowildar2014@yandex.ru

СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В КРЕМНИЕВО - АРГОНОВОЙ ДУГЕ

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Шайхаттаров Р.Р.^{1**}, Геворгян Р.К.^{1***}, Ибрагимов И.С.^{1****}, Ахметвалеева А.Р.^{1****}, Курбангалеев Р.¹

¹КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

Аннотация: В работе приведены результаты синтеза наноалмазов и углеродных нанотрубок в кремниево-аргоновой плазме. При давлении 500 Тор в плазменном реакторе с поверхности графитового анода электрической дуги происходило испарение атомов углерода. Особенность графитового анода заключалось в том, что на поверхность анода были с вкраплены небольшие кусочки кремния. В результате эксперимента на поверхности графитового же катода сформировались наноалмазы и углеродные нанотрубки. Линейные размеры наноалмазов колеблются от 10ти до 50 нм. Диаметры углеродных нанотрубок колеблются от 4 нм до 20 нм, а их длина - от 100 до 2 мкм.

Известно, что германий является катализатором для ускорения реакций образования алмазов из графита [1,2]. В работе [1] алмазы синтезированы микроскопических размеров были каталитическом участии германия CVD методом. Эксперимент продолжался более 60 часов. В работе [2] синтез подобных алмазов при каталитическом участии германия осуществили в аргоновой дуге. Эксперимент длился несколько десятков секунд. Тем самым была показана эффективность плазменных методов при синтезе углеродных и полупроводниковых наноструктур. При наличии плазменной струи можно синтезировать самостоятельные наноструктуры из германия и кремния. В данной работе приведены результаты синтеза углеродных наноструктур при каталитическом участии кремния в аргоновой дуге.

Анод электродуговой установки представлял собой графитовый стержень диаметром 14мм и высотой 30 мм. На поверхности анода было просверлено отверстие диаметром 3 мм и глубиной 10 мм. Перед экспериментом это отверстие было заполнено кремниевым порошком. Катод электрической ДУГИ представлял графитовый стержень диаметром 6 мм и высотой 40 мм. Эксперимент проходил в аргоновой среде с давлением 500 Тор. Для осуществления дуги верхний электрод опускали до создания контакта с с нижним электродом-анодом и разрывали контакт. При этом зажигалась дуга. Расстояние между электродами поддерживали в 2 мм. Напряжение между электродами равнялось 22 В при токе 60 А. В ходе эксперимента происходило испарение атомов углерода и кремния. Пары атомов углерода и кремния поднимались за счет Архимедовой силы и осаждались на поверхности катода, в основном, на боковой поверхности. Именно здесь были образованы наросты, которые были проанализированы на оптическом и на электронном микроскопах. Твердость полученных наноструктур определяли путем перетирания между двумя стеклами. Помещенный между двумя стеклами порошок оставлял на поверхности стекол следы.

На Рис.1-6 представлены снимки полученных в экспериментах образцов в электронном микроскопе Carl zeiss Auriga Crossbeam.

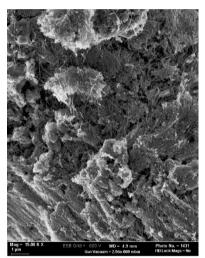


Рис.1. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60 А. Увеличение 15000 раз.

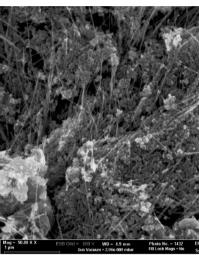


Рис.2. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60 А. Увеличение 50000 раз..

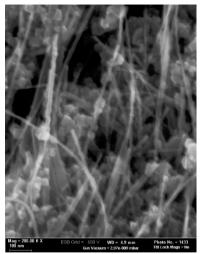


Рис.3. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60A. Увеличение 100 000 раз.

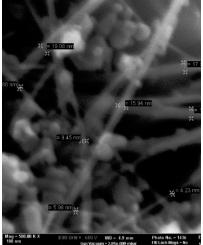


Рис.4. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60А. Увеличение 500 000 раз

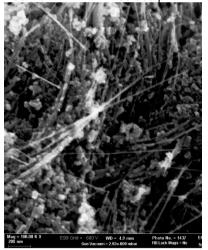


Рис.5. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60А. Увеличение 100 000 раз.

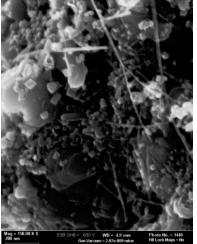


Рис.6. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 500 Тор, напряжении 22 В и силе тока 60А. Увеличение 150 000 раз.

Как видно из представленных рисунков на поле зрения имеются два вида наноструктур: нанотрубки и наноалмазы. Линейные размеры наноалмазов колеблются от 10 нм до 50 нм. Диаметры углеродных нанотрубок колеблются от 4 нм до 20 нм, а их длина - от 100 до 2 мкм. Как показал элементный анализ образцов, они 100% состоят из углерода. В них отсутствует и кремний, и кислород. Роль кремния в образовании углеродных нанострукур заключается в том, что кремний выступает как катализатор синтеза углеродных наноструктур. Именно в той области катода, где происходит синтез полученных образцов, скорее всего, такая температура, что не образовываются ни кремниевые нанотрубки ни карбид кремния. Изза высокой температуры они улетают выше, забрав ту энергию, которая освобождается при синтезе углеродных наноструктур.

- [1] Yu.N. Palyanov, I.N. Kupriyanov, Yu.M. Borzdov, N.V. Surovtsev. Scientific Reports. 2015. V. 5. P. 14789.
- [2] B.A. Timerkaev, B.R. Shakirov, D.B. Timerkaeva. *Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge*. High Energy Chemistry. 2019. V. 53. №. 2. P. 162-166.
- * btimerkaev@gmail.com
- ** BATimerkaev@kai.ru
- *** BATimerkaev@kai.ru
- **** ilnur-ibragimov1997@mail.ru
- **** ah alina.ru@mail.ru

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОТРУБОК ИЗ ОКСИДА ЦИНКА.

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Фельцингер В.С.^{1**}, Калеева А.А.^{1***}, Эрлингайте Е.А.^{1****}, Уктамов Ж.А.^{1****}, Нуриддинов Х.С.¹

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

Аннотация. В работе приведены результаты по синтезу нанотрубок оксида цинка в электродуговой плазме. Диаметры этих нанотрубок порядка 120-150 нм, а длина порядка нескольких микрометров. Отдельные нанотрубки могут достигать до 1 мм. Как показали электронно микроскопические исследования, нанотрубки оксида цинка являются «матрешкой»: они нанизаны на углеродную нанотрубку. Первоначально формируется ломаная углеродная нанотрубка диаметром порядка 30 нм, а затем на него нарастает нанотрубка оксида цинка. Причем, между этими нанотрубками не проглядывается контакта.

Структурные особенности и уникальные свойства наноструктурных элементов из оксида цинка вызывают большой интерес как у vченых, так и v производителей. Одних интересует эффективность цинк-оксидных светоизлучающих диодов, других - создание полупроводниковых транзисторов на основе цинк-оксидных нанотрубок р- и п-типа [1]. Не менее интересна лазерная ультрафиолетовая генерация в наностержнях оксида цинка при оптическом возбуждении, так как при большой энергии накачки в них рекомбинация взаимодействующих преобладает экситонов [2]. Нитевидные нанокристаллы ZnO к тому же обладают пьезоэлектрическими свойствами [3]. Этот список можно было бы еще продолжить.

Наибольший резонанс вызвала работа Альберта Насибуллина с соавторами из разных стран о создании покрытых оксидом цинка однослойных углеродных нанотрубок [1]. Этому коллективу путем обработки поверхности однослойных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) озоном и путем использования технологии осаждения атомных слоев, удалось осуществить равномерное осаждение ZnO на поверхность ОСУНТ. В данной работе нам удалось объединить эти две операции в одну и получить углеродные нанотрубки, покрытые оксидом цинка.

Экспериментальная установка по синтезу углеродных нанотрубок, покрытых оксидом цинка, состояла из вакуумной камеры с водоохлаждаемыми стенками, источника электрического питания, системы вакуумирования и газоснабжения, измерительных приборов. Вакуумная камера имела смотровое окно для

наблюдения за ходом эксперимента, а специальное устройство позволяла изменять расстояние между электродами.

В качестве электродов мы использовали графитовые стержни. В анодном стержне было сделано небольшое углубление диаметром 3мм и глубиной 10 мм, которое было заполнено графитовой пылью, перемешанной с железной опилкой. В качестве источника цинка мы использовали трубку из оцинкованного железа диаметром 25,2 мм, внутри которой, в дальнейшем, и организовывали дуговой разряд.

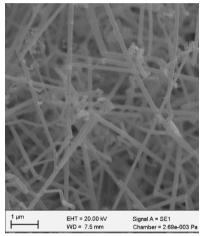


Рисунок 1. Нанотрубки оксида цинка. Увеличение 10000 раз

Рисунок 2. Нанотрубки оксида цинка. Увеличение 30000 раз

Перед экспериментом вакуумную камеру откачивали до давления 10 Торр и заполняли аргоном до давления 500 Торр. Во время дугового разряда происходило испарение атомов углерода как из графитовой пыли с железом, так и с поверхности катода. Испарение атомов цинка за счет омывания внутренних стенок оцинкованной трубы потоком плазмы началось ориентировочно через 4-6 с после зажигания дуги. Нанотрубки из оксида цинка осаждались на поверхности медной подложки. Наросты из нанотрубок также наблюдались на торцевой поверхности оцинкованной трубы. В виде пелены они тянулись до поверхности отрицательного электрода на расстояние порядка 2-3 см. Полученные образцы изучались на электронном микроскопе.

На рис 1-2 приведены синтезированные на подложке нанотрубки из оксида цинка. Как видно из приведенных рисунков диаметры этих нанотрубок порядка 120-150 нм, а длина порядка нескольких микрометров. Отдельные нанотрубки могут достигать до 1 мм. Самым интересным результатом работы оказался тот факт, что нанотрубки оксида цинка являются «матрешкой», они нанизаны на

углеродную нанотрубку. На Рис.2 отчетливо просматриваются факт формирования нанотрубки оксида цинка. Из рисунка видим, что первоначально сформировалась ломаная углеродная нанотрубка диаметром порядка 30 нм, а затем на него наросла нанотрубка оксида цинка. Причем, между этими нанотрубками не проглядывается контакта. Как показал элементный анализ, в составе этих нанотрубок 70% Zn, 23% О и 5,6% С в весовых процентах.

- [1]. Partha P Pal, Evgenia Gilshteyn, Hua Jiang, Marina Timmermans, Antti Kaskela, Oleg V Tolochko, Alexey V Kurochkin, Maarit Karppinen, Mikko Nisula, Esko Kauppinen and Albert G Nasibulin Single-walled carbon nanotubes coated with ZnO by atomic layer deposition. Nanotechnology 27 (2016) 485709 (7pp) doi:10.1088/0957-4484/27/48/485709).
- [2]. Грузинцев А.Н., Редькин А.Н., Якимов Е.Е., Маковей З.И., Бартхоу К. (Barthou C.), Беналул П. (Benalloul P.). Люминесценция нанокристаллов ZnO различной формы, полученных методом газофазного синтеза // Неорган. материалы. 2006. Т. 42. № 5. С. 568-574.
- [3]. Козьмин А.М., Гаврилов С.А., Громов Д.Г., Назаркин М.Ю., Тимошенков С.П., Шулятьев А.С., Кочурина Е.С. Нанохарвестер пьезоэлектрической энергии на основе массива нитевидных нанокристаллов ZnO и плоского медного электрода // Физика Твердого Тела, том 55, вып. №7, стр. 1376-1379, 2013.
- * BATimerkaev@kai.ru ** vasiliyfe@mail.ru
- *** andreeva.anzhelika.a@yandex.ru
- **** lena.demy.1977@yandex.ru
- ***** oktamovjasur@mail.ru

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГЕРМАНИЕВЫХ НАНОТРУБОК

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Калеева А.А.^{1***}, Фельцингер В.С.^{1***}, Залялиева А.А.^{1****}, Сулейманов Р.М.¹, Ибрагимов И.С.¹, Сорокина А.Р.^{1****}, Ахметвалеева А.Р.^{1*****},

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

Аннотация. В работе описывается процесс синтеза германиевых нанотрубок в аргоновой микродуге. Испарение атомов германия осуществлялось с поверхности монокристаллического германия, который служил анодом микродугового разряда. Синтез нанотрубок наблюдался на поверхности молибденового катода. Диаметры германиевых нанотрубок достигают 800-900нм.

Полупроводниковые наночастицы из кремния (Si) или германия (Ge) В обладают большим потенциалом применения различных областях. Основными функциональными свойствами полупроводниковых наноструктур являются размер, форма и их состав. Синтез кремниевых нанотрубок был осуществлен в [1]. В отличие от Si германий имеет в 10-50 раз больший коэффициент поглощения во всем видимом спектре [2] и в 104 раза более высокую электронную проводимость [3]. Поэтому Ge является перспективным материалом для изготовления устройств на основе полупроводниковых наночастиц. В последние годы были освещены различные подходы к синтезу наноструктурированного Ge, такие как лазерная абляция, химическое восстановление и гидротермальный процесс. В работе [4] германий служил в качестве катализатора при плазмохимическом синтезе наноалмазов. В работе [5] был осуществлен синтез германиевых нанотрубок в аргоновой дуге. В данной работе мы продолжили изучение процесса синтеза нанотрубок германия в электрической микродуговой плазме.

В ходе проведенного эксперимента в качестве анода использовался германий, катодом - молибденовый стержень. Эксперимент проводился при давлении около 500 Тор в течение нескольких десятков секунд при значениях тока от 15 до 25 А. Германий испарялся и происходил рост отложений на поверхности электрода. Полученные новые структуры были изучены на оптическом микроскопе и сканирующем электронном микроскопе с определением элементного состава.

На Рис.1 представлен снимок образца образовавшегося в ходе эксперимента.

На снимке нанотрубки имеют длину порядка 30 мкм и диаметр около 900 нм. Поверхность нанотрубок является гладкой, на концах которых наблюдаются сферические образования. Исследования показали, что эти нанотрубки многослойны и обладают большой механической прочностью.

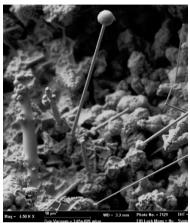


Рисунок 1 (а). Снимки германиевых нанотрубок, увеличение 1500 раз



Рисунок 1 (б). Снимки германиевых нанотрубок, увеличение 750 раз

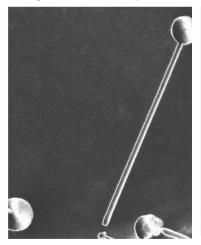


Рисунок 2 (а). Отдельная германиевая нанотрубка

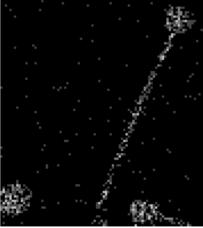


Рисунок 2(б). элементный состав нанотрубки

На Рис.2б показан элементный состав нанотрубки, изображенной на Рис.2а. Как видно она на 100% состоит из германия.

На Рис.3 представлена германиевая нанотрубка, синтезированная в условиях, когда оба электрода представляли собой графитовые стержни.

Ha графитовом стержне, который служил анодом, была просверлена лунка. Перед экспериментом данную лунку заполняли германиевым порошком. Во время эксперимента атомы германия испарялись с поверхности анода и осаждались на поверхность катода. Помимо атомов кремния с поверхности анода испарялись и атомы углерода. Как показал элементный анализ, на поверхности конусообразной германиевой нанотрубки имеются углеродные образования, размерами 20 -50 нм. По внешнему строению можно предположить. что эти образования представляют наноалмазы. Именно германий, как было упомянуто в работе [4],

является катализатором образования наноалмазов.



Рисунок 3. Германиевая нанотрубка. Увеличение 45000 раз

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РТ в рамках научного проекта № 18-43-160005 р.

- [1] .A. Timerkaev, A.A. Andreeva. Journal of Physics: Conference Series V. 1058, 2018, 012071
- [2] L. Wang, K. Bao, Z. Lou, G. Liang, Q. Zhou. Dalton Transactions 2016, V. 45, P. 2814-2817.

- [3] W.C. Dash and R. Newman Phys. Rev. V. 99, 1955, P. 1151
- [4] B.A. Timerkaev, A.A. Kaleeva, D.B. Timerkaeva, A.I. Saifutdinov, High Energy Chemistry V. 53, 2019, P. 390-395
- [5] B. A. Timerkaev, A. A. Kaleeva, D. B. Timerkaeva, and A. I. Saifutdinov. Synthesizing Germanium Nanotubes in an Electric Arc Plasma. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2020, Vol. 94, No. 3, pp. 613–617. БА Тимеркаев, АА Калеева, ДБ Тимеркаева, А.И.Сайфутдинов. Синтез германиевых нанотрубок в электродуговой плазме. Журнал физической химии. 2020. 94, №3. 448-452.
- * btimerkaev@gmail.com
- ** andreeva.anzhelika.a@yandex.ru
- *** vasiliyfe@mail.ru
- **** adelinaza@mail.ru
- **** adelia-k@yandex.ru
- ***** ah alina.ru@mail.ru

СИНТЕЗ КРЕМНИЕВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР В АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЕ

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Фельцингер В.С.^{1**}, Геворгян Р.К.¹, Шайхатторов Р.Р.¹, Калеева А.А.^{1***}

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

Аннотация: В работе приведены результаты синтеза кремниевых наносфер (кремниевые фуллерены) в аргоновой плазме. Во время эксперимента было осуществлено испарение атомов кремния с поверхности монокристалла с помощью плазменной струи. Атомы кремния увлекались потоком аргоновой плазмы и по мере остывания плазмы сформировались в виде сферических структур толщиной в несколько атомных слоев или в виде нанотрубок кремния. Диаметры кремниевых наносфер колеблется от 50 нм до 15 мкм, а кремниевых нанотрубок - от 40 до 100 нм.

Известно, что германий является катализатором для ускорения реакций образования алмазов из графита [1,2]. В работе [1] алмазы синтезированы микроскопических размеров были каталитическом участии германия CVD методом. Эксперимент продолжался более 60 часов. В работе [2] синтез подобных алмазов при каталитическом участии германия осуществили в аргоновой дуге. Эксперимент длился несколько десятков секунд. Тем самым была показана эффективность плазменных методов при синтезе углеродных и полупроводниковых наноструктур. Как показали проведенные эксперименты, при наличии мощной плазменной струи можно синтезировать так же как самостоятельные наноструктуры из германия, таки из кремния. В данной работе приведены результаты синтеза кремниевых наносфер в аргоновой плазменной струе.

В ходе эксперимента плазменная струя была направлена на поверхность монокристалла кремния. Мощная струя аргоновой плазмы быстро превращала кристалл кремния в атомарный газ, который далее уносился плазменным потоком. По мере остывания плазменной струи осуществлялся синтез кремниевых наносфер самого различного диаметра, но строгой сферической формы. На Рис.1 и Рис.2. представлены снимки полученных в экспериментах образцов в электронном микроскопе Carl zeiss Auriga Crossbeam.

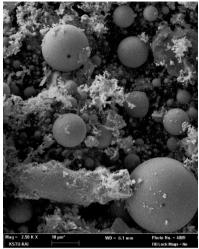


Рисунок 1. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 760 Тор и силе тока 300 А. Увеличение 2 500 раз.

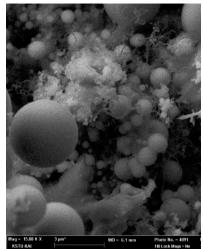


Рисунок 2. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 760 Тор и силе тока 300 А. Увеличение 20 000 раз..

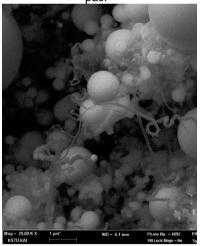


Рисунок 3. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 760 Тор и силе тока 300 А. Увеличение 25 000 раз.

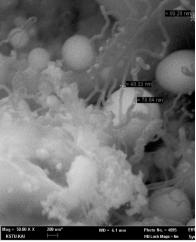


Рисунок 4. Снимки образцов, полученных в атмосфере аргона при давлении 760 Тор и силе тока 300 А. Увеличение 50 000 раз

Как видно из Рис 1 - 4 приблизительно 60-70% полученного материала являются кремниевыми наносферами. Диаметры кремниевых наносфер колеблются от 50 нм до 15 мкм. Кроме наносфер на Рис.3,4 наблюдаются и кремниевые нанотрубки. Их диаметры колеблются от 40 до 100 нм, а длина, по меньшей мере, несколько мкм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РТ в рамках научного проекта № 18-43-160005 р а.

- [1] Yu.N. Palyanov, I.N. Kupriyanov, Yu.M. Borzdov, N.V. Surovtsev. Scientific Reports. 2015. V. 5. P. 14789.
- [2] B.A. Timerkaev, B.R. Shakirov, D.B. Timerkaeva. *Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge*. High Energy Chemistry. 2019. V. 53. №. 2. P. 162-166.
- * btimerkaev@gmail.com
- ** vasiliyfe@mail.ru
- *** andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

МИКРО-ДУГОВОЙ СПОСОБ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУР КРЕМНИЯ

Калеева А.А.^{1*}, Тимеркаев Б.А.^{1**}, Шамсутдинов Р.С.^{1***}, Сайфутдинов А.И.^{1***}, Шакиров Б.Р.1****

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Наноструктуры на основе кремния И диоксида кремния: нанопорошки, нанотрубки нанонити, нанокомпозиты имеют перспективу широкого применения В наноэлектронике. оптоэлектронике И солнечной энергетике. Тлеющий применительно к синтезу наноструктур изучен в работах [1-4].Эти же авторы применили тлеющий разряд для синтеза фуллернов [5]. Замена монолитного материала на вещество наноструктурированном состоянии позволяет в несколько раз улучшить необходимые технические характеристики устройств, в которых они используются. В частности, замена графитового анодного элемента литий-ионных аккумуляторах В наноструктурированный кремний позволит увеличить емкость аккумуляторов [6, 7]. Есть разные методы получения кремниевых наноструктур, например, С помощью химических реакций диспропорционирования восстановления. травления последующей термообработкой. либо диссоциацией силана вследствие нагрева излучением СО2-лазера. помошью химического осаждения паровой фазы и термического испарения с использованием катализатора (Au) и т.д.

Получение наноструктур кремния в дуговой плазме является эффективным, так как не требует дополнительных катализаторов, либо долгого нагревания материала электродов [8].

установка Экспериментальная состоит ИЗ водоохлаждаемой вакуумной камеры, систем вакуумирования и газоснабжения, источника тока, балластного реостата, выпрямительного блока, а также измерительных приборов. В экспериментах в качестве электродов были использованы монокристаллический кремний и молибден. Стержень молибдена длиной порядка 6 см и диаметром 1 см с полированным торцом служил в качестве катода, а вмонтированный в медной трубке кусочек кремния служил анодом. Экспериментальная камера заполнялась инертным газом - аргоном до давления порядка 500 Тор. Давление отслеживалось с помощью ртутного манометра.

Был проведен ряд экспериментов по синтезу наноструктур кремния в плазме дугового разряда, с изменением таких параметров как сила

тока, напряжение, давление в камере и время зажигания разряда. В результате проведенных экспериментов на поверхности электродов образовывались наросты с серым оттенком, которые исследовались в оптическом и электронном микроскопе (рис.1-3).

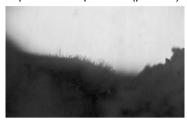


Рисунок 1. Увеличение образца в 40 раз уже позволяет увидеть тонкие столбики образований на поверхности электрода

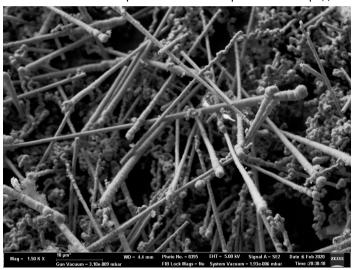


Рисунок 2. Снимок наноструктур, полученных дуговым методом: увеличение 1 500 раз

На фотографии с электронного микроскопа видно множество многослойных наноструктур, имеющих сферические закрытые концы. На снимке наблюдаются две формы нанотрубок. Одна часть нанотрубок прямая коническая, а вторая часть изогнутая.

Диаметры нанотрубок колеблются от 200 до 350 нм, а их длина больше 10 мкм. Форма червеобразная, нити переплетаются, часть нанонитей имеет относительно прямую форму. Как видно из приведенного снимка, стенки нанотрубок имеют толщину порядка 50 нм.

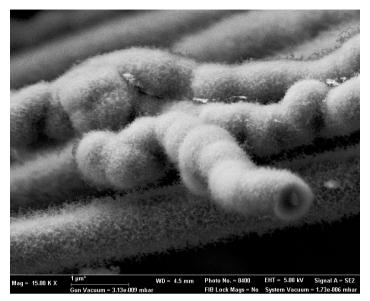


Рисунок 3. Полые наноструктуры, увеличение снимка 15 000 раз.

Поверхности трубок обросли отростками, диаметры которых всего несколько нанометров в диаметре при длине порядка 100 нм Элементный анализ показал, что нанотрубки покрыты пленкой SiO₂. Будучи подверженными механическим воздействиям, нанотрубки не были повреждены, это говорит об их прочности.

Для применения нанонитей в качестве анодов литий-ионных аккумуляторов необходимо оптимизировать процесс их синтеза и исключить все возможные примеси элементов. Для того, чтобы сделать выводы о возможности применения полученных образцов в солнечных панелях, необходимо провести ряд спектральных исследований.

- 1. Asadullin T.Y., Galeev I.G. Combined method of stabilization of the glow discharge in gas flow J. of Phys. Conf. Ser. 2017. 927(1) 012003
- 2. Asadullin T.Y., Galeev I.G. The magnetic field application for the gas discharge plasma control in processes of surface coating and modification J. of Phys. Conf. Ser. 2017. 789(1) 012003
- 3. Galeev I.G., Asadullin T.Y.Improving of stability of the volumetric glow discharge in the gas flow J. of Phys. Conf. Ser. 2017. 789(1) 012012
- 4. Galeev I.G., Asadullin T.Y. Enhancing of the glow discharge stability in chamber with cathode sections coated by a discontinuous dielectric coating J. of Phys. Conf. Ser. 2016. 669(1) 012015

- 5. Galeev I.G., Asadullin T.Ya. Obtaining fullerene-containing soot during combustion of gaseous hydrocarbons in an external electric field J. of Phys. Conf. Ser. 2016. 669 012016
- 6. Timerkaev B.A., Andreeva A.A. Technology of growing silicon nanotubes, Journal of Physics: Conference Series, 2018, V. 1058, 012071
- 7. Тимеркаев Б.А., Шакиров Б.Р., Калеева А.А., Фельцингер В.С., Формирование кремниевых наноструктур в электрическом разряде. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 1. с. 37–41.
- 8. Timerkaev B.A., Shakirov B.R., Timerkaeva D.B. Creation of Silicon Nanostructures in Electric Arc Discharge. High Energy Chemistry. 2019. V. 53. № 2. P. 162-166.

^{*}andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

^{**}btimerkaev@gmail.com

^{***}shamsutdinovrustam@yandex.ru

^{****}as.uav@bk.ru

^{*****}bulatshoker123456789@gmail.com

ПЛАЗМЕННО- ДУГОВОЕ ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Калеева А.А.^{1*}, Тимеркаев Б.А.^{1**}, Петрова О.А.^{1***}, Шамсутдинов Р.С.^{1****}, Даутов И.Г.^{1*****}, Мастюгин А.В.^{1******}

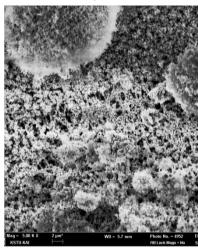
¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Кремний и его производные являются важными материалами для промышленного применения, например В полупроводниках, оптоэлектронике И телекоммуникации. Несмотря на то, что существует немало методов получения кремниевых покрытий различных форм, сфера исследования остается актуальной для поиска более эффективных методов синтеза и новых применений наноструктурных покрытий [1]. Наноструктурированные покрытия кремния позволяют обеспечивать удивительно большую площадь контактной поверхности, которая является пористой и очень полезной, например, для технологии зондирования. Исследования, физико-химические свойства. показывают. что пористость, морфология нановолокон и уровень окисления, играют важную роль в оптических свойствах получаемых покрытий.

Существуют исследования, в которых сообщается о получении пленок Si/SiO₂ различными методами, такими как, синтезированние электронно-лучевым испарением [2], радиочастотным распылением [3], молекулярно-лучевым осаждением [4], химическим осаждением из паровой фазы [5]. В данной же работе описан метод дугового испарения материала для получения покрытия SiO₂. Влияние параметров плазмы дугового разряда, таких как, плотность плазмы, давление и температура, а также полное взаимодействие частиц в ходе протекающих кавитационных явлений, отражается главным образом в размерах образующихся частиц, от нескольких нм до мкм и скорости их образования. Данное исследование описано в работе Abeda M.M. [6] где используется метод плазменного лазерного осаждения для получения тонких пленок Si/SiO₂

Экспериментальная установка для получения наноструктурных покрытий включает в себя герметичную камеру, систему вакуумирования, систему подачи инертного газа, измерительные приборы и систему электродов закрепленных в камере. Положительным электродом является кремний, а отрицательным - молибденовый стержень. После откачивания воздуха из вакуумной камеры и последующего заполнения инертным газом на электроды подается напряжение.

Удельное сопротивление монокристаллического кремния комнатных температурах достигает нескольких тысяч Ом*см. При таких сопротивлениях катода не могут быть обеспечены токи, характерные для дугового разряда. Однако при повышении температуры сопротивление кремния экспоненциально уменьшается. Предварительный разогрев электродов может обеспечить снижение сопротивления кремниевого катода до требуемых значений. Для разогрева электродов их замыкали и размыкали несколько раз продолжительностью 2-3 с. При этом важно не перегреть кремниевый электрод, так как при резком нагревании возможно разрушение или расплавление кремния. При достижении кремнием необходимой температуры при очередном прерывании контакта между электродами образовывается электрическая дуга. Был проведен ряд экспериментов с разными значениями токов, от 8 А до 25 А. Во избежание расплавления кремния продолжительность разряда во время экспериментов ограничивали 20 секундами, что что оказалось достаточным для получения покрытий на поверхности анода. Полученные покрытия были исследованы на электронном микроскопе и фотографии этих исследований представлены на Рисунках 1-4.



Мад = 15.00 КХ 2 рт ЧО = 5.7 mm Photo No. - (923 E RSTUKAI PRUAS Mago = No. 5

Рисунок 1. Поверхности образца после эксперимента. Увеличение 5 000 раз

Рисунок 2. Увеличение в 15 000 раз, различимы поры образца диаметром около 1 мкм

На представленных снимках четко видны микропоры полученного покрытия. Вся поверхность полученного образца неоднородна и покрыта сферическими образованиями.

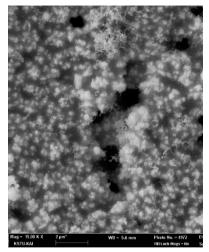


Рисунок 3. Пленка оксида кремния под электронным микроскоп

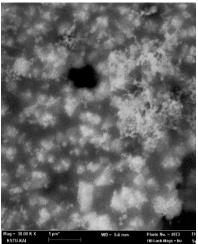


Рисунок 4. Увеличение поверхности образца 30 000 раз

Элемент	Bec. %	Ат.%
CK	1.61	2.76
OK	47.98	61.60
Si K	47.68	34.87
Ge L	2.73	0.77

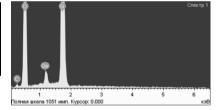


Таблица 1. Элементный анализ образца

Элементный анализ образца, представленный в **Таблице 1**, свидетельствует о наличие на поверхности образца кремния и кислорода в соотношении 1:2. Также на поверхности обнаружены углерод и элементы германия, что объясняется наличием данных элементов в экспериментальной камере.

Из проведенного исследования можно заключить, что плазменнодуговое испарение материала позволяет получить наноструктуры кремния и его производных различной морфологии. Такие покрытия могут быть полезны в электронике, так как позволяют увеличить площадь активной поверхности материала, за счет пористости, либо за счет образования наноструктур по всей площади.

- 1. Timerkaev B.A., Andreeva A.A. Technology of growing silicon nanotubes, Journal of Physics: Conference Series, 2018, V. 1058, 012071
- 2. Sobahan K.M.A., Park Y.J., Kim J.J., Hwangbo C.K. Nanostructured porous SiO₂ films for antireflection coatings. Opt. Commun., 2011, V. 284, pp. 873-876
- 3. Simurka L., Ctvrtlik R., Tomastik J. Mechanical and optical properties of SiO_2 thin films deposited on glass. Chemical Papers, 2018, V. 72, pp. 2143–2151
- 4. Nikitin T., Khriachtchev L. Optical and structural properties of Si nanocrystals in Si in SiO₂ films. J. Nanomater., 2015, V. 5, pp. 614-655
- 5. Gardelis S., Nassiopoulou A.G., Manousiadis P. Structural and optical characterization of two-dimentional arrays of si nanocrystals embedded in SiO₂ for photovoltaic applications. J. Appl. Phys., V.111 (8), 083536
- 6. Abeda M.M., Gasparib F., Kiania A. Optical properties of Si/SiO nano structured films induced by laser plasma ionization deposition. Optics Communications, 2020, V. 462, 1252971

^{*}andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

^{**}btimerkaev@gmail.com

^{***}oapetrova@mail.ru

^{****}shamsutdinovrustam@yandex.ru

^{*****}dautow.ildar2014@yandex.ru

^{*****} artem.mastyugin@mail.ru

СИНТЕЗ ГЕРМАНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР В АРГОНОВОЙ ДУГЕ

Тимеркаев Б.А.^{1*}, Калеева А.А.^{1**}, Петрова О.А.^{1***}, Чуманов Н.А.^{1****}, Сорокина А.Р.^{1*****}, Ибрагимов И.С.^{1*}, Сайфутдинов А.И.^{1*****}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Аннотация. В работе осуществлен синтез германиевых наноструктур плазмохимическим способом. Полученные наноструктуры имеют сферическое строение с размерами от 100 нм до 1мкм. Данные структуры, в отличие от наносфер, открыты с одной стороны, имеют тонкие стенки толщиной в несколько нанометров, которые заканчиваются «щупальцами» диаметром также в несколько нанометров.

Синтез германиевых наноструктур обычно осуществляют CVD методом. Однако, как было показано в работах [1,2] синтез германиевых наноструктур может быть осуществлен и в аргоновой дуге. В работе [1] были синтезированы германиевые нанотрубки толщиной порядка 900 нм в аргоновом микродуговом разряде. Каталитические свойства германия для vскорения образования алмазов из графита были использованы в работах [2,3]. Метод электродугового испарения германия в аргоновой среде с последующим синтезом германиевых наноструктур на подложке оказалась применимой и для синтеза германиевых наносфер. Германиевые наносферы интересны прежде всего с точки зрения развитой поверхности и поэтому могут найти применение в анодных элементах литий ионных батарей. В данной работе приведены синтеза германиевых наноструктур в аргоновой результаты микродуге.

Разряд зажигался в аргоновой среде при давлении 500 Тор между германиевым анодом и молибденовым катодом. Зажигание и стационарное горение дуги происходило при токах 15 - 25 А. Напряжение порядка 30 – 35 В подавался через балластное сопротивление. Перед зажиганием ДУГИ германиевый нагревали до высоких температур путем непосредственного замыкания катода с анодом. После возникновения дуги электроды отводили на расстояние около двух мм. При этом горела устойчивая дуга, германиевый анод нагревался до красна, происходило даже его поверхностное кипение с интенсивным испарением германия. Пары германия осаждались на поверхности подложки и на поверхности молибденового катода. Данные осадки были проанализированы на электронном микроскопе. На Рис.

представлено изображение поверхности катода после эксперимента. Мы видим развитую наноструктурированную германиевую поверхность в увеличении 1500 раз. Уже при таком небольшом увеличении заметна развитая структура поверхности отложений. Заметны наношарики и продолговатые структуры. На следующем рисунке (Рис.2) при увеличении в 4000 раз мы видим скопления сферических образований разного диаметра.

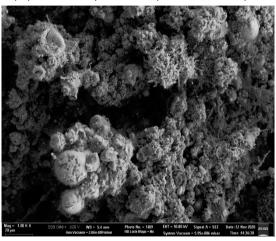


Рисунок 1. Снимки наноструктур германия на поверхности катода с увеличением 1500 раз

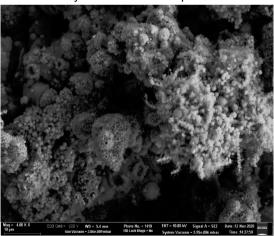


Рисунок 2. Снимки наноструктур германия на поверхности катода с увеличением 4000 раз

На Рис.3 и Рис.4 приведен отдельный участок, увеличенный в 30000 раз и 50000 раз.

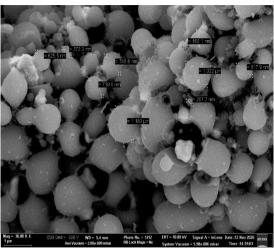


Рисунок 3. Снимки наноструктур германия на поверхности катода с увеличением 30000 раз

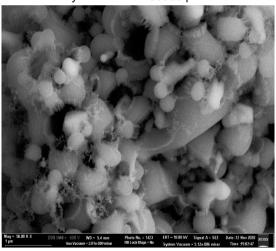


Рисунок 4. Снимки наноструктур германия на поверхности катода с увеличением 50000 раз

Из этих рисунков видно, что нанообразования имеют вид усеченных сфер диаметром от100 нм до1 мкм. Толщины стенок порядка нескольких нанометров. Наносферы правильной геометрической

формы и достаточно полотно прилегают друг к другу. Некоторые наносферы срослись друг с другом. Полученные германиевые наносферы будут полезны для создания развитой поверхности литий ионных батарей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РТ в рамках научного проекта № 18-43-160005 р_а.

- 1. B. A. Timerkaev, A. A. Kaleeva, D. B. Timerkaeva, and A. I. Saifutdinov. Synthesizing Germanium Nanotubes in an Electric Arc Plasma. Russian Journal of Physical Chemistry A, Vol. 94, No. 3, pp. 613–617., 2020. Russian Text Zhurnal Fizicheskoi Khimii, 2020, Vol. 94, No. 3, pp. 448–452.
- 2. Yu.N. Palyanov, I.N. Kupriyanov, Yu.M. Borzdov, N.V. Surovtsev. Scientific Reports. 2015. V. 5. P. 14789.
- 3. B.A. Timerkaev, A.A. Kaleeva, D.B. Timerkaeva, A.I. Saifutdinov. High Energy Chemistry, 53 (2019), pp. 390-395.

^{*} btimerkaev@gmail.com

^{**} andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

^{***} oapetrova@mail.ru

^{****} nikita20021999@mail.ru

^{****} adelia-k@yandex.ru

^{*****} as.uav@bk.ru

РАСЧЕТ УСЛОВИЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ВЧИ-РАЗРЯДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОСОГЛАСОВАННОЙ МОДЕЛИ

Желтухин В.С.^{1,2*}, Терентьев Т.Н.^{1**}, Шемахин А.Ю.¹, Самсонова Е.С.¹

¹Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия ²Казанский Национальный Исследовательский Технологический Университет, Казань, Россия

В статье рассматривается новый подход к расчету значений напряженности магнитного поля H_R , создаваемое индуктором на внутренней стенке разрядной камеры, и необходимое для поддержания стационарного состояния ВЧИ-разряда пониженного давления. В рассматриваемой модели система дифференциальных уравнений интерпретируется как нелинейная задача на собственные значения. Модель учитывает влияние граничных условий третьего рода для концентрации электронов и электромагнитного поля. Разработанный подход позволяет решать одну из двух задач проектирования ВЧИ плазмотронов: определять напряженность магнитного, необходимую для обеспечения требуемой концентрации электронов в разряде, или, наоборот, находить концентрацию электронов, которая может быть создана в разряде при заданной напряженности магнитного поля на границе (что эквивалентно нахождению тока индуктора для получения заданной мощности разряда), а также радиальные распределения напряженности электрического и магнитного полей, концентрации электронов.

Эффективным способом модификации различных поверхностей материалов является обработка в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления (13.3-133 Па) [1], одной из разновидностей которого является индукционный разряд. Плазма, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: степень ионизации 10^{-7} – 10^{-5} , концентрация электронов 10^{16} – 10^{19} м⁻³, температура атомов и ионов в плазменном сгустке (3-4)· 10^{3} K, в плазменной струе (3.5–10)· 10^{2} K, электронная температура 1–4 эВ [1, 2].

Параметры работы ВЧИ-плазмотрона можно получить с помощью методов математического моделирования. Для этого рассмотрена математическая модель установившегося ВЧИ-разряда. Для упрощения модели введены несколько приближений: индуктор бесконечен (пренебрежение эффектами на концах индуктора), плазма квазинейтральна и имеет азимутальную симметрию, таким образом задача сводится к одномерной (см. Рисунок 1).

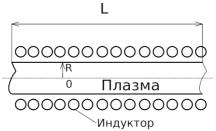


Рисунок 1. Модель "бесконечного" индуктора. Радиус-вектор г проведен от центра плазмотрона до его стенки

Модель ВЧИ плазмы, включает в себя уравнения Максвелла, преобразованные к системе эллиптических уравнений относительно квадратов модулей напряженностей) и уравнение баланса электронов с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(\frac{r}{\sigma}\frac{dH^{2}}{dr}\right) = 2\sigma E^{2} \frac{dH}{dr}\Big|_{r=0} = 0, H^{2}|_{r=R} = H_{R}^{2}$$
 (1)

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(rE)^{2}\right) = 2\mu_{0}\omega H^{2} E|_{r=0} = 0, \frac{d}{dr}(rE)^{2}\Big|_{r=R} = R^{2}\sqrt{E^{2}H^{2}}$$
(2)

$$\frac{d}{dr}\left(rD_a\frac{dn_e}{dr}\right) + \nu_i n_e = 0 \left. \frac{dn_e}{dr} \right|_{r=0} = 0, -D_a\frac{dn_e}{dr} \right|_{r=R} = \alpha n_e$$
 (3)

Здесь E — модуль напряженности электрического поля, H — модуль напряженности магнитного поля, σ — проводимость, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, n_e — концентрация электронов, v_i — частота ионизации, α — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, создаваемого двойным слоем на стенке разрядной камеры, r — расстояние от центра плазматрона r=0 до его стенки r=0.012 м, проводимость рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{e^2 n_e v_c}{m_e (v_c^2 + \omega^2 / 4 \pi^2)}$$
 (4)

Где v_c — частота столкновений. Значения распределений D_a , v_i и v_c взяты из Bolsig+ при параметрах, эквивалентных расчетным.

В уравнении (3) перейдя к безразмерным величинам, уравнение перепишется в виде:

$$\frac{-1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \bar{D} \frac{d\bar{n}}{d\rho} \right) = \frac{R^2 \nu_{i0}}{D_{a0}} \bar{\nu} \bar{n} = \lambda \bar{\nu} \bar{n} \tag{5}$$

Где λ – собственное значение уравнения (3). т.к. $\bar{n} \geq 0 \to \lambda_0 = \lambda_{min}$, собственное значение может быть определено из соотношения Рэлея-Ритца. Для исходных уравнений оно принимает вид:

$$\lambda_{0} = \frac{\int D_{a} \left(\frac{E}{p}\right) \left(\frac{dn_{e}}{dr}\right)^{2} r dr}{\int \nu_{i} \left(\frac{E}{p}\right) n_{e}^{2} r dr}$$
 (6)

При достижении λ_0 значения = 1 происходит определение максимального значения концентрации электронов

Разработан итерационный метод решения задачи и написана программа на языке Python. Для каждого уравнения системы выводится разностная схема. Для концентрации электронов решается задача на собственные значения. Блок-схема программы показана на рис. 2.

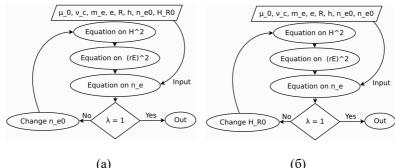


Рисунок 2. Алгоритм решения уравнений (1), (2), (3). (а) нахождение n_e из H_R, (б) нахождение H_R из n_e.

В работе проведены расчеты параметров аргоновой плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда при давлении 133 Па, частоте поля 1.76 МГц по середине ВЧИ-плазмотрона вдоль его радиуса в одномерном приближении.

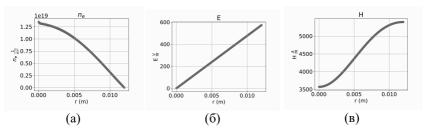


Рисунок 3. Результаты численного расчета: (а) распределение концентрации электронов от центра до стенки плазмотрона, (б) распределение модуля напряженности, (в) распределение магнитного поля.

В результате расчета получено, что модуль напряженности магнитного поля достигает максимального значения у стенки камеры и равняется 5400 А/м. Модуль напряженности электрического поля 134

линейно возрастает до 574 В/м вдоль радиуса. Максимум концентрации электронов достигается в нуле, в центре ВЧ-плазмотрона, что качественно соответствует экспериментальным данным[4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

- [1] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Хубатхузин А.А. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование газодинамики струйных течений высокочастотной плазмы пониженного давления / Казань: КНИТУ 2014.– 166 с.
- [2] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. / Казань: Изд-во Казан. Университета, 2000. 348 с.
- [3] Желтухин В. С., Шемахин А. Ю. Расчет газодинамики струй ВЧплазмы пониженного давления //Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2011. – Т. 153. – No. 4.
- [4] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. / Казань: Изд-во Казан. Университета, 2000. 100 с.

^{*} vzheltukhin@gmail.com

^{**} terentievt@yandex.ru

ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНЫХ СФОКУСИРОВАННЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ РАЗРЯДОВ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ГАЗАХ

Сайфутдинов А.И.1*, Кустова Е.В.2**

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

В последние годы наблюдается возросший интерес, связанный с применением безэлектродных сфокусированных микроволновых разрядов в космических и аэродинамических приложениях [1-2]. В исследований частности. результаты экспериментальных продемонстрировали широкие возможности таких разрядов в задачах подвода энергии в сверхзвуковые газодинамические потоки с целью управления обтеканием поверхности твердых тел и снижения лобового сопротивления при движении этих тел в атмосфере [1-2]. Были разработаны специальные фокусирующие устройства на основе сферического зеркала, а также зеркала в виде параболоида. vстановлено цилиндрического И микроволнового разряда на нагрев газа в сверхзвуковых потоках в этих системах[2]. Прогресс экспериментальных исследований и практических приложений стимулировал серию теоретических работ, посвященных микроволновому разряду [3-4].

Представленная работа является развитием работы [4] направлена на исследование динамики формирования плазмоидов в фокусирующей системе [2], а также исследованию вытягивания плазмоида в главном фокусе системы [2]. Была сформулирована физико-математическая модель разряда, основанная расширенном гидродинамическом приближении, описывающем газоразрядную плазму, дополненную системой уравнений для поступательной и колебательной температур, а также системой уравнений Навье-Стокса для описания газодинамических эффектов области формирования разряда. Поддержание разряда помощью уравнений Максвелла для электромагнитной волны. Для описания разряда использовалась кинетическая схема учитывающая следующие типы нейтральных, возбужденных и заряженных частиц: e, N_2 , N_1 , N_2 (A), N_2 (B), N_2 (C), $N_2(a1),\ N(d),\ N(p),\ N^+,\ N_2^+,\ N_4^+$ и включающая 57 реакций. Для описания быстрого нагрева газа в области формирования разряда использовались данные из работ [5-6]. Численные эксперименты были проведены для средних давлений в диапазоне от 20 до 100 Торр и вкладываемой мощности от 100 до 250 кВт.

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

На рис. 1 представлены распределения концентраций электронов в фокусирующей системе в различные моменты времени для давления 40 Торр для СВЧ волны, генерируемой магнетроном на входе волновода с *E₀*=3kV/cm

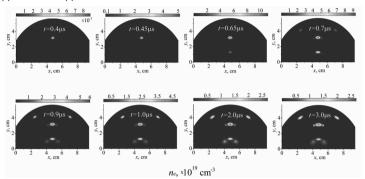


Рисунок 1. Динамика формирования свч-плазмоидов в фокусирующей системе в течение микроволнового импульса *t*=3 мкс.

Видно, что к моменту времени 3 мкс в вычислительной области наблюдается 4 плазмоида: первый в главном фокусе системы и второй – нижний, расположенный вблизи источника СВЧ-излучения, представляющие собой структуру из трех сгруппированных плазменных образований, а также два верхних плазмоида, симметрично расположенных вблизи поверхности параболического зеркала. На рис. 2 приведены временные зависимости некоторых параметров плазмы в главном фокусе системы.

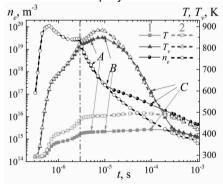


Рисунок 2. Эволюция концентрации электронов, поступательной температуры газа и колебательной температуры азота в свч-плазмоиде, сформированном в главном фокусе, для двух наборов каналов быстрого нагрева газа.

Ha рис. 3 представлены расчеты. дополнительные двумерной прямоугольной проведенные для геометрии предположении, что вектор напряженности электрического поля плоскости колеблется рисунка. Предполагалось, вычислительной области формируется стоячая СВЧ-волна с одной пучностью.

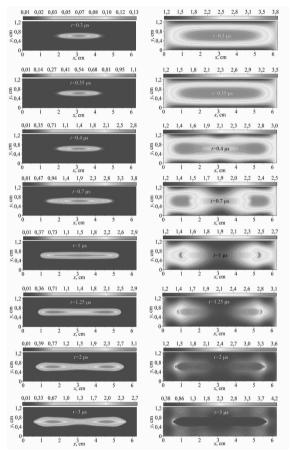


Рисунок 3. Динамика формирования плазмоида: концентрации электронов (слева) и среднеквадратичного значения напряженности электрического поля (справа)

В результате была получена динамика формирования СВЧ-плазмоида в главном фокусе системы.

Необходимо отметить, что были также проведены дополнительные расчеты с различной длительностью СВЧ-импульса. В результате было показано, что например, для СВЧ-импульса длительностью 10 qqoT наблюдается при давлении 40 возникновение ионизационно-перегревной неустойчивости. возникает филаментация (контракция плазмоида): увеличение температуры газа в области формирования разряда приводит к сжатию последнего в тонкий шнур с резким увеличением концентрации электронов на порядок по величине.

Таким образом, в работе сформулирована физико-математическая модель, позволяющая описать формирование микроволновых плазмоидов в фокусирующей установке, разработанной в работе [2] и продемонстрировавшей эффективный способ подвода тепла в сверхзвуковые потоки газа. На основе сформулированной модели проведены численные эксперименты в двумерном приближении по формированию активной фазы и фазы послесвечения микроволновых плазмоидов в азоте в фокусирующей системе для двух наборов основных каналов быстрого нагрева газа.

Проведен анализ динамики перехода из диффузного в филаментированный режим СВЧ-разряда.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 18-08-00707 и грантом Президента РФ для молодых ученых МК-272.2019.1.

- [1] D. Knight, "A Short Review of Microwave and Laser Discharges for Supersonic Flow Control", J. Aerospace Lab. 10, AL10-02 (2015).
- [2] V. A. Lashkov, A. G.Karpenko, R. S.Khoronzhuk, and I. Ch.Mashek, "Effect of Mach number on the efficiency of microwave energy deposition in supersonic Flow", Physics of Plasmas. 23, 052305 (2016)
- [3] J.-P. Boeuf, B. Chaudhury, G.-Q. Zhu, "Theory and modeling of selforganization and propagation of filamentary plasma arrays in microwave breakdown at atmospheric pressure", Phys Rev Lett. 104, 015002 (2010).
- [4] A. I.Saifutdinov, E. V Kustova, A. G. Karpenko , & V. A. Lashkov, "Dynamics of Focused Pulsed Microwave Discharge in Air", Plasma Physics Reports. 45, 6, 602-609. (2019).
- [5] N. A. Popov, "Investigation of the Mechanism for Rapid Heating of Nitrogen and Air in Gas Discharges", Plasma Physics Reports. 27, 886 (2001).
- [6] A.V.Volynets, D.V.Lopaev, T.V. Rakhimova et al. "N2 dissociation and kinetics of N(4S) atoms in nitrogen DC glow discharge", J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 364002 (2018).

^{*} as.uav@bk.ru

^{**} elena kustova@mail.ru

ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Хайруллина Л.Р.1*, Смородин Ф.К.1**

¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева-КАИ), Казань, Россия

Использование вспомогательного газа позволяет существенно снизить удельные затраты энергии излучения благодаря более интенсивному удалению из узкой щели реза продуктов разрушения. При резке металлов применяют в основном кислород [1]. Импульсная лазерная резка алюминиевого сплава предпочтительна не только для турбореактивного двигателя, но и для фюзеляжа, крыла и оперения [2].

Импульсная лазерная резка проводилась на технологическом комплексе LASERCUT 3015 мощностью 4 кВт. Данные экспериментальные исследования резки алюминиевого сплава В93 проводилось для резки отверстий, пазов в камерах сгорания и входного обтекателя газотурбинного двигателя при изменении следующих параметров: мощности лазера, скорости резки, частоты и длительности импульсов, заглубления фокального пятна в материал.

Большой перепад температуры в стенках жаровой трубы приводит к появлению в них температурных напряжений, которые вызывают коробление, а иногда и разрушение стенок. При проектировании камер сгорания уделяется внимание их охлаждению [3]. Для предотвращения дефектов в виде трещин и короблений в зоне термического влияния предлагается использование импульсной лазерной резки [n4]. Применение импульсного излучения позволило снизить удельные затраты энергии излучения за счёт использования воздуха вместо дорогостоящего газа кислорода, существенно повысили качество резки по технологическим показателям – шероховатость поверхности до 0,43 мкм и ширину реза до 0,15 мм при резке алюминия толщиной 7 мм [4].

Получены результаты экспериментов импульсной лазерной резки алюминиевого сплава В93.

Результаты используются на предприятиях ОАК, как малоотходный и высокопроизводительный процесс. Для выполнения экспериментов были выбраны алюминиевые сплавы толщинами 3 мм, 5 мм, 7 мм. В результате выбранных режимов по планированию экспериментов определены оптимальные режимы по скорости импульсной лазерной резки, мощности лазерного излучения. Данные результаты будут способствовать повышению производительности процесса.

Эффективное использование дешёвого технологического газа – воздуха будет способствовать уменьшению энергозатрат.

Рабочие кольца первой и второй ступеней изготовлены из алюминиевого сплава В93. Для изготовления корпусов и жаровых труб камер сгорания используются термостойкие сплавы на основе кобальта и никеля [1-2]. Объем тезисов не должен превышать более четырех страниц, просим Вас не оставлять много пустых мест на крайних страницах, постараетесь максимально заполнить их.

Литература:

- [1] Голубев В.С., О механизмах удаления расплава при газолазерной резке материалов // Шатура. ИПЛИТ РАН. 2004.
- [2] Макашев Н.К.,, Асмолов Е.С., Бузыкин О.Г. Импульснопериодическая газолазерная резка металлов кислородсодержащем газом // Квантовая электроника, Т19. №9. С.910-915. 1996г.

Мингазов Б.Г. Камеры сгорания ГТД. Казань, изд-во КГТУ, 2006г, 216с.

[3] Хайруллина Л.Р., Смородин Ф.К. «Технология лазерного сверления и резки отверстий в изделиях авиастроения» // Хайруллина Л.Р., Смородин Ф.К. Вестник — Казань: Изд-во Каз-ого гос. техн. университета. - 2016. — № 2.- С. 39-43. — ISSN 2078-6255.

^{*} Lraisovna88@mail.ru

^{**} smorodin40@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ЧУГУНОВ СО СТАЛЯМИ

Звездин В.В.^{1*}, Рахимов Р.Р.^{1**}, Хисамутдинов Р.М.^{1***}, Саубанов Р.Р.^{1****}, Портнов С.М.^{1****}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт. Набережные Челны, Россия

Введение. На современных машиностроительных предприятиях успешно развиваются технологии, связанные с внедрением роботизированных лазерных технологических комплексов (РЛТК) в производство. Реализация технологии лазерной сварки (ЛС), как окончательной сборочной операции без последующей механической обработки, повышают производительность труда и экономическую эффективность производства [1,2]. При этом качество сварочного шва обеспечивается выполнением заданных параметров технологического процесса (ТП) и все геометрические размеры сваренного узла не выходят за пределы поля допуска, которые могут составлять десятки микрон.

Теоретические и экспериментальные исследования.

Повышение эксплуатационных характеристик отдельных сваренных частей деталей и узлов многофункционального назначения, например В машиностроении. во многом предопределяется технологиями их изготовления, при этом применяют разнородные металлы. Сварка разнородных металлов требуется в том случае, когда различные части детали работают в различных условиях и требуют разных физико-химические свойства этих частей. Такая сварка обосновановывается экономической эффективностью производства.

Эта задача по лазерной сварке, обеспечивающей получение сварного шва с заданным качеством, с повышенными физикомеханическими свойствами и эксплуатационными характеристиками, является актуальной [1-3].

Решение данной задачи сопряжена со многими техническими сложностями, это стабилизация заданных параметров ТП, прецизионное позиционирование фокуса ЛИ и т. п. [4]

Проведенные исследования показали, что не соблюдение требований ТП ведет к резкому снижению качества сварки. Например, при ЛС чугунов с вермикулярным графитом без подогрева, с высокой скоростью охлаждения наблюдается образование трещин [5]. На рисунке 1 показана микроструктура шва при высокой скорости охлаждения, сварка проводилась в среде аргона.



Рисунок 1. Микроструктура сварного шва пластин ЧВГ30 (слева) и ЧВГ35, увеличение х50, (шлиф травлен)

Исследование микроструктуры проводилось в сечении поперечного микрошлифа относительно сварного шва пластин. В сварном шве выявлено наличие «горячих» трещин, полости которых заполнены окислами, по которым произошло разрушение сварного шва со стороны пластины ЧВГ 35.

Решение поставленных вопросов, конкретизация параметров технологического процесса, обеспечивает успешное выполнение требуемого качества лазерной сварки. Была разработана система автоматического управления (САУ) робототехнического лазерным технологическим комплексом (РЛТК) [6].

На рисунке 2 представлена структурная схема РЛТК с условным отображением четырёх площадочного ФП на стыке свариваемых деталей с элементами управления прецизионным перемещением фокуса ЛИ.

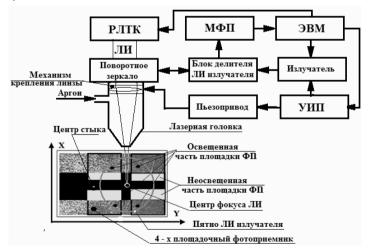


Рисунок 2. Структурная схема РЛТК с условным отображением четырёх площадочного ФП на стыке свариваемых деталей с элементами управления прецизионным перемещением фокуса ЛИ.

При системном подходе к сварке чугунов со сталями, который является формой интеграции научных знаний в области лазерных технологий, необходимо рассматривать комплекс задач. Это температурные режимы, скорости нагрева и охлаждения свариваемого изделия, газовая среда, в которой происходит сварка и её расход, а также позиционирование лазерного излучения относительно стыка свариваемых деталей. Следует отметить, что при нагрузках более 3500 Н разрушение происходит по материалу высокоуглеродистой части сегмента, т.е. чугуну.

На рисунке 3 показан внешний вид поверхности сварного шва пластин из чугуна и стали.

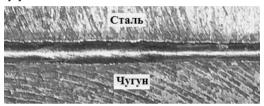


Рисунок 3. Внешний вид поверхности сварного шва пластин из чугуна и стали

На рисунке 4. Показана микроструктура сварного шва с результатами измерений микротвёрдости металлической основы образца в единицах HV 0,05 в сечении травленого микрошлифа, х 50.

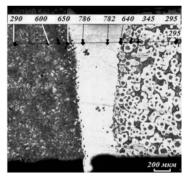


Рисунок 4. Микроструктура сварного шва с результатами измерений микротвёрдости металлической основы образца в единицах HV 0,05 в сечении травленого микрошлифа, х 50

Выводы:.

Трещины при сварке чугуна без присадки пластичного металла образуются из-за наличия в соединении хрупких и твердых структурных составляющих. Для снижения остаточных напряжений и предотвращения образования горячих и холодных трещин в

сварном шве является предварительный нагрев свариваемых заготовок до температуры 400...550 °C.

Основными факторами, влияющими на получение высокого качества соединений при сварке чугунов со сталями, являются химический состав и теплофизические свойства флюса при использовании присадочного материала с высоким содержанием никеля, прецизионное позиционирование фокуса ЛИ на стык и обеспечение тепловых режимов сварки в начале и окончания процесса.

- [1] Звездин В. В. Повышение качества сварных соединений узлов и деталей автомобиля при лазерной сварке. Звездин В. В., Заморский В. В., Каримов В. С., Сабиров И. С. «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств». Материалы Ш международной научно-технической конференции. Ч.1. Пенза: ПГУАС, 2004.С. 54-58.
- Звездин B.B. Сварка разнородных метаппов высококонцентрированными потоками энергии автомобилестроении / В.В. Звездин, Р.Р. Саубанов, Р.М. Алеев, Портнов IIПроблемы И перспективы автотранспортного комплекса: материалы I Всерос.науч.-практ. (заочной) конференция. с международным участием / под общ. ред. И.А. Якубович. – Магадан: Изд-во СВГУ. 2011. – C 85-89.
- [3] Исследование процесса лазерной сварки разнородных металлов / Звездин В.В., Рахимов Р.Р. / Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. № 2 (75). С. 16-23.
- [4] Патент РФ № 2415739, Россия, МПК B23К/26/40, B23К 9/23, И23Л 33/00 2009122958/02; Способ лазерной сварки деталей из разнородных металлов / Звездин В.В. Исрафилов И.Х., Велиев Д.Э. Заявлено 27,12,2010; Опубл. 10.04.2011г. Бюл. №10 C2.
- [5] Технологические особенности лазерной сварки чугунов с вермикулярным графитом / Звездин В.В., Клочкова К.В., Рахимов Р.Р., Саубанов Р.Р., Песошин В.А. // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы -2017 (МНТК "ИМТОМ-2017"). Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 281-284.
- [6] Повышение эффективности лазерной сварки / Саубанов Р.Р., Сыркин С.С., Звездин В.В., Хисамутдинов Р.М., Портнов С.М. // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 3. С. 82-84.

^{*} rafisih88@mail.ru

^{**} rafisih88@mail.ru

^{***} hisamutdinovrm@kamaz.ru

^{****} saubanov@mail.ru

^{*****} portnovsm@kamaz.ru

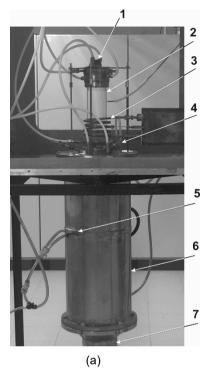
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ДЛЯ СИНТЕЗА И МОДИФИКАЦИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Нагулин К.Ю.^{1*}, Назаров Р.^{1**}, Гайсина А.Р.^{1***}, Гильмутдинов А.Х.^{1****}

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

Плазмохимический реактор для синтеза модификации порошковых материалов состоит из лампового высокочастотного генератора частотой 5,2 МГц и мощностью до 60 кВт с блоком управления, двухконтурной системы водяного охлаждения, системы газов и плазмохимического реактора. подачи плазмохимического реактора (рис.1а) входит кварцевый плазматрон, расположенный вертикально и состыкованный конденсационной камерой из нержавеющей стали. В плазматроне (рис.1б) организованы три газовых потока. Внешний, радиально закрученный поток. распространяется между внешней промежуточной кварцевыми трубками и обеспечивает изоляцию плазменного факела от кварцевых стенок и их охлаждение, поэтому называется защитным. Промежуточный поток, формируемый в пространстве между промежуточной кварцевой трубкой центральной трубкой питателя, расположенной на оси плазматрона, используется для формирования плазменного факела и. поэтому. называется плазмообразующим. Центральный поток, поступающий в плазматрон через питатель, переносит частицы исходной шихты и поэтому называется транспортным. Объемный расход и тип газа во всех трех потоках может регулироваться. [1-7].

Подача сырья может осуществляться в начало плазменного факела, через водоохлаждаемый питатель 3 (рис.1 б), глубина погружения которого может плавно регулироваться от начала плазматрона до середины индуктора 7. Также возможна подача сырья через три сырьевые трубки 4 (рис.1а). расположенные непосредственно вблизи к верхней горловине конденсационной камеры. При этом шихта попадает в нижнюю часть плазменного факела, поэтому температура и время нахождения частиц в горячей зоне меньше. возможность имеют одновременно газопорошковой смеси (аргон и порошок) подавать в реактор другой технологический газ.



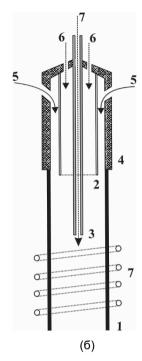


Рис.1. а) - конструкция плазмохимического реактора для плазменной обработки порошковых материалов: 1 — ввод шихты в начало плазменного факела; 2 — кварцевый плазматрон; 3 — индуктор; 4 — ввод шихты в конец плазменного факела; 5 — подача охлаждающего газа; 6 — конденсационная камера; 7 — выход готового порошка; б) - кварцевый плазматрон: 1- внешняя кварцевая трубка; 2 — промежуточная кварцевая трубка; 3 — порошковый питатель; 4 — завихритель; 5 — подача защитного газа; 6 — подача плазмообразующего газа; 7 — подача транспортного газа; 8 — индуктор.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации госконтракт № 075-03-2020-051 по теме № ФЗСУ-2020- 0020 и гранта РФФИ совместно с Академией наук Республики Татарстан (контракт № 18-42-160015).

Литература:

[1] Kumar, S., Selvarajan, V., Padmanabhan, P.V.A., Sreekumar, K.P. Spheroidization of metal and ceramic powders in thermal plasma jet: Comparison between experimental results and theoretical estimation,

- Journal of materials processing technology, V.176, N.1-3, 2006, pp.87-94. DOI: 10.1016/i.imatprotec.2006.02.023
- [2] Boulos M. Plasma power can make better powders. Metal Powder Report. Volume 59, Issue 5, May 2004, Pages 16-21.
- [3] K. Nagulin, R. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov, Inductively Coupled Plasma Processing of Nickel Alloys Powders for Additive Manufacturing, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [4] K. Nagulin, R. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov, Plasmochemical Processing of Powder Materials for Heat-Protective Coatings, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [5] M. Voronov, K. Nagulin, R. Nazarov, A. Gilmutdinov, Numerical Simulation of The Powder Particles Behaviour In a Technoligical Icp, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [6] Voronov, M., Tsivilskiy, I., Nazarov, R., Nagulin, K., Gilmutdinov, A. Force-based analysis of vortices in atmospheric pressure ICPs, Plasma Sources Sci. Technol., 2018, DOI: 10.1088/1361-6595/aaef1c
- [7] K. Nagulin, R. Nazarov, I. Efimochkin, A. Gilmutdinov Optimization of radio-frequency plasma parameters for spheroidization of zirconium oxide powders Surface & Coatings Technology.

Pub Date: 2019-12-04, DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125196

^{*} knagulin@mail.ru

^{**} nazarov.ramis@yandex.ru

^{***} fullaigul@gmail.com

^{****} albert.gilmutdinov@kai.ru

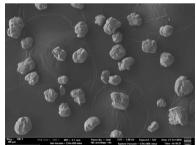
СИНТЕЗ СТРУКТУРНО-ГРАДИЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЕ

Нагулин К.Ю.^{1*}, Морозов М.В.^{1**}, Гайсина А.Р.^{1***}, Назаров Р.^{1****}, Гильмутдинов А.Х.^{1****}

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

Задача по напылению или нанесению металлических покрытий на керамические материалы является перспективным подходом к получению новых композиционных материалов. Для нанесения покрытий используются методы газодинамического напыления [1] и химического осаждения [2], а задача по обработке исходных порошковых материалов эффективно решается в индуктивносвязанной плазме (ИСП) [3]. При этом актуальной в связи с этим яляется проблема сочетания различных методов для достижения высокого качества покрытий и создание структурно-градиентных порошковых материалов.

Исходные порошки состава Al_2O_3 были сфероидизированы с помощью системы плазменной сфероидизации. Используемая система плазменной сфероидизации порошковых материалов состоит из лампового высокочастотного генератора частотой 5,2 МГц и мощностью до 60 кВт с блоком управления, двухконтурной системы водяного охлаждения, системы подачи газов и плазмохимического реактора. На рис. 1 представлены изборажения исходных и сфероидизированных порошков, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).



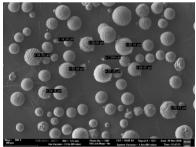
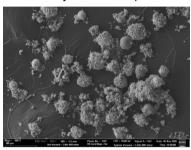


Рисунок 1. Исходные порошки до (слева) и после (справа) сфероидизации

Для синтеза структурно-градиентных порошковых материалов использовался химический метод [4]. Для проведения синтеза были

использованы реагенты хлорид никеля $NiCI_2 \cdot 6H_2O$, гидразингидрат $N_2H_4 \cdot H_2O$ (80% по массе). Реакция проводилась в водной среде. Колба с реакционной смесью помещалась в водный термостат при температуре термостатирования от 70 до 90 °C. В реакционной смеси осуществляется процесс восстановлением никелевой соли гидразингидратом. После окончания реакции на дне колбы образовывался металлизированный порошок AI_2O_3 черного цвета. Образовавшаяся структура промывалась дистиллированной водой. После высушивания порошок исследовался методом СЭМ (рис. 2).



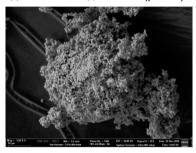


Рисунок 2. Синтезированные структурно-градиентные порошки с различным увеличением

Полученные результаты показывают, что никелевое покрытие получается на большинстве частиц порошка, при этом толщина покрытия составляет порядка 5 микрон. Поверхность покрытия является шероховатой, при этом при переноске покрытие сохраняет адгезию к порошку. Данные результаты получены на основе принципиально нового подхода, и полученные порошки могут быть использованы в 3D-печати.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации госконтракт № 075-03-2020-051 по теме № ФЗСУ-2020- 0020 и гранта РФФИ совместно с Академией наук Республики Татарстан (контракт № 18-42-160015).

- [1] П.С.Степанов, Д.Л. Кайгородов, В.П. Парначев, Н.В. Безуглова //Технология и материалы газодинамического напыления, Перспективные материалы и технологии в аэрокосмической отрасли / ОАО Научно-производственный центр «Полюс», «Решетневские чтения», 2011 г., с. 357-358
- [2] G.Wen, Z.X.Guo, C.K.L.Davies // Microstructural characterization of electroless-nickel coatings on zirconia powder, Scripta Materialia, London, February 14, 2000.
- [3] K. Nagulin, Ř. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov // Inductively Coupled Plasma Processing of Nickel Alloys Powders for

Additive Manufacturing, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 – 13, 2018; Loen (Norway).

[4] Морозов, М. В. Метод синтеза никелевых микро- и нановолоконных структур с развитой поверхностью [Текст] / М. В. Морозов, Г. А. Баталин, Б. И. Гареев, А. Х. Гильмутдинов // Нанотехника. — 2010. — № 3(23). — С. 29-34.

^{*} knagulin@mail.ru

^{**} misha617@mail.ru

^{***} fullaigul@gmail.com

^{****} nazarov.ramis@yandex.ru

^{*****} albert.gilmutdinov@kai.ru

ПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

Нагулин К.Ю.^{1*}, Назаров Р.^{1**}, Гайсина А.Р.^{1***}, Гильмутдинов А.Х.^{1****}

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

Основная масса титановых отходов образуется при переплаве губчатого титана в слитки, изготовлении полуфабрикатов и готовых изделий. Сложность использования отходов титановых сплавов обуславливается специфическими свойствами титана и, прежде всего, его способностью при нагреве до высоких температур активно впитывать кислород и азот из воздуха. Обработка титановых полуфабрикатов давлением и резанием связана с нагревом до высоких температур и, как следствие, с окислением поверхности металла.

Известно, что изготовление деталей сложной геометрической формы для авиа-, космо- промышленности трудоемкий процесс и имеет высокую финансовую составляющую. Ценообразование на титановые изделия зависит от качества и количества получаемого материала в результате обработки, в данном исследовании предлагается технология позволяющая применять отходы получаемого при обработки титановых изделий, таким образом снижая цену на изделие и не теряя качество изделия.

В качестве объектов исследования выступали: титановая стружка, полученная от Зеленодольского завод имени А.М.Горького.

В процессе исследования использовалась планетарная мельница с атмосферой размольной камеры – воздух. Помол проводился в два этапа:

- 1. Переработка длинной стружки в крупную сечку с размером частиц в несколько миллиметров.
- 2. Последовательный размол сечки до крупки нужного размера (менее 100 мкм) с последующим просевом.

Просев на сите 90 мкм, полученная крупка содержит частицы вытянутой формы с диаметром менее 90 мкм, такие частицы плохо сфероидизируются.

Для плазменной обработки порошковых материалов применяли лабораторную систему на основе радиочастотного (5,2 МГц) кварцевого плазматрона с мощностью до 40 кВт.

Для получения изображений частиц в сканирующем электронном микроскопе (SEM), а также для определения локального содержания химических элементов на их поверхности использовалась рабочая станция Auriga CrossBeam фирмы Carl Zeiss с приставкой для локального рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа INCA X-Max (Oxford, Великобритания). Для визуального наблюдения микрочастиц в оптическом диапазоне применяли микроскоп Axio Imager фирмы Carl Zeiss.

На рис.1 представлена сечка крупного первичного помола, которая далее проходит этап «сфероидизации».

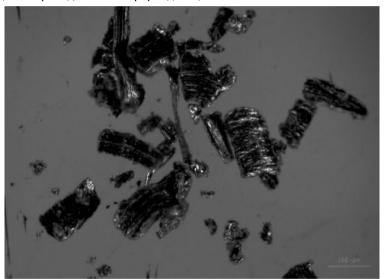


Рисунок 1. Сечка первого помола

Частицы сфероидизированного порошка запеченные в компаунд и ошлифованы, таким образом, что можно наблюдать частицы в сечении. Видно, что полученные частицы однородны и не имеют пор, что очень важно для порошков, используемых в лазерном аддитивном производстве.

В процессе плазменной обработки частицы порошка, пролетая через горячие зоны плазмы, расплавляются и под силами поверхностного натяжения принимают сферическую форму.

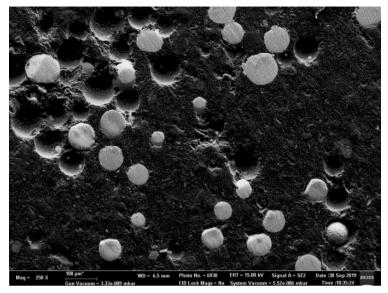


Рисунок 2. Сфероидизация крупки

Так как исходный порошок имеет иррегулярную форму, то в процессе сфероидизации отростки либо испаряются и осаждаются из газовой фазы, из-за градиента температур, на поверхность крупных частиц. Либо сливаются в одну крупную частицу или во множество мелких частиц.

Данный метод обработки металлических порошков перспективен, экономически-целесообразен, так как позволяет создавать новое исходное сырье из вторичного, тем самым снижая себестоимость готового изделия. И ко всему прочему активно развивать аддитивные технологии в металлургической промышленности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации госконтракт № 075-03-2020-051 по теме № ФЗСУ-2020- 0020 и гранта РФФИ совместно с Академией наук Республики Татарстан (контракт № 18-42-160015).

- [1] Horn, T. and Harrysson, O., Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, Sci. Progr., 2012, vol. 95, no. 3, pp. 255–282.
- [2] R. Vert, R. Pontone, R. Dolbec, L. Dionne, M.I. Boulos, Induction plasma technology applied to powder manufacturing: example of titanium-based materials, 22nd International Symposium on Plasma Chemistry July 5-10, 2015; Antwerp, Belgium.

- [3] K. Nagulin, R. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov, Inductively Coupled Plasma Processing Of Nickel Alloys Powders For Additive Manufacturing, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [4] K. Nagulin, R. Nazarov, O. Kudimov, R. Salikhov, A. Gilmutdinov, Plasmochemical Processing Of Powder Materials For Heat-Protective Coatings, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [5] M. Voronov, K. Nagulin, R. Nazarov, A. Gilmutdinov, Numerical Simulation Of The Powder Particles Behaviour In A Technoligical Icp, 9th Nordic Conference on Plasma Spectrochemistry June 10 13, 2018; Loen (Norway).
- [6] Pat. RU 2618287 Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. A method for laser product treatment (variants) and device for its implementation (variants), Application submission date: 04.08.2015, Published in bulletin No. 13, 05.03.2017.
- [7] Pat. RU 165178 Gilmutdinov A.Kh., Gorunov A.I. Device for casting of products from metals from metals and alloys, Application submission date: 04.07.2015, Published in bulletin No. 28: 10.10.2016.

^{*} knagulin@mail.ru

^{**} nazarov.ramis@yandex.ru

^{***} fullaigul@gmail.com

^{****} albert.gilmutdinov@kai.ru

К ПОИСКУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ КАТОДОМ.

Тазмеев Б.Х.^{1*}, Цыбулевский В.В.¹, Тазмеев Г.Х.²

¹Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия ²Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны. Россия

Введение. Разряды с жидким электролитным катодом продолжают представлять большой интерес с точки зрения практического применения и исследуются в широком диапазоне изменения физических и геометрических характеристик [1 - 4]. Плазма разряда с жидким катодом наиболее эффективно может быть применена для очистки, полировки, с одновременным удалением трещиноватого и рельефного слоев, упрочнения, газонасыщения, активации поверхности, улучшения механических и других характеристик деталей сельскохозяйственных машин. В данной работе для плазменной полировки были выбраны оси подшипниковых узлов дисковых борон.

Материалы и методы. В результате исследования взаимодействия разряда с образцами из высокоуглеродистой хромистой стали марки ШХ6 установлены базовые режимы полировки рабочей поверхности. Выявлено, что снижение шероховатости максимально при обработке с тепловыми потоками в интервале от 7,4·10³ Вт·м-² до 8,2·10³ Вт·м-².

В качестве функции отклика было выбрано значение исследуемого профиля с возможным среднеарифметическим отклонением $R_{\rm a}$. Независимыми факторами, существенно влияющими на шероховатость поверхности приняты: плотность теплового потока и межэлектродное расстояние.

Эксперимент. Для постановки двухфакторного эксперимента выбран симметричный композиционный план Вк [5, 6]. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице.

Уровни факторов выбраны таким образом, чтобы их оптимальные значения с учетом существующих ограничений, попали в центр интервала варьирования.

Переменные факторы	Кодированные обозначения,	Интервал варьирования,	Уровни факторов		
	Xi	Δ_{i}	+1	0	-1
Плотность теплового потока, Вт·м⁻²	X 1	0,4	8,2	7,8	7,4
Межэлектродное расстояние, мм	X 2	1	4	3	2

Таблица. Факторы, интервалы и уровни варьирования.

Кодирование факторов выполнена с использованием известной методики [5, 6]. Согласно этой методики построена функция отклика для двухфакторного эксперимента и получено уравнение регрессии в кодированном виде. Полученное уравнение регрессии было проверено по критерию Фишера на адекватность. Также была проверена гипотеза о статистической значимости полученных коэффициентов регрессии по t-критерию Стьюдента. В результате все коэффициенты регрессии оказались статистически значимы. Применением метода поиска экстремума функции определено, что точки экстремума поверхности отклика имеют координаты: $x_1 = -0.024$; $x_2 = -0.166$. Эти координаты были использованы для определения параметра оптимизации построения уравнения поверхности отклика в канонической форме. Коэффициенты канонического получились уравнения одинаковыми знаками. Это означает, что поверхность имеет форму параболоида вращения, а значение функции отклика является наименьшим и находится в точке с указанными выше координатами.

Расшифровка полученных результатов показала, что минимальная шероховатость поверхности будет при плотности теплового потока 7,79 Вт·м⁻² и межэлектродном расстоянии 2,83 мм.

Выводы. В результате постановки двухфакторного эксперимента по симметричному композиционному плану типа B_k определены оптимальные параметры процесса плазменной полировки поверхности.

- [1] Tazmeev K. K., Tazmeev B. K. Porous elements in plasma generators with a liquid electrolytic cathode // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. 2003. V. 76, № 4. P. 107-114.
- [2] Tazmeeva R. N., Tazmeev B. K. Development features of the plasma flow in the gas discharge with the liquid electrolyte cathode // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1328. P. 012074.

- [3] Tazmeev G. K., Tazmeeva R. N., Tazmeev B. K. Gas discharge between two liquid electrolyte electrodes // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1588. P. 012050.
- [4] Tazmeev K. K., Arslanov I. M., Tazmeev B. K., Tazmeev G. K. Formation of powerful plasma flow from substance of liquid electrolyte cathode // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1393. P. 012061.
- [5] Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.
- [6] Tarasenko B. F. et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020. V. 488. P. 012045.

^{*} tazmeevb@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Морозов М.В.¹*, Дробышев С.В.¹**, Газизулин А.Ф.¹***, Нагулин К.Ю.¹****, Гильмутдинов А.Х.¹****

¹КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

Никель широко используется как катализатор для процессов синтеза, генерации водорода и др. [1]. Известен метод получения никелевых структур с развитой поверхностью [2], однако для получения никелевых покрытий необходимы специальные методики для диагностики характеристик покрытий. К методикам диагностики данных покрытий предъявляется ряд требований: бесконтактность, широкий диапазон измерений (от нескольких мкм до нескольких см), высокое разрешение и высокое быстродействие. В связи с этим актуальным является разработка методик диагностики никелевых покрытий с развитой поверхностью.

Корреляционная микроскопия — это новая технология, позволяющая объединить в одном цикле исследование методами оптической и электронной микроскопии. В данном методе используется оптическая микроскопия для исследования крупноразмерных объектов, а затем выбранные участки рассматриваются на электронном микроскопе с высоким разрешением. Таким образом, совмещаются изображения, полученные на разных микроскопах [3].

В данной работе для исследования были выбраны порошки корунда с нанесенными никелевыми покрытиями. Изучалась однородность нанесения покрытия на порошки, и структура самого покрытия в зависимости от количества никеля на 1 грамм корунда (Рис. 1).

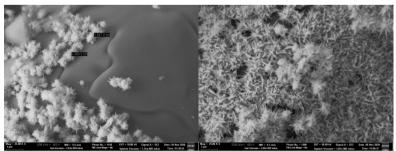


Рисунок 1. Структура покрытий в зависимости от массы никеля: слева – исходная концентрация, справа – увеличенная в 3 раза

Показано, что покрытие формируется из наношипованных субмикронных частиц, при этом структура покрытия существенно зависит от концентрации никеля, вносимого в реакционную смесь. При увеличении данной концентрации в три раза увеличивается как плотность покрытия, так и длина шипов. Снимки сканирующей электронной микроскопии позволяют продемонстрировать, что формируется развитое покрытие, которое существенно увеличивает площадь поверхности исходных порошков корунда.

Метод оптической микроскопии был использован для определения наличия покрытия на порошке и оценки однородности полученного покрытия с разрешением около 1 мкм. Данные оптической микроскопии затем дополнялись снимками сканирующей электронной микроскопии, при этом использовалась технология корреляционной микроскопии. Показано, что оптическая микроскопия позволяет эффективно оценивать однородность покрытия. Также она очень удобна для нахождения отдельных деталей в образце, например, для изучения начальных этапов синтеза, когда покрытие только начинает формироваться на отдельных частицах. Предложенный подход позволяет обеспечить широкий диапазон измерений (до нескольких см). разрешение (до 10 нм) и быстродействие.

Изображения сканирующей электронной микроскопии получены на оборудовании центра коллективного пользования "Прикладные нанотехнологии" КНИТУ-КАИ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-03-00345.

- [1] G.Wen, Z.X.Guo, C.K.L.Davies // Microstructural characterization of electroless-nickel coatings on zirconia powder, Scripta Materialia, 2000, № 43, P. 307-311.
- [2] М. В. Морозов, Г. А. Баталин, Б. И. Гареев, А. Х. Гильмутдинов // Метод синтеза никелевых микро- и нановолоконных структур с развитой поверхностью, Нанотехника, 2010, № 3(23), С. 29-34.
- [3] А.С. Гончаров, М.С. Ковалев, А.Б. Соломашенко, А.С. Кузнецов // Исследование параметров микрооптических и дифракционных элементов с помощью технологии корреляционной микроскопии SHUTTLE AND FIND, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2012, С. 151-157.

^{*} misha617@mail.ru

^{**} warlordik 009@mail.ru

^{***} g.azatka ak 47@mail.ru

^{****} knagulin@mail.ru

^{*****} albert.gilmutdinov@kai.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ПРОДОЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВДУВОМ ГАЗА ЧЕРЕЗ БОКОВУЮ СТЕНКУ

Галеев И.Г.^{1*}, Асадуллин Т.Я.¹, Цыбиков Р.О.¹

¹КНИТУ-КАИ. Казань. Россия

Низкотемпературная плазма имеет большие перспективы для получения наноматериалов и повышения эффективности получения. В [1-5] она используется для создания углеродных, германиевых, кремниевых нанотрубок, наноалмазов, фуллеренов. В [6,7] для создания нанопродуктов использована наложением внешнего магнитного поля, в [8] исследованы микро разряды, создаваемые в жидких углеводородах для проведения плазмохимических процессов, в [9] проведены исследования разряда с жидким катодом. Очень важное значение имеет теоретические моделирования плазмы, проведенные например в [10,11]. Для производства наноматериалов может применяться как равновесная плазма дугового разряда, так и сильнонеравновесная плазма тлеющего разряда. Сильная неравновесность плазмы тлеющего разряда открывает новые перспективы ее использования в производстве наноматерилов и в ппазмохимических процессах. Часто при этом возникает необходимость поддержания устойчивого объемного тлеющего разряда [12-14]. Одним из способов стабилизации разряда является прокачка газа через разрядную область [15].

В данной работе рассматриваются характеристики положительного столба продольного тлеющего разряда с несимметричным дополнительным вдувом газа через боковую стенку. Принятая система уравнений может быть представлена в виде

$$\begin{split} & c_a \frac{\partial^2}{\partial y^2} \alpha - N W_x \frac{\partial \alpha}{\partial x} - N W_y \frac{\partial \alpha}{\partial y} + v_i N \alpha = 0, \\ & I = e \mu_e b_z E \int\limits_{-b}^{b} \alpha dy, \\ & \frac{\partial}{\partial x} N W_x + \frac{\partial}{\partial y} N W_y = 0, \\ & G = m b_z \int\limits_{-b}^{b} N W_x dy. \end{split}$$

Вдув дополнительного газа через боковую стенку приводит к

ускорению потока. Поэтому предположим, что в первом приближении плотность массового расхода газа линейно изменяется вдоль канала по закону $mNW_x = (mNW_x)_0$ (1+к $_w\widetilde{x}$), тогда из последних двух уравнений системы можно получить

$$NW_x = \frac{G_0}{2mbb_z} (1 + \kappa_w \widetilde{x}), \ NW_y = -\frac{G_0}{2mbb_z} \kappa_w (1 + \widetilde{y}),$$
 где $\widetilde{x} = \frac{x}{b_0}, \ \widetilde{y} = \frac{y}{b_0}.$

Начало системы координат выбрано в центре начального поперечного сечения разрядной камеры, координаты $\widetilde{y}=\pm 1$ соответствуют внутренним поверхностям стенок канала. Уравнение для степени ионизации газа в безразмерном виде может быть представлено

$$\frac{1}{Pe_d} \frac{\partial^2 \widetilde{\alpha}}{\partial \widetilde{y}^2} - \left(1 + \kappa_w \widetilde{x}\right) \frac{\partial \widetilde{\alpha}}{\partial \widetilde{x}} + \kappa_w \left(1 + \widetilde{y}\right) \frac{\partial \widetilde{\alpha}}{\partial \widetilde{y}} + Po_i \widetilde{E}^2 \widetilde{\alpha} = 0,$$

 $Pe_d = \frac{g_0 b}{c_a m}, g_0 = \frac{G_0}{2bb_z}, Po_i = \frac{c_v m E^2(0)b}{g_0}.$

где $\widetilde{\alpha} = \alpha / \alpha(0,0); \ \widetilde{E} = E/E(0);$

Решение этого уравнения может быть записано в виде

$$\widetilde{\alpha} = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \widetilde{\varphi}_{\text{cir}} \left(1 + \kappa_w \right)^{\frac{J_{\kappa}}{Pe_{\ell} \mu_w}} \exp \Bigg[Po_i \int\limits_0^{\widetilde{\lambda}} \frac{\widetilde{E}^2 d\widetilde{x}}{\left(1 + \kappa_w \widetilde{x} \right)} \Bigg] (1 + \widetilde{y}) F_m (\widetilde{y})$$
 где
$$f = F \Bigg(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{2Pe_d \kappa_w}, \frac{3}{2}, -\frac{Pe_d \kappa_w}{2} (1 + \widetilde{y})^2 \Bigg)^{-}$$
 вырожденная

гипергеометрическая функция [14].

Постоянные $\phi_{\alpha\kappa}$, есть коэффициенты разложения функции ϕ_{α} , определяющей степлень ионизации газа в начальном сечении \widetilde{x} = 0, по функциям (1 + \widetilde{y}) $F_{m}(\widetilde{y}$). Они даются выражениями

$$\widetilde{\varphi}_{\alpha\kappa} = \frac{\int_{-1}^{1} \widetilde{\varphi}_{\alpha}(\widetilde{y}) \exp\left[\frac{Pe_{d}K_{\kappa w}}{2}(1+\widetilde{y})\right] (1+\widetilde{y})F_{m}(\widetilde{y})d\widetilde{y}}{\int_{-1}^{1} \exp\left[\frac{Pe_{d}K_{w}}{2}(1+\widetilde{y})\right] (1+\widetilde{y})^{2}F_{m}^{2}(\widetilde{y})d\widetilde{y}}.$$

С учетом граничного условия $\widetilde{E} = 1$ при $\widetilde{x} = 0$ окончательное выражение для напряженности электрического поля имеет вид

$$\widetilde{E} = \left\{ \Phi^{2}(\widetilde{x}) \left[2Po_{i} \int_{0}^{\widetilde{x}} \frac{d\widetilde{x}}{(1 + \kappa_{w}\widetilde{x})\Phi^{2}(\widetilde{x})} + \frac{1}{\Phi^{2}(0)} \right] \right\}^{-0.5}.$$

где

$$\Phi(\widetilde{x}) = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \widetilde{\varphi}_{\alpha\kappa} (1 + \kappa_{w} \widetilde{x})^{\frac{\lambda_{\kappa}}{Pe_{q}k_{w}}} \int_{-1}^{1} (1 + \widetilde{y}) F_{m}(\widetilde{y}) d\widetilde{y}.$$

Выражение для степени ионизации газа можно упростить,

используя соотношение для полного тока в начальном сечении

$$I = e\mu_e b_z bE(0)\alpha(0,0) \int_{-1}^{1} \widetilde{\varphi}_{\alpha} d\widetilde{y}$$

и получить

$$\widetilde{\alpha} = \frac{\int_{-1}^{1} \widetilde{\varphi}_{\alpha} d\widetilde{y}}{E(\widetilde{x}) \Phi(\widetilde{x})} \sum_{m=1}^{\infty} \widetilde{\varphi}_{\alpha \kappa} (1 + \kappa_{w} \widetilde{x})^{\frac{\lambda_{\kappa}}{h_{w} P_{ed}}} (1 + \widetilde{y}) F_{\kappa} (\widetilde{y}).$$

В случае задания граничного условия в виде

$$\widetilde{\varphi}_{\alpha} = \left(1 + \widetilde{y}\right) \frac{F_1(\widetilde{y})}{F_1(0)} = \frac{\left(1 + \widetilde{y}\right)}{F_1(0)} F\left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_1}{2Pe_d \kappa_w}, \frac{3}{2}, -\frac{Pe_d \kappa_w}{2} \left(1 + \widetilde{y}\right)^2\right)$$

выражения для напряженности электрического поля и степени ионизации газа можно записать в виде

$$\begin{split} \widetilde{E} &= \left\{ \frac{Po_{i}Pe_{d}}{\lambda_{1}} + \left(1 - \frac{Po_{i}Pe_{d}}{\lambda_{1}}\right) \left(1 + \kappa_{w}\widetilde{x}\right)^{\frac{2\lambda_{1}}{\kappa_{y}Pe_{d}}} \right\}^{-0.5}, \\ \widetilde{\alpha} &= \frac{1}{E(\widetilde{x})} \frac{\left(1 + \widetilde{y}\right)}{F_{1}(0)} F\left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_{1}}{2Pe_{d}\kappa_{w}}, \frac{3}{2}, -\frac{Pe_{d}\kappa_{w}}{2} \left(1 + \widetilde{y}\right)^{2}\right) \end{split}$$

Расчеты по приведенным формулам показывают, что с увеличением вдува газа (т.е. с увеличением параметра $\kappa_{\rm w}$) максимум степени ионизации газа смещается к противоположной стенке разрядной камеры.

Таким образом, поперечно-продольный поток позволяет управлять пространственным распределением характеристик разряда. Поперечный поток смещает разряд к противоположной стенке, что особенно важно при технологических процессах плазменной обработки и очистки деталей с расположением их на этой стенке.

- [1] Timerkaev B.A., GR Ganieva, AA Kaleeva, ZK Israfilov, AO Sofronitskii. Growing of Carbon Nanotubes from Hydrocarbons in an Arc Plasma. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 92(5), 1248-1252, 2019. DOI 0.1007/s10891-019-02040-3
- [2] B. A. Timerkaev, A. A. Kaleeva, D. B. Timerkaeva, and A. I. Saifutdinov. Synthesizing Germanium Nanotubes in an Electric Arc Plasma. *Russian Journal of Physical Chemistry A, 2020, Vol. 94, No. 3*, pp. 613–617.
- [3] B. A. Timerkaev, A A Andreeva Technology of growing silicon nanotubes Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012071 doi:10.1088/1742-6596/1058/1/012071
- [4] Timerkaev B.A., AA Kaleeva, DB Timerkaeva, Al Saifutdinov Germanium Catalyst for Plasma-Chemical Synthesis of Diamonds. High Energy Chemistry 53 (5), 390-395. 2019.

- [5] Galeev I G and Asadullin T Ya 2016 Obtaining fullerene-containing soot during combustion of gaseous hydrocarbons in an external electric field J. of Phys. Conf. Ser. 669 012016
- [6] B. A. Timerkaev, A A Andreeva and A O Sofronitskiy1 Discharge creeping along the surface in the process for producing nanomaterials Journal of Physics: Conf. Series (2017) 012068 DOI: 10.1088/1742-6596/927/1/012068
- [7] Asadullin T Y, Galeev I G 2017 The magnetic field application for the gas discharge plasma control in processes of surface coating and modification J. of Phys. Conf. Ser. 789(1) 012003
- [8] 3. В. А. Timerkaev, Ganieva G.R., Ziganchin D.I., Auhadeev М.МЭлектрические микроразряды в жидкостях и перспективы их применения в плазмохимии Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 87, No.3, 2014.
- [9] 4. G. Kh. Tazmeev, Kh. K. Tazmeev, Study of a DC Gas Discharge with a Copper Cathode in a Water Flow. 2017, Vol. 43, Plasma Physics Reports, No. 7, pp. 756–762.
- [10] A.I. Saifutdinov, B. A. Timerkaev, A.A. Saifutdinov. Numerical Study of the Voltage Waveform Effect on the Spatiotemporal Characteristics of a Dielectric Barrier Microdischarge in Argon Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 3, pp. 359–368.
- [11] Saifutdinov A.I., Timerkaev B.A., Ibragimov A.R. Numerical Simulation of Temperature Fields in a Direct-Current Plasmatron Technical Physics Letters. 2018. V. 44, No. 2. P. 164–166. IF: 0.773; Q4; https://doi.org/10.1134/S1063785018020281
- [12] Asadullin T Y and Galeev I G 2017 Combined method of stabilization of the glow discharge in gas flow J. of Phys. Conf. Ser. 927(1) 012003
- [13] Galeev I G, Asadullin T Y 2017 Improving of stability of the volumetric glow discharge in the gas flow J. of Phys. Conf. Ser. 789(1) 012012
- [14] Galeev I G, Asadullin T Y 2016 Enhancing of the glow discharge stability in chamber with cathode sections coated by a discontinuous dielectric coating J. of Phys. Conf. Ser. 669(1), 012015.
- [15] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. 3-е изд. перераб. и доп. /Ю.П. Райзер Изд-во: Интеллект, 2009, 736 с.
- [16] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. -832 с.

^{*} galeev.physics@kstu-kai.ru

ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Калеева А.А.^{1*}, Даутов И.Г.^{1**}, Сорокина А.Р.^{1***}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Для улучшения свойств поверхностей материалов используется технология термического напыления. Среди различных методов наиболее широко используется атмосферное плазменное напыление. В качестве исходного материала для напыления используются металлы, металлокерамика и керамика, наиболее используют- Al_2O_3 и Порошки. TiO₂. которые агломерированную и синтетическую морфологию очень интересны с прикладной точки зрения [1,2]. Покрытия на основе чистого глинозема применяются для улучшения износостойкости и коррозии против химических реагентов [4]. Добавление TiO₂ снижает температуру плавления такого соединения, что приводит к снижению пористости изготавливаемых покрытий. Эти покрытия также характеризуются более высокой трещиностойкостью [3].. Как правило, наиболее частыми смесями для напыления являются: Al₂O₃ + 3 мас.% TiO₂, Al₂O₃ + 13 мас.% TiO₂ и Al₂O₃ + 40 мас.% TiO₂ [4].

В данной работе представлены результаты исследования покрытий, полученных плазменным напылением смеси TiO₂ с небольшими добавками Al₂O₃ (размерами частиц у обоих порошков≤ 100 мкм). Полученную в ходе проведенных экспериментов поверхность и поперечный срез исследовали на сканирующем электронном микроскопе "EVO 50 XVP" (Carl Zeiss) в сочетании с системой зондового микроанализа "INCA Energy – 350" (Oxford Instruments).

Элемен	Macc. %	Атом.%
T		
CK	10.94	21.21
OK	31.69	46.12
Na K	0.73	0.74
Mg K	5.15	4.93
AlK	1.08	0.93
Si K	4.29	3.56
CI K	0.28	0.18
Ca K	0.49	0.28
Ti K	45.35	22.04

Таблица 1. Исследование напыленного покрытия TiO_x+ Al₂O₃

Полученные данные подтверждают, что при плазменном напылении порошков TiO₂ происходит проникновение активных металлов в плазменное покрытие. Соотношение атомных % титана и кислорода позволяют сделать вывод о преобладании рутила в материале покрытия. Оценка толщины напыленного слоя производилась с помощью снимков под разными углами.

В результате проведения ряда экспериментов с напылением при выбранных режимах выявлены изменения приповерхностного слоя материала подложки, влияющие на его когезионную прочность.

- [1]. Pawłowski L., The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, 2nd ed., Wiley; Chichester, 2008, ISBN 978-0-471-49049-4.
- [2]. Maruszczyk A., Dudek A., Szala M., Into Morphology and Properties TiO₂ NiAl Atmospheric Plasma Sprayed Coating. Adv. Sci. Technol. Res. J., 2017, Vol. 11(3), 204–210.
- [3]. A. A. Kaleeva, I. G. Dautov, N. F. Kashapov, S. V. Drobyshev, Research of plasma impact on migration of silicon in ceramic substrates prepared on the basis of MgO, Journal of Physics: Conference Series. 2019, 1328(1),012030
- [4]. Szala M., Hejwowski T., Erosion Resistance and Wear Mechanism Model of Flame-Sprayed Al₂O₃-40%TiO₂/NiMoAl Cermet Coatings. Coatings, 2018, Vol. 8(7), 254

^{*} andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

^{**} dautow.ildar2014@yandex.ru

^{***} adelia-k@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ В ПРОТЯЖЕННОМ РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

Тазмеев X.К.1*, Тазмеев A.X.1

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия

Введение. Газовые разряды с жидким электролитным катодом позволяют получить объемную плазму при атмосферном давлении [1]. Такая плазма перспективна для использования в различных плазмохимических процессах. Однако механизмы формирования объемного плазменного столба над электролитным катодом остаются мало изученными. В связи с этим целью данной работы явилось получение газового разряда с жидким электролитным катодом в протяженном разрядном промежутке и исследование его свойств.

Эксперимент. Экспериментальные исследования проведены в диапазоне токов 2-5 А. В качестве электролита использованы растворы хлорида натрия в дистиллированной воде, удельная электрическая проводимость о которых находилась в пределах 7-16 мСм/см. На рис. 1 приведена схема газоразрядного узла.

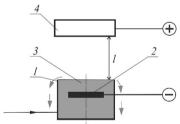


Рисунок 1. Газоразрядный узел. 1 – выходной канал, 2 – токоподвод, 3 – электролит, 4 – анод.

В опытах использовались два источника питания: 1) трехфазный двухполупериодный выпрямитель с емкостно-индуктивным фильтром; 2) инверторные блоки типа ГОРН. Высокочастотные преобразователи инверторных блоков создают значительные помехи в работе электронных измерительных приборов. С другой стороны, такие источники позволяют поддерживать заданное значение тока с большой точностью. При видеосъемке и осциллографических исследованиях электрическое питание подавалось от выпрямителя.

Изучение свойств разряда при фиксированных значениях тока осуществлялось с помощью инверторных блоков ГОРН.

Результаты экспериментов. Одна из особенностей газового разряда была зарегистрирована при высокоскоростной визуализации. Существуют режимы горения с однородным (рис.2а) и неоднородным (рис.2б) плазменным столбом.

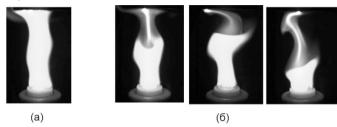


Рисунок 2. Мгновенные фото разряда. Экспозиция 0,2 мс. σ = 10 мСм/см. а - I = 16 см; б – 17.

На рис.3 представлены осциллограммы, соответствующие этим двум режимам горения. Нарушение однородности плазменного столба сопровождается усилением пульсаций тока и напряжения.

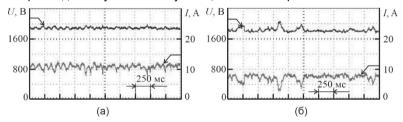


Рисунок 3. Осциллограммы тока и напряжения.

В экспериментах методом изменения межэлектродного расстояния I определялась напряженность электрического поля. Установлено, что она повышается при увеличении I. По-видимому, такая закономерность обусловлена изменением концентрации ионов натрия в разрядной области. Использование водного раствора с бо́льшей σ приводит к явному увеличению концентрации ионов натрия. В таком варианте происходило уменьшение напряженности электрического поля. Она уменьшалась также при увеличении тока.

Литература:

[1] Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 33-37.

^{*} tazmeevh@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ МИКРОДУГОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

Сайфутдинов А.И.¹*, Сорокина А.Р., Абдуллин А., Тимеркаев Б.А.

КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

В последние годы плазменные технологии нашли широкое применение в синтезе наноструктур. В зарубежной литературе введен новый термин «плазменная нанонаука» nanoscience). Хотя ее область в настоящее время значительно шире, но зарождалась она именно как междисциплинарная область, находящая на стыке физики плазмы и газового разряда, нанотехнологий нанонауки, физики поверхности, и материаловедения и структурной химии, посвященная различных аспектам плазменного синтеза наноструктур с необходимыми на практике геометрическими, механическими и физико-химическими свойствами. Газовые разряды при высоких давлениях (от 100 Торр и выше) при этом являются привлекательными. для синтеза различных типов нанокристаллов. Это связано с тем. неравновесная низкотемпературная плазма атмосферного давления сочетает в себе плюсы трех основных факторов, необходимых для синтеза нанокристталов: сравнительно высокое давление, высокая реакционная способность молекул условиях сравнительно низкая температура газа. Необходимо отметить возросший интерес к синтезу нанокристаллов 4 группы таблицы Менделеева, это наноалмазы, и нанокристаллы кремния и германия.

Нанокристаллы германия привлекают к себе все большее внимание экологически безопасные альтернативы классическим составным полупроводниковым нанокристаллам, поскольку они биосовместимы, электрохимически стабильны нетоксичны. совместимы с современной микроэлектроникой. Нанокристаллы германия могут использоваться в фотоприемниках площадей, которые обеспечивают им высокую производительность. применяют нанокристаллы системах памяти также позволяющие увеличивать срок службы и срок хранения устройства памяти до 104 циклов. Наночастицы Ge также обладают многими полезными оптическими свойствами, такими как высокая яркость и хорошая фотостабильность. Германий также является отличным кандидатом на использование в качестве анодного материала в литий-ионных батареях благодаря его хорошей электрической быстрой диффузии ионов лития проводимости. И теоретической удельной емкости. Поэтому поиск новых методов, позволяющих синтезировать нанокристаллы германия дешево, быстро и в промышленных масштабах, чрезвычайно актуален. В связи с вышесказанным целью работы было проведение численных экспериментов по исследованию микродуговых разрядов в задачах синтеза нанокристаллов германия. Для решения поставленной цели необходимо провести самосогласованный расчет, включающий описание основных параметров электрического разряда, учитывающий нагрев газа и описание температурного поля в металлических электродах. Для этого расчетная область разбивалась пат подобласти: металлический на катод. межэлектродное пространство. металлический анод. межэлектродной области решались уравнения. описывающие газоразрядную плазму, а в областях катода и анода – уравнение теплового баланса. При этом на границе между электрическим разрядом и электродами, задавались соответствующие граничные условия, описывающие механизмы нагрева поверхности электродов за счет процессов, происходящих в электрическом разряде.

Модель основана на системе уравнений Навье-Стокса, которая включает в себя уравнение неразрывности, уравнения движения и уравнение переноса тепла в дуге, дополненной системой уравнений для электрического И магнитного дифференциального закона Ома, а также уравнениями теплового баланса для металлических катода и анода и протекания тока в них Расчетная область предполагалась двумерной цилиндрической симметрией. Катод в виде цилиндрического стержня с плоским торцом предполагался вольфрамовым, анод был выполнен из германия в виде цилиндрического стержня с заостренным концом. Граничные условия для сформулированных уравнений приведены в [1]. Рассмотрим более подробно условия на границах раздела между дуговой плазмой и электродами.

Вдоль границы дуговая плазма-катод нормальный разрыв теплового потока выражается следующим образом: учитывается перенос тепла из дуги на катод, нагрев за счет потока ионов, охлаждение за счет выхода электронов

благодаря термоэлектронной эмиссии, охлаждение за счет излучения твердого тела, определяемого по закону Стефана-Больцмана:

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda_c \nabla T_c) = -\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) + |J_{ion}| \varphi_i - |J_{elec}| \varphi_c - \varepsilon \sigma_B T^4, \tag{1}$$

$$J_{elec} = \begin{cases} j_{th}, & \left(\left| \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \right| - j_{th} \right) > 0, \\ \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}, & \left(\left| \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \right| - j_{th} \right) < 0, \end{cases} \quad j_{th} = AT^{2} \exp\left(\frac{-\varphi_{e}}{k_{B}T_{c}} \right), \quad J_{ion} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} - j_{e},$$
 (2)

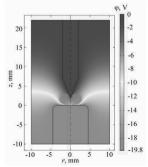
2. На границе между дуговой плазмой и анодом ставится следующее условие:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\lambda_a \nabla T_a\right) = -\mathbf{n} \cdot \left(-k \nabla T\right) + \left|\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}\right| \varphi_a - \varepsilon \sigma_B T^4 - \dot{m} L_v \tag{3}$$

$$\dot{m} = p_{sat}(T_c) \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}, \ p_{sat}(T_c) = p_0 \exp\left(\frac{ML_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T}\right)\right),$$
 (4)

Оно показывает, что нормальный поток тепла на анод включает поток тепла за счет теплопроводности из плазмы, поток тепла за счет бомбардировки электронами и охлаждение за счет излучения твердого тела, а также за счет испарения материала анода.

Численные эксперименты были проведены для дугового разряда в аргоне при давлении 500Торр. Межэлектродное расстояние между вольфрамовым катодом и германиевым анодом предполагалось равным 2 мм. В результате численных экспериментов были получены основные пространственные распределения все параметров дугового разряда. Так на рис.2 представлено распределение потенциала электрического поля. Видно что падение потенциала между электродами составляет практически 20В, что дуговых Ha рис.2.3 типично для разрядов. представлены пространственные распределения температурных полей в дуговом разряде как непосредственно в плазмообразующем газе аргоне, так и в электродах. На рис. 3 представлены осевые распределения температуры в электродах. Так видно, что в катоде максимальная температура достигает 1900 К и резко спадает на длине 3 мм в сторону охлаждаемой поверхности до 600К. На поверхности анода температура достигает 2900К, что свидетельствует о том, что поверхность германия расплавлена, то есть наблюдается фазовый переход, который наблюдается на рис. 2.5 в виде слабого прогиба на распределении температуры. Видно, что проплавления германиевого анода зависит от разрядного тока и изменяется от 0.19 до 0.32 мм для токов 10 и 25А, соответственно.



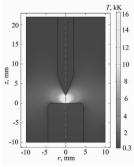


Рисунок 2. Пространственное распределение потенциала (слева) и температурных полей (справа) при разрядном токе 25 A.

Таким образом, распределение температуры в германиевом аноде свидетельствует о том, что в реальных экспериментах должно наблюдаться интенсивное испарение германия и его вынос из разрядной зоны, о чем свидетельствует увеличение давления до 576 Торр при 25 А в области дугового разряда и возникновение конвективной скорости, величина которой достигает 25 м/с в ядре дуги. В результате численных экспериментов были получены все основные пространственные распределения параметров дугового разряда. Продемонстрировано, что температура поверхности германиевого анода превышает температуру плавления, свидетельствует об испарении материала анода в область Кроме низкотемпературно плазмы дугового разряда. того увеличение давления в ядре дуги и возникновение конвективной скорости свидетельствует о том, что испаренный материал анода германий будет интенсивно выносится из ядра дуги в области с испаренный температурой. где германий кристаллизовываться формироваться самым будут тем наноструктуры.

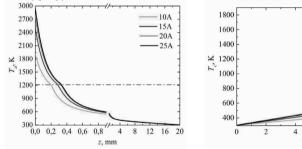


Рисунок 3. Распределение температуры вдоль оси анода – германия (слева) и катода – вольфрама (справа) для различных значений разрядного тока.

10A

15A

20A

Таким образом, сформулированная проведенные модель расчеты являются численные **V**ДОБНЫМ инструментом. позволяющим интерпретировать реальные эксперименты пронозировать синтез и рост наноструктур в плазменных реакторах на основе дугового разряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-43-160005.

Литература:

[1] Saifutdinov, A.I., Timerkaev, B.A. & Ibragimov, A.R. Numerical Simulation of Temperature Fields in a Direct-Current Plasma Torch. Tech. Phys. Lett. 44, 164–166 (2018).

^{*} as.uav@bk.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ СВЧ-РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУР.

Напалков О.Г.^{1*}, Сайфутдинов А.И.^{1*}, Тимеркаев Б.А.^{1*}

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

В последние годы плазменные технологии нашли широкое применение в синтезе наноструктур. В зарубежной литературе введен новый термин «плазменная нанонаука» (plasma nanoscience) - междисциплинарная область, находящая на стыке физики плазмы и газового разряда, нанотехнологий и нанонауки, физики поверхности, материаловедения и структурной химии, посвященная различных аспектам плазменного синтеза наноструктур с необходимыми на практике геометрическими, механическими и физико-химическими свойствами. Газовые разряды при высоких давлениях при этом являются привлекательными. для синтеза различных типов наноструктур. Это связано с тем, что низкотемпературная плазма атмосферного давления сочетает в себе ппюсы трех основных факторов. необходимых для наноструктур: высокое давление, высокая реакционная способность молекул в условиях плазмы, сравнительно низкая температура газа. Необходимо отметить, что экспериментальная диагностика параметров плазмы в процессе синтеза наноструктур является сложной задачей. В связи с этим в работе сформулирована физико-математическая модель. описывающая параметры плазмы СВЧ-разряда на поверхностной воле в трубке в потоке смеси аргон/этанол при атмосферном давлении. Модель основана на расширенном гидродинамическом описании плазмы, дополненной уравнением теплового баланса, а также системой уравнений Навье-Стокса. Поддержание разряда описывалось с помощью уравнений Максвелла для СВЧ электромагнитной волны. Для описания кинетики смеси аргон/этанол использовались данные из работ [1,2]. предварительные Были проведены численные расчеты, позволившие описать динамику формирования микроволновой плазмы в смеси аргон/этанол при атмосферном давлении при вкладываемой мощности 0.9 кВт для СВЧ-волны частотой 2.45 ГГц.

Работа поддержана грантом Президента РФ для молодых ученых MK-272.2019.1.

- [1] Tsyganov, D., Bundaleska, N., Tatarova, et all. Plasma Sources Science and Technology, 25(1), 015013. (2015).
- [2] Saifutdinov A. I., Saifutdinova A. A., and Timerkaev B. A. Plasma Physics Reports, 4, 351–360, (2018)

^{**} as.uav@bk.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО

Закиров Д.У.1*, Каюмов Р.Р.1**, Хазеев Х.И.1***

¹КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

В настоящее время использование композитных материалов охватило многие отрасли такие как: медицина, строительство. авиация. атомная промышленность. судостроение. ветроэнергетика, железнодорожная отрасль, товары народного потребления и т.д. В связи с широкой областью применения композитного материала большой интерес вызывает к получению таких материалов с заданными физико-химическими свойствами. Композитные материалы в основе которых лежат полимерные связующие армированных углеродными волокнами имеют в своем роде уникальные комплексные технические ценные свойства. Например, низкое относительное удлинение при деформации, химическая и термическая стойкость, высокие показатели удельной прочности, высокая электропроводность и множество других ценных свойств. Одним из важных параметров является адгезия углеродного волокна, которая влияет на прочность углепластика. Для повышения свойств адгезии используются различные методики: термохимические. плазменный и д.р. Рассмотрим термохимический метод, он имеет ряд недостатков, таких как высокая стоимость, плохая воспроизводимось результатов.

Перспективным методом является плазменный метод обработки углеродного волокна. В процессе обработки в волокон данного типа происходит увеличение адгезии к полимерному связующему и увеличение прочности композитного материала[1-3].

На базе, созданной установке, проводились экспериментальные исследования электрического разряда между струйным электролитическим катодом и жидким анодом в диапазоне напряжения $U=0.2\div1.3$ кВ, тока разряда $I=0.03\div1.8$ А, расхода электролита $G=1\div5$ г/с, диаметра струи электролита $d_c=3$ мм, скорости струи $u=0.20\div0.90$ м/с и длин струи электролита $I_c=15\div60$ мм для раствора NaCl в технической воде.

Анализ экспериментальных данных показал, что между струйным электролитическим катодом и электролитическим анодом горит электрический разряд, который воздействует на углеродные волокна.

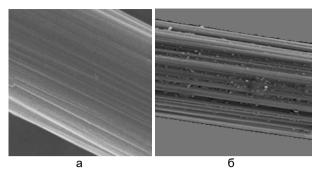


Рисунок 1.На фотографии приведены поверхности углеродных волокон увеличенные в 10 000 раз.

На снимках рис.1. (а) показано углеродное волокно до обработки и имеет ровную структуру с небольшой степенью шероховатости. После обработки углеродного волокна электрическим разрядом в диапазоне параметров: при I= 0,56 A, U= 218 B, время обработки t=20сек.. при длине струи электролита 25мм в насыщенном растворе NaCl в технической воде происходит изменение поверхности углеродного волокна рис.1 (б). Из сравнения снимков следует, что в результате обработки электрическим разрядом между струйным электролитическим катодом и электролитическим анодом при атмосферном давлении, происходит изменение поверхности углеродного волокна. что значительно влияет на свойств адгезии. Таким образом. повышения результаты свидетельствуют о том, что плазменная обработка углеродных волокон является перспективным методом для управления поверхностной структурой и адгезионными свойствами.

- [1] Гайнутдинов Р.Ф. К вопросу применения низкотемпературной плазмы для обработки текстильных материалов/ Гайнутдинов Р.Ф., Гайсин Аз.Ф.//Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 2. С. 72–73.
- [2] Ахатов М.Ф. Исследование электрического разряда в растворе аммиачной селитры / М.Ф. Ахатов, А.Ф. Гайсин, Р.Р. Каюмов, И.И. Гилимзянов // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 5. С. 23—24.
- [3] Галимзянов И.И. Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом / И.И. Галимзянов, А.Ф. Гайсин, И.Т. Фахрутдинова и др. // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 306.

^{*}DUZakirov@kai.ru

^{**} rushan 250189033@mail.ru

^{***} hakimiwe@gmail.com

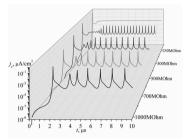
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НЕРАВНОВЕСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Сайфутдинова А.А.¹*, Сайфутдинов А.И.¹**, Гайнуллина С.В.¹***, Тимеркаев Б.А.²***

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н. Туполева, Казань, Россия

Разработка генераторов неравновесной низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении всегда представляла большой интерес для науки и техники, поскольку новые источники позволяют реализовать новые режимы неравновесной плазмы, которые в свою очередь открывают новые возможности в ее использовании. В частности, источники неравновесной плазмы на основе коронного и разрядов последние барьерного годы находят широкое применение в таких областях как медицина, биотехнология, нанотехнология, экология и в ряде смежных наук. Представленная работа посвящена проведению численных экспериментов по исследованию характеристик и режимов горения отрицательной короны в аргоне при атмосферном давлении.

Для моделирования коронного разряда атмосферного давления в аргоне была рассмотрена конфигурация электродов «остриеплоскость», подобная работе [1]. Межэлектродное расстояние варьировалось от 1 до 5,0 мм, радиус кривизны острия составлял 30 мкм. Ширина расчетной области - 1 мм. Электроды соединены с внешней цепью. Внешняя цепь содержит последовательно соединенное сопротивление R_b для контроля тока разряда. В расчетах напряжение питания V₀ фиксируется на уровне -2.0 кВ. Сопротивление балласта R_b варьируется от 10 МОм до 1000 МОм. В результате моделирования были обнаружены два основных режима отрицательной короны в аргоне атмосферного давления импульсно-периодический и тлеющий. Так на рис.1 представлены временные зависимости плотности электронного тока и значение потенциала на острие коронирующего электрода. Как видно из приведенных графиков в случае вкладывания достаточно малой (случай использования мощности В разряд балластных сопротивлений больше 250МОм) наблюдаются импульсы плотности тока периодический характер падения напряжения межэлектродном промежутке. При увеличении вкладываемой мощности (уменьшении балластного сопротивления) наблюдается режим, аналогичный тлеющему - с постоянными значениями плотности тока и падения напряжение (случай использования балластного сопротивления 250М и меньше на рис.1).



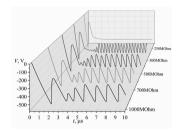


Рисунок 1. Временная эволюция плотности тока на острие катода (слева) и эволюция падения напряжения на разрядном промежутке (справа) в коронном разряде для различных значений вкладываемой мощности в разряд.

В импульсно-периодическом режиме коронного разряда длительность импульсов тока составляет порядка 0.15-0.2 мкс. Время между импульсами плотности тока зависит от вкладываемой мощности в разряд и изменяется от 1.5 до 0.4 мкс при ее увеличении. При этом амплитуда колебаний с увеличением мощности, вкладываемой в разряд, уменьшается.

Для различных точек на импульсе плотности тока в случае использования балластного сопротивления 300 Мот были получены распределения концентраций электронов. С увеличением плотности тока увеличивается максимальное значение концентрации электронов и наблюдается распределение близкое к тлеющему режиму, при низком значении импульса плотности тока таунсендовскому режиму.

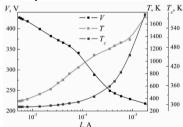


Рисунок 2. Вольт-амперная характеристика коронного разряда в тлеющем режиме, а также зависимости максимальной температуры газа и поверхности катода от разрядного тока.

Стоит отметить, что формирование импульсов Тричела [2-4] сходно с автоколебательным режимом, характерным при переходе от слаботочного таунсендовского разряда сильноточному К тлеюшему нормальному разряду С классическими электродами [2-4]. В каждом полупериоде при нарастании тока напряжение на промежутке уменьшается из-за того, что большая часть приложенного напряжения падает на внешнем сопротивлении. Заряды, изгоняемые полем из промежутка, не воспроизводятся и ток падает. В отсутствии проводимости напряжение на разряде восстанавливается. Из-за запаздывания образования зарядов в промежутке напряжение на нем превосходит пробивающее, после чего развивается ионизация, ток нарастает, напряжение на разряде, следовательно, падает и все повторяется. Процесс носит характер релаксационных колебаний. Как видно из рис. 1 при увеличении вкладываемой мощности в разряд (уменьшении балластного сопротивления) (рис. 1) увеличивается частота повторения импульсов плотности тока, при этом их амплитуда падает.

При достижении значения тока ~5.5 mkA пульсации тока и напряжения пропадают, И коронный разряд выходит на стационарный режим с постоянными значениями тока и напряжения. На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика, а также максимальная температура газа в разряде и максимальная температура поверхности катода в зависимости от разрядного тока. Как видно, ВАХ коронного разряда в этом режиме падающая, что абсолютным высоким значением напряженности электрического поля вблизи острия и как следствие значительным нагревом газа вблизи в этой области. С увеличением тока растет и катода-острия. Пространственные температура газа вбпизи распределения концентраций электронов, температуры газа и температуры катода для различных токов представлены на рис 3. Как видно с увеличением тока увеличивается концентрация плазмы, при этом плазменная область вблизи катода-острия увеличивается в ширину. Эта область разряда схожа с областью отрицательного свечения классического тлеющего разряда с плоским катодом. Стоит отметить, что температура газа достаточно быстро увеличивается и уже при токе 1мА достигает значений в 1500 К. Очевидно, что дальнейшее увеличение разрядного тока приведет к срыву в дуговой режим. В результате проведения серии численных экспериментов были воспроизведены два режима коронного разряда аргоне атмосферного давления: импульснопериодический и тлеющий. Анализ результатов показал, что наблюдаемый импульсно-периодический режим с характерными для него импульсами Тричела сходен с автоколебательным режимом. характерным при переходе от слаботочного таунсендовского разряда до сильноточного нормального тлеющего разряда с классическими плоскими электродами.

Результаты продемонстрировали, что с увеличением мощности вкладываемой в разряд, частота колебаний увеличивается, а амплитуда падает. При достижении порогового тока, коронный разряд переходит в тлеющий режим. Поскольку для коронного разряда характерно высокое значение электрического поля вблизи острия, то в этой области межэлектродного промежутка уже при малых токах при атмосферном давлении наблюдается

значительный нагрев. В связи с этим наблюдается падающая вольтамперная характеристика разряда. По-видимому, дальнейшее увеличение вкладываемой мощности в разряд приведет к его срыву в дуговой разряд.

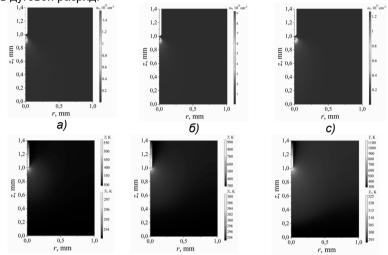


Рисунок 3. Распределение концентраций электронов (сверху), температуры газа и катода-острия (снизу) в коронном разряде при токах а) 2.3*10⁻⁵, b) 8.3*10⁻⁵, c) 1.71*10⁻⁴ A.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90101.

Литература:

[1] Hasan N., Antao D. S. and Farouk B. DC negative corona discharge in atmospheric pressure helium: transition from the corona to the 'normal' glow regime // Plasma Sources Sci. Technol. 23, 035013, (2014)

[2]Raizer Y.P. // Gas Discharge Physics. Berlin.: Springer-Verlag, 1991.

[3] Акишев Ю.С. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. І. Эксперимент // Физика плазмы. – 2001. – Т.27. – № 6. – С. 550-562.

[4]Дандарон Г.-Н.Б., Балданов Б.Б. Экспериментальное исследование свойств отрицательной короны в аргоне при атмосферном давлении // Физика плазмы. — 2007. — Т. 33. — №3. — С. 273-279.

^{*} aliya 2007@list.ru

^{**} as.uav@bk.ru

^{***} sabinazaz@mail.ru

^{****} btimerkaev@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА ЖЕЛЕЗА

Хафизов А.А.^{1*}, Валиев Р.И.^{1**}, Валиев Р.А.^{1***}, Шакиров Ю.И.^{1****}

¹Казанский федеральный университет, Набережные Челны, Россия

Повышение свойств традиционных высокоуглеродистых сплавов железа счет модификации их поверхностных слоев является одним из перспективных направлений в обработке материалов. Требуемый эффект в модификации поверхностных слоев может дать обработка концентрированным потоком энергии локального характера воздействия [1 - 3]. Из большого перечня применяемых источников энергии можно выделить низкотемпературную плазму с использованием жидкостей, так как применение разнообразных жидких сред дает широкие возможности структуры изменении химического состава. свойств модифицируемых материалов [4]. Однако недостаточная изученность этих изменений задерживает разработку эффективных технологий, необходимых для внедрения в производство.

Исследуемые образцы из серого чугуна были обработаны в плазме электрического разряда между металлическим электродом и электролитом. Абразивная износостойкость чугуна определена царапанием алмазной пирамидой прибора, что моделировало условия взаимодействия поверхности металла с закрепленным абразивом.

Из-за локальности воздействия плазмы обработанные зоны охлаждаются с высокой скоростью холодными близлежащими слоями. В результате в центре происходит закалка чугуна из жидкого состояния, а в периферии — из твердого состояния, что приводит к отличию микроструктуры и свойств этих зон. Таким образом, после обработки в чугуне можно выделить две зоны: зону оплавления и зону термического влияния. Мощность плазменной струи оказывает значительное влияние на геометрические параметры обработанных зон. Изменение мощности от 2 до 6 кВт сопровождается увеличением площади оплавленной зоны от 10 до 30 кв.мм и глубины оплавления от 0,2 до 0,8 мм.

Если в исходном состоянии серый чугун представлял собой равновесную структуру с пластинчатыми графитовыми включениями, то после обработки плазмой в микроструктуре зоны оплавления графит не проявляется — из-за высоких скоростей охлаждения он не успевает выделиться в свободной форме. Металл

в оплавленной зоне имеет сильно измельченную структуру: выросшие при кристаллизации расплава мелкие дендриты окружены тонкодисперсным ледебуритом. Повышение мощности плазменной обработки оказывает некоторое влияние на размеры дендритов (от 1,2 до 1,5 мкм), однако только в интервале от 2 до 4 кВт, далее наблюдается «насыщение» – средний размер дендритов сохраняется.

Структура находящейся за пределами оплавления термического влияния плазмы соответствует закаленному железоуглеродистого Определяющие состоянию сплава. микроструктуру процессы происходят в твердом состоянии. В областях, нагретых воздействием плазмы выше критической точки. перлит переходит в аустенит, и при быстром обратном охлаждении происходит мартенситное превращение. Размеры неравновесной фазы зависят от глубины, что объясняется увеличением размера аустенитных зерен из-за уменьшения скорости нагрева и охлаждения в глубоколежащих слоях чугуна.

Плазменная обработка оказывает значительное механические свойства серого чугуна. Высокие скорости охлаждения обуславливают образование в обработанных зонах метастабильной фазы – мартенсита, характеризующегося высокими значениями твердости. По сравнению с исходным состоянием чугуна с твердостью 200 HV можно констатировать резкое увеличение микротвердости оплавленной зоны до значения 1100 HV. Увеличение мощности плазменной струи приводит к некоторому уменьшению микротвердости: до 700 HV при максимальном значении 6 кВт. Такой характер зависимости твердости от мощности плазмы обусловлен уменьшением скорости охлаждения из-за увеличения объема оплавленной зоны при повышенной мощности.

Наряду с микротвердостью, одна из важнейших механических характеристик поверхностного слоя материала — износостойкость. Хотя микротвердость является одним из наиболее влияющих на характер абразивного износа параметров, она не может дать полную оценку износу: при одинаковой твердости износостойкость материалов может варьироваться в широких пределах.

Характер сопротивления абразивному износу зон воздействия плазмы зависит от мощности плазменной струи. Максимальное сопротивление абразивному износу имеет зона оплавления чугуна плазменной струей с минимальной мощностью.

Понижение абразивной износостойкости при увеличении мощности плазмы объясняется укрупнением дендритов в структуре. В то же время, при высоких значениях мощности отличительный характер распределения теплового поля и скорости охлаждения в обработанных зонах приводит к более высокому значению

износостойкости зоны закалки из твердого состояния по сравнению с зоной оплавления.

Общим для различных зон обработки является линейная объема металла при царапании зависимость вытесненного пирамидой метастабильных фаз чугуна прикладываемой нагрузки. Однако необходимо обратить внимание на характер этой зависимости для различных зон воздействия плазменной струи при ее пониженных значениях. Более высокая износостойкость зоны закалки по сравнению с зоной оплавления при больших нагрузках на индентор объясняется тем, что структура ее нижележащих слоев имеет большую пластичность, которая при повышении нормальной нагрузки исчерпывается медленнее, чем у структуры зоны оплавления.

При обработке серого чугуна плазменной струей в нем образуются зона оплавления и зона термического влияния, в которых происходят процессы закалки из жидкого и твердого состояний соответственно. В результате зоны оплавления и термического влияния отличаются как по структуре, так и по механическим свойствам. При повышении мощности плазменной струи от 2 до 6 кВт объемы этих зон увеличиваются, соответственно уменьшаются скорости их охлаждения прилежащими слоями металла. При этом структура зон становится более равновесным, что и отражается в механических свойствах поверхностных слоев.

- [1] Akst E.R. Structural and phase transformations in cast irons when implanted into the surface layers of nitrogen ions. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 86. P. 012038.
- [2] Valiev R. Mössbauer study of surface layers of high-speed steel after laser treatment / V. Bochkov, Sh. Bashkirov, E. Romanov, V.Chistjakov // Hyperfine Interactions. 1992. Vol. 69, Iss. 1–4. P. 589–592.
- [3] Габдрахманов А.Т., Галиакбаров А.Т., Исрафилов И.Х., Самигуллин А.Д., Габдрахманов А.Т. Повышение эффективности плазменной термообработки металлов // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2016. Т. 1. № 7. С. 287-290.
- [4] Khafizov A.A. Determination of regression materials mircohardness, processed by low-temperature plasma dependence on process conditions / A.A. Khafizov, Yu.I. Shakirov, R.A. Valiev, R.I. Valiev // Journal of Physics: Conf. ser. 2017. Vol. 789(1). P. 012024.

^{*} almazok75@yandex.ru

^{**} rivaliev87@mail.ru

^{***} rustvali@mail.ru

^{****} inekashakirov@mail.ru

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР ВОЛЬФРАМА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ

Софроницкий А.О.1*, Файрушин И.И.1, 2, 3**

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия ²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия ³Объединенный институт высоких температур РАН. Москва, Россия

В работе проведено экспериментальное исследование процесса синтеза наночастиц вольфрама в разряде постоянного тока. Режим разряда соответствовал аномально тлеющему разряду [1, 2], в качестве плазмообразующего газа был использован аргон, катод и анод были изготовлены из вольфрама. Давление варьировалось от 150-250 Торр, напряжение на разряде составляло 300 В, сила тока менялась от 300 до 650 мА. В межэлектродной области был организован поперечный поток аргона. Поток газа выносил из области разряда образующиеся в результате интенсивной ионной бомбардировки катода атомы и кластеры вольфрама, из которых в последующем образовывались наночастицы. Далее наночастицы осаждались на подложке.

После завершения эксперимента поверхность подложки была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа. На поверхности были обнаружены обнаружены конгломераты наночастиц вольфрама с характерным размером 20-70нм (Рис. 1).

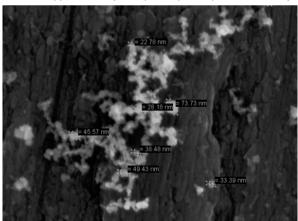


Рисунок 1. Изображение наночастиц вольфрама, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00930.

- [1] Analysis of various scenarios of the behavior of voltage-current characteristics of direct-current microdischarges at atmospheric pressure. Saifutdinov A. I., Fairushin I. I., Kashapov N. F., JETP Letters, 2016, 104, pp. 180–185.
- [2] Raizer Yu. P., Gas Discharge Physics, 1991, Springer, Berlin.
- [3] Numerical and Experimental Studies of the Synthesis of Copper Nanoparticles in a High-Pressure Discharge. Fairushin, I.I., Saifutdinov, A.I., Sofronitskiy, A.O. High Energy Chemistry, 2020, 54(2), pp. 150-153
- [4] Development of plasma reactor design for synthesis of copper nanoparticles using multi-scale simulation. Fairushin, I.I., Saifutdinov, A.I., Sofronitskiy, A.O., Timerkaev, B.A., Dautov, G.Yu. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1328(1), 012088

^{*} artempic8@mail.ru

^{**} fairushin ilnaz@mail.ru

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ В ГЕЛИИ

Сайфутдинов А.И.^{1*}, Ахмедова Р.Р.¹, Кудрявцев А.А.²

¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия ²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В [1] был запатентован ионизационный детектор для анализа газов методом электронной спектроскопии плазмы (ПЛЭС), позволяющий работать при высоких давлениях газа. Он основан на измерении электронных спектров реакций ионизации Пеннинга атомов и молекул примеси А метастабильными атомами буферного газа B^* , так как рекомендуется выбирать гелий, способный ионизировать любую примесь в газе.

$$A + B^* \to A^+ + B + e\{E_n\} \tag{1}$$

Здесь энергия появления быстрых электронов в реакции (1) равна Ep=Em-Ei (Em=19,8 эВ, Ei - энергия возбуждения метастабильного гелия и примесной ионизации соответственно). Для реализации метода [1-2] необходимо, чтобы ФРЭ быстрых электронов была нелокальной, а температура медленных электронов была низкой, в установившемся режиме реализуемой в плазме отрицательного свечения (НГ) [3]. В этом случае узкие пики соответствуют энергиям Ep их появления в реакциях (1) [1,2]. Условию нелокальности ФРЭ $\lambda_\varepsilon > L$ ($\lambda_\varepsilon = \delta^{-1/2}\lambda$ - длина релаксации энергии электрона, L - характерный размер плазменной области) соответствует условию $pL < 5 \ cm \cdot Torr$

В данной работе были проведены исследования по детектированию примесей 0.01% С2Н4 и 0.1% С2Н5ОН в буферном гелии в разряде с полым катодом при низких давлениях. Были зарегистрированы характерные спектры, соответствующие пеннинговским электронам, рожденным в реакциях типа (1).

- [1] Kudryavtsev A.A., Tsyganov A.B. US Patent 7.309.992. December 18. 2007.
- [2] A.Kudryavtsev, P. Pramatarov, M. Stefanova, N. Khromov. Journal of Instrumentation. V. 7, P07002, 2012.

^{*} as.uav@bk.ru

О ВЛИЯНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОЛИТНОГО КАТОДА НА СВОЙСТВА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Тазмеев A.X.1*, Тазмеева P.H.1

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия

Введение. В последние годы, в связи с уникальными возможностями практического применения, газовые разряды с жидким электролитным катодом стали объектом пристального изучения. В большинстве исследований разряд получен над свободной гладкой поверхностью электролита. Под воздействием разряда поверхность электролита может деформироваться, в частности, на поверхности может образоваться рябь [1]. В данной работе была поставлена задача установления зависимости свойств разряда от состояния поверхности жидкого электролитного катода.

Эксперимент. На рис. 1 схематично изображен катодный узел газоразрядного устройства.

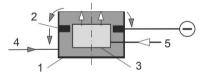


Рисунок 1. Катодный узел. 1 – выходной канал, 2 – токоподвод, 3 – пористая вставка; 4 – поток электролита; 5 – поток газа.

Возмущения поверхности электролита создавались путем подачи газа в поток электролита через пористое тело. В качестве электролита использовался водный раствор хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10 мСм/см. На рис. 2 приведены фотографии поверхности потока электролита в спокойном и возмущенном состояниях до зажигания разряда.

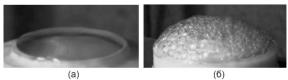


Рисунок 2. Фотографии поверхности электролита в отсутствии потока газа (a) и при подаче газа в катодный узел (б).

На рис. 3 представлены мгновенные фотографии поверхности электролита, снятые во время горения разряда.

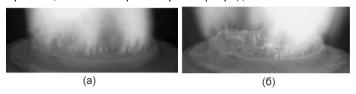


Рисунок 3. Мгновенные фотографии поверхности электролитного катода в отсутствии потока газа (а) и при подаче газа (б).

Экспозиция 0.2 мс. Ток 6.0 А.

Как видно, подача газа приводит к существенным изменениям поверхности электролитного катода. Распределение «катодных пятен» становится неравномерным. Можно ожидать, что должны образоваться значительные пульсации тока. Однако осциллограммы токов и напряжений получились практически одинаковыми в обоих вариантах (рис.4). Здесь присутствуют мелкомасштабные высокочастотные пульсации. Они являются характерным признаком газового разряда с жидким электролитным катодом [2, 3]. Некоторая сглаженность осциллограмм на рис. 46, по- видимому, получена изза стабилизации плазменного столба слабым потоком газа.

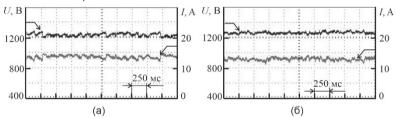


Рисунок 4. Осциллограммы тока и напряжения в отсутствии потока газа (а) и при подаче газа (б). Межэлектродное расстояние 7 см.

В спектрах излучения, снятых в вариантах с потоком и без потока газа также не были обнаружены существенные различия.

Выводы. Таким образом, крупномасштабные возмущения поверхности жидкого электролитного катода практически не влияют на электрические и оптические свойства газового разряда.

- [1] Вялых Д.В. и др. // Химическая физика. 2005. Т. 24. №8. С. 96-98.
- [2] Tazmeev G.K., Timerkaev B.A., Tazmeev K.K. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 669. P. 012057.
- [3] Тазмеев Х.К. и др, // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 33-37.

^{*} almazt@yandex.ru

ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАЗВИТИЕ ПРОБОЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ ВОДЕ С МИКРОПУЗЫРЬКАМИ

Панов В.А.^{1*}, Василяк Л.М.¹, Ветчинин С.П.¹, Печеркин В.Я.¹, Куликов Ю.М.¹, Савельев А.С.¹

¹ОИВТ РАН. Москва. Россия

Проведено экспериментальное исследование эффекта полярности электродов в несимметричной геометрии «острие-цилиндр» на развитие импульсного электрического разряда в воде с удельной электропроводностью 90 мкСм/см с воздушными микропузырьками и без них. Обнаружено, что начальная инициация плазменного канала на аноде в воде происходит вблизи контакта металлжидкость-изоляция для всех исследуемых геометрий анода. В присутствии пузырьков при повышенном напряжении развитие плазменных каналов после инициации происходит противоположную ОТ разрядного промежутка сторону изолированной поверхности электродов. При наличии пузырьков снижается амплитуда напряжения пробоя, уменьшается время задержки инициирования и общее время развития пробоя каналом, развивающимся с острийного анода. При повышении амплитуды напряжения развитие замыкающего канала происходит с катода вне зависимости от его геометрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01091.

^{*} panovvladislav@gmail.com

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ НАНОМАТЕРИАПОВ

Асадуллин Т.Я.^{1*}, Галеев И.Г.^{1**}, Сайфутдинов А.И.^{1***}

¹Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполев -КАИ, Казань, Россия

Огромная востребованность наноматериалов и нанотехнологических решений в современном мире выдвигает повышенные требования к ускорению процесса анализа результатов экспериментов по получению наноматериалов. Основными факторами, ограничивающими скорость проведения анализа являются следующие:

- 1) Большое количество исследований и объем информации об условиях и результатах экспериментальных исследований, а также о результатах теоретических исследований, объясняющих экспериментальные результаты.
- 2) Сложность контроля в реальном времени параметров материалов, получаемых в ходе экспериментов. Как правило, эти материалы анализируются через значительное время после завершения серии экспериментов.
- 3) Сложность оборудования и высокая цена материалов, используемых при экспериментальных исследованиях получения наноматериалов.

Также сложность учета большого количества факторов, влияющих на результаты экспериментальных исследований, осложняет задачу воспроизводимости результатов. Следовательно, затрудняется переход от стадии исследований к стадии технологии.

Современные информационные технологии предоставляют эффективные средства для организации сбора, хранения и поиска больших объемов разнородной информации. Это так называемые Базы Знаний, которые представляют собой базы данных, содержащие не только массив информации, но также связи между отдельными элементами информации, их описания, механизмы поиска и ввода-вывода. Набор специально подготовленных данных для размещения в Базе Знаний называется датасет. Способ представления элементов информации и связей между ними в Базе Знаний называется онтологией.

Управление поиском информации в Базах Знаний относится к сфере Искусственного Интеллекта. В современных Базах Знаний

управление осуществляется нейронными сетями, которые специально обучаются на образцовых датасетах экспертами. По мере формирования Базы Знаний и отлаживания управления процесс обучения может быть автоматизирован.

Создание Базы Знаний для результатов исследований большого коллектива исследователей, позволит значительно повысить эффективность и воспроизводимость экспериментальных исследований, поможет качественно планировать новые эксперименты.

^{*} tyaasadullin@kai.ru

^{**} iggaleev@kai.ru

^{***} as.uav@bk.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Асадуллин Т.Я.^{1*}, Галеев И.Г.^{1**}, Сайфутдинов А.И.^{1***}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

Физика наноразмерных структур и нанотехнологии являются очень молодой, но бурно развивающейся областью знаний. Интерес к этим исследованиям определяется большой востребованностью их результатов в сфере технологий и реального производства. Ввиду относительной молодости исследования в сфере наноразмерных экспериментальными. структур являются. основном. исследования генерируют огромное количество информации об экспериментов, динамике изменения параметров, используемых приборах и материалах, результатах измерений и анализа полученных данных. Также широкое распространение совместные исследования нескольких получили исследователей. Это, с одной стороны, повышает квалификацию состава исследователей, а, с другой стороны, способствует повышению воспроизводимости результатов экспериментов.

При обычном, не автоматизированном, анализе результатов экспериментов исследователями практически невозможно учитывать такой большой объем информации. Поэтому большое количество доступной информации не собирается, а значительная собранной информации не обрабатывается. часть эффективного использования огромных массивов разнородных сложноструктурируемых и взаимосвязанных данных современные информационные технологии предлагают использовать Базы Знаний, управляемые Искусственным Интеллектом.

Введение информации в Базы Знаний представляет серьезную проблему ввиду их очень большого объема, разнородности, а также необходимости их описания и установления связей. Эта проблема решается в процессе подготовки датасета. Часть данных может загружаться автоматизированно, например, результаты измерений цифровых измерительных приборов. Для автоматизации ввода прочих данных необходимо использовать классификацию.

^{*} tyaasadullin@kai.ru

^{**} iggaleev@kai.ru

^{***} as.uav@bk.ru

КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕНИЯ СПИНОВ В ПАРАМАГНЕТИКЕ ИМПУЛЬСОМ СВЧ ПОЛЯ

Асадуллина Н.Я.^{1*}, Асадуллин Т.Я.^{1**}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

Процессы создания, обработки и передачи квантовой информации включают возбуждение системы двухуровневых частиц-кубитов последовательностью импульсов резонансного когерентного электромагнитного поля различной длительности и интенсивности. Такими кубитами могут быть ядерные или электронные спины. примесные атомы или ионы, квазичастицы типа магнонов, экситонов, поляритонов и т. д. Соответственно резонансные частоты ω возбуждающего поля простираются от радиочастот в случае ядерных спинов и микроволн (в случае электронных спинов) до оптических частот в случае оптических переходов в атомах и ионах. В результате квантовых переходов между уровнями, поле импульса вносит в систему когерентную информацию, которая считывается приемным устройством как когерентный отклик (сигнал). Этот отклик с той или иной скоростью спадает как во время действия импульса, так и после него. Потеря информации (релаксация) является характеристикой всех перечисленных выше и не названных систем, поэтому выявление природы и свойств этой релаксации (для каждой системы) является одной из важнейших задач как теории, так и эксперимента.

Очевидно, что величина сигнала пропорциональна числу (концентрации) частиц в системе. Если бы остальные характеристики сигнала, в частности, скорость спада Г, не зависели от концентрации, ее можно было бы не учитывать, так как сигнал измеряется в относительных единицах. Однако опыт показывает, что скорость

спада зависит и от амплитуды B_1 поля импульса ${}^2B_1cos\omega t \parallel x$, и от концентрации $n: \Gamma = \Gamma(B_1, n)$. Полная концентрация n состоит из концентрации $n_{ac}(t)$ возбужденных импульсом «активных» частиц и «пассивных» $npas(t): n = n_{ac}(t) + n_{pas}(t)$. Естественно, величина сигнала пропорциональна $n_{ac}(t)$, однако в затухание отклика дают вклад обе компоненты концентрации. В свою очередь, концентрация активных частиц сама зависит от интенсивности поля импульса: $n_{ac}(B_1,t)$. Резонно предположить, что вклады в скорость спада от активных $\Gamma_{ac} \sim n_{ac}(t)$ и пассивных $\Gamma_{pas} \sim n_{pas}(t)$ компонентов могут быть обусловлены разными механизмами.

работа посвящена изучению кинетики возбуждения Данная электронных спинов в твердотельных разбавленных парамагнетиках в процессе переходных нутаций. Переходные нутации есть отклик системы, первоначально находящейся в тепловом равновесии, к внезапно приложенному очень интенсивному резонансному полю в процессе ее перехода в новое стационарное состояние. Это явление первоначально было обнаружено в системе ядерных спинов [1], далее наблюдалось в системе электронных спинов [2], на оптических переходах, в атомных и молекулярных системах [3]. Более конкретно, нашей целью является описание опытов Боскаино с сотрудниками [4, 51 по затуханию нутаций в кварце и в аморфном кремнии.

Для рассматриваемых материалов характерно неоднородное уширение, то есть разброс резонансных частот спинов (спин-пакетов) ω_{0j} относительно центральной частоты ω_{0} , совпадающей с частотой поля импульса: $\omega_{0}=\omega$. Обычно этот разброс аппроксимируется гауссовым распределением

$$f(\Delta) = (2\pi)^{-1/2} \sigma^{-1} \exp(-\Delta^2 / 2\sigma^2) \Delta = \omega_{0j} - \omega_0$$
(1)

со средним квадратичным отклонением от. Кроме того, резонансный переход для каждого спин-пакета однородно уширен. В нашем случае насыщения сильным полем, это уширение описывается распределением Лоренца

$$L(\Delta) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma_0 \sqrt{1 + s_0}}{\Delta^2 + \Gamma_0^2 \left(1 + s_0\right)},\tag{2}$$

где $s_0 = \chi^2 T_2^2$ — параметр насыщения. Здесь $\chi = \gamma B_1$ — частота Раби, γ — гиромагнитное отношение, $\Gamma_0 = 1/T_2$ есть скорость релаксации при слабом поле возбуждения.

Как сказано выше, мы имеем скорости спада сигнала благодаря взаимодействию активных спинов друг с другом $\Gamma_{ac}(\Delta,\,t)\sim n_{ac}(\Delta,\,t)$ и активных спинов с пассивными $\Gamma_{pas}(\Delta,\,t)\sim n_{pas}(\Delta,\,t)$. Следовательно, задача заключается в нахождении этих концентраций. Они получаются путем решения кинетических (скоростных) уравнений. Система спинов в тепловом равновесии характеризуется населенностями n_{10} нижнего и n_{20} верхнего уровней: $n=n_{10}+n_{20}$. Равновесные спектральные концентрации будут $n_{10}(\Delta)=n_{10}f(\Delta)$ и $n_{20}(\Delta)=n_{20}f(\Delta)$, соответственно. Во время импульса зависимость спектральных концентраций от времени $n_{10}(\Delta,\,t)$ и $n_{20}(\Delta,\,t)$ описывается скоростными уравнениями

$$\frac{d}{dt}n_{1}(\Delta,t) = -(W_{12} + W_{12})n_{1}(\Delta,t) + (W_{21} + W_{21})n_{2}(\Delta,t);$$
(3a)

$$\frac{d}{dt}n_{2}(\Delta,t) = -(w_{21} + W_{21})n_{2}(\Delta,t) + (w_{12} + W_{12})n_{1}(\Delta,t). \tag{3b}$$

Здесь w_{12} и w_{21} вероятности релаксационных переходов и $W_{12} = W_{21}$ = W вероятности индуцированных переходов. Вероятность спонтанных переходов в области СВЧ частот мала и здесь не учтена.

Мы упрощенно рассматриваем реальный процесс возбуждения нутаций состоящим из нескольких отдельных процессов. В работе [5] этот процесс, который представляет собой постепенно уменьшающиеся по амплитуде колебания (осцилляции), длится несколько десятков микросекунд. Однако первое колебание, наибольшее по амплитуде, появляется уже в первые микросекунды после приложения импульса. Поэтому, в случае интенсивного поля на начальном участке пренебрегаем малыми релаксационными слагаемыми (В работе [5] время продольной релаксации $T_1 = 1/(w_{12} + w_{21})$ имеет порядок величины $T_1 \approx 1$ секунда):

$$\frac{d}{dt}n_1(\Delta,t) = -W(n_1(\Delta,t) - n_2(\Delta,t)); \tag{4a}$$

$$\frac{d}{dt}n_{2}(\Delta,t) = -W(n_{2}(\Delta,t) - n_{1}(\Delta,t))$$
(4b)

Здесь [6] W = $\chi^2 \sin(at)/2a$, $a=\sqrt{(\omega-\omega_0')^2+\chi^2}$, ω_0' – однородно уширенная частота спин-пакета ω_{0j} . Эту вероятность перехода следует усреднить по однородному уширению

$$W(t) = \frac{\chi^2}{2} \int \frac{\sin(at)}{a} L(\omega_0^{\prime}) d\omega_0^{\prime}$$
 (5)

В интересующем нас случае короткого времени ширина функции $\sin(at)/a$ много больше, чем ширина Лоренцевской функции. Поэтому функция $\sin(at)/a$ может быть вынесена из-под знака интеграла при значении $a=\chi$.

Поэтому окончательно имеем W(t) = $(\chi/2)\sin\chi t$.

Решение уравнений (4) имеет вид

$$n_2(\Delta, t) = \frac{1}{2} [n_0(\Delta) - \Delta n_0 \exp(\cos \chi t - 1)] f(\Delta); \quad \Delta n_0 = n_{10}(\Delta) - n_{20}(\Delta);$$
(6)

$$n_{ac}(\Delta, t) = [n_2(\Delta, t) - n_{20}(\Delta)] f(\Delta); \tag{7}$$

Интегрируя $n_{ac}(\Delta,t)$ по неоднородному спектру, находим полную концентрацию $n_{ac}(t)$ активных спинов, обусловленную индуцированными переходами.

В тексте должны присутствовать ссылки на приведенную литературу [1-2]. Объем тезисов не должен превышать более четырех страниц, просим Вас не оставлять много пустых мест на крайних страницах, постараетесь максимально заполнить их.

- [1] H. C. Torrey, Phys. Rev. 76, 1059 (1949).
- [2] P. W. Atkins, A. J. Dobbs, and K. A. McLauchlan, Chem. Phys. Lett. 25, 105 (1974).
- [3] G. B. Hocker, and C. L. Tang, Phys. Rev. Lett. 21, 591 (1968).
- [4] R. Boscaino, F. M. Gelardi, and J. P. Korb, Phys. Rev. B 48, 7077 (1993).
- [5] S. Agnello, R. Boscaino et al., Phys. Rev. A 59, 4087 (1999).
- [6] А. Абрагам, Ядерный магнетизм. ИИЛ, Москва, (1963).

^{*} nyaasadullina@kai.ru

^{**} tyaasadullin@kai.ru

КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПЕРЕНОСА РУТЕНИЕВОГО КАТАЛИЗАТОРА

Холиков М.М.¹, Сафаров М.М.², Джураев Д.С.¹, Тиллоева Т.Р.³

¹Политехнический институт Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими в городе Худжанде, Худжанд, Таджикистан ²Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований поглощения влаги гранулированноого пористого оксида алюминия как в чистом виде, так и содержащей рутений Ru Al₂O₃ фракцией 1-2 мм (20%). В качестве влажной среды выбрана дистиллированная вода и NaCl. На основе экспериментального исследования и закона соответственных состояния получены аппроксимационные зависимости.

Для исследования были взяты образцы гранулированного пористого оксида алюминия как в чистом виде, так и содержащей рутений, широко применяемые в качестве носителя при комнатной температуре каталитических процессов (удельная поверхностная плотность ~ 123 M^2/Γ ; суммарный объем пор ~ 0,35 см³/г; насыпная плотность ~ 1г/см³). Гранулы оксида алюминия имели форму, близкую к цилиндрической, и следующие размеры: высота (1-1,5) мм, диаметр (0,85-1,25) мм. В качестве адсорбентов применяются чистая вода и раствор соли NaCl. Для определения коэффициент массопереноса нужно знать масса засыпки в сухом состоянии и в увлажненной среде. Для определения значений массы зернистых материалов в разных средах, после каждого помощью весов. часа взвешиваем массу С Коэффициент массопереноса определяем по формуле:

$$\beta = \frac{\Delta m}{m_1 s \cdot t}, \left(\frac{\kappa \Gamma}{M^2 \cdot c}\right) \tag{1}$$

где, β - коэффициент массопереноса , $(\frac{\kappa\Gamma}{M^2\cdot c})$; Δm — разность массы образцов при увлажнении (кг); m_1 — масса сухого катализатора, г. S— общая поверх-ность пор катализатора (м²); t— время увлажнения исследуемых объектов, час или секунд.

Установлено, что коэффициент массопереноса при увлажнении пористым оксидом алюминия в среде пара различных вод в течение часа увеличивается на 41%, а в течение 10 часов на - 70 %. Понятно, что коэффициент массопереноса зависит от среды увлажнения. В среде чистой воды в течение часа для Al_2O_3 , 41%, а для Al_2O_3 Ru 35% увеличение коэффициента массопереноса достигает 37 %, а на среде натрий хлора это изменение доходит до 37,2%, разница между ними при увлажнении в течение часа составляет 7-10 %.

³Филиал МЭИ в городе Душанбе, Душанбе, Таджикистан

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ИЗОБУТАНА

Сафаров М.М.¹, Джумаев С.С.²

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований удельной теплоемкости жидкого изобутана. Для теплоемкости использованы измерения метод монотонного разогрева и метод нагретой нити. Общая и относительная погрешности измерения теплоемкости при доверительной вероятности α=0,95 соответственно равны 3,6% и 2,7%. На основе результатов экспериментальных исследований закона соответственных состояния получены аппроксимационные зависимости.

теплофизических Исследования свойств (теплопроводность, изобарная теплоемкость) веществ удельная имеют давнюю историю. Интенсивность продуктивность И технологических процессов зависит не только от правильной организации химических взаимодействий, но и от направленности потоков тепла и массы. Разработка материалов с заранее заданными свойствами для различных отраслей народного хозяйства, как и в целом, ускорение научно-технического прогресса, невозможна без знания свойств веществ и материалов. Достоверность данных о свойствах веществ и материалов влияет на качество выпускаемой продукции.

¹Таджикский технический университет имени акад. М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, Душанбе, Таджикистан

СПЕКТРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПЛАЗМЫ С ЖИДКИМ КАТОДОМ

Гизатуллина Ф.А.^{1*}, Калеева А.А.^{1**}, Сорокина А.Р.^{1***}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ

Изучение спектральных линий Штарковского уширения имеет практическое значение, например, изотопы водорода (дейтерий, тритий) используются в качестве топлива для получения энергии с помощью управляемого синтеза, либо в магнитоуправляемых термоядерных системах. Спектральные линии изотопов водорода используются для экспериментального определения различных параметров плазмы. Во многих видах низкотемпературных разрядов водород является основным компонентом плазмы, либо он присутствует в виде примеси. Поэтому формы и сдвиги Н-линий электрических разрядах являются основным источником информации о параметрах плазмы и служат инструментом оптимизации этих технологий [1].

Как известно, разряд с жидким катодом горит при атмосферном давлении. Визуально, разряд является многоканальным, каждый канал которого перемещается относительно друг друга.

Эксперименты проводились с катодом из 1% - го раствора NaCl. Спектральные исследование были получены с помощью спектроанализатора «Сириус». Результаты качественного анализа показали, что некоторые линии с высокими значениями энергии возбуждения наблюдаются лишь вблизи анода и поверхности жидкого катода. Линии атомов водорода H_{α} и H_{β} наблюдаются во всем межэлектродном пространстве. Причем, непосредственно у поверхности катода ширина этих линий имеет в несколько раз больше значение, чем в катодной области.

Из теории Штарковского уширения известно, что при достаточно высоких концентрациях ионов и электронов в плазме, преобладающими являются дальнодействующие кулоновские силы, поэтому уширения спектральной линии обусловлены взаимодействием атомов с заряженными частицами.

На рисунке 1 приведены профили линии H_{β} , где по оси ординат отложена интенсивность линии в относительных единицах, приведенных к максимальному значению. Профиль 1 соответствует области плазмы, расположенной в 3-х мм от катода, профиль 2 – поверхности катода.

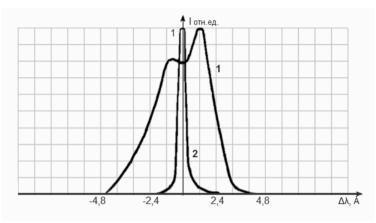


Рисунок 1. Профиль H_{β} , 1- для прикатодной области, 2 – поверхности катода.

Данные уширения дают возможность определить концентрацию электронов с достаточно большой точностью. Найденные по полуширинам линий значения концентрации составляют $1,2^*10^{14}$ см 3 и $3,5^*10^{15}$ см 3 соответственно. Полученные в эксперименте значения $\mathbf{n}_{\rm e}$ относятся, очевидно, к микроканалам плазмы и свидетельствуют о том, что определяющую роль в поддержании устойчивого разряда играют электроны, образующиеся на поверхности жидкого катода.

Литература:

[1] Eugene Oks, Refinement of the semiclassical theory of the Stark broadening of hydrogen spectral lines in plasmas, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, V. 152, P. 74-83

^{*} fleragiz@yandex.ru

^{**} andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

^{***} adelia-k@yandex.ru

ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Юнусов Р.Ф. 1*, Юнусова Э.Р.2

¹КНИТУ-КАИ, Казань, Россия, ²ГАУЗ ГКБ №7, Казань, Россия

Особенностью тлеющего разряда (TP) по сравнению с другими видами газовых разрядов является существенная разница между температурой электронов и температурой нейтральной компоненты газа. Эта отличительная черта тлеющего разряда позволяет использовать его в разнообразных технологических операциях, требующих невысоких температур газовой смеси (плазмохимия, катодное распыление металла, озонирование помещений). Поэтому практический интерес представляют также области тлеющего разряда с малым энерговкладом. В этих областях возможны переходные процессы, возникновение различных неустойчивостей [1-4].

В данной работе экспериментально наблюдались пульсации энергетических характеристик ТР в области перехода к темной форме разряда. Газ в разрядную камеру поступал через цилиндрический полый катод, проходил межэлектродное расстояние а = 4 см и далее выводился также через полый анод. Стеклянный канал, в котором зажигался ТР имел цилиндрическую форму диаметром d = 1 см. Расход газа измерялся ротаметром и изменялся в диапазоне G = (0 - 0.05) г/с. Также изменяли давление газа в диапазоне Р = (4,7 – 26) кПа. Энергетические характеристики (силу тока I разряда и напряжение U) измеряли стрелочными приборами и они изменялись в диапазонах: I = (20 -- 100) мA, U= (1, 5 -- 4, 2) кВ Вольтамперные характеристики имели отрицательное дифференциальное сопротивление. Выявлены три участка ВАХ (рис.1.): в диапазоне токов I = (100 -- 70).мА наблюдался светящийся положительный столб разряда вплоть до катода с медленным возрастанием напряжения; в диапазоне токов I = (70 происходит плавный переход к разряду без видимого положительного свечения CO значительным **у**величением напряжения разряда. При дальнейшем уменьшении силы тока (третий участок) разряд существует почти при постоянном напряжении вплоть до его гашения. После зажигания разряда начальная точка попадает на участок I ВАХ. Далее сила тока разряда уменьшается. Кривые 1 и 2 соответствуют давлению Р = 26 кПа: 1-G=0, 04 г/с, 2- G= 0. Кривые 3 и 4 соответствуют давлению P= 6,25 кПа: 3 –G=0,01 г/с, 4 – G=0.

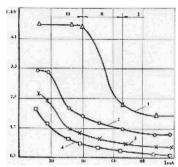


Рисунок 1. Вольтамперные характеристики ТР.

Участок II соответствует переходу к темной форме разряда без ярко выраженной светящейся области в цилиндрическом канале. При этом с уменьшением силы тока напряжение увеличивается более резко. Затем оно практически не изменяется (участок III) и разряд гаснет. Как видно из приведенных характеристик переход в темную форму разряда происходит в области малых токов при различных давлениях Р и расходах воздуха G. Но только при повышенных давлениях и расходах скачки напряжения, соответствующие переходу темную форму разряда, становятся значительными. Одновременно с переходом ТР в темную форму низкочастотные и высокочастотные наблюдались пульсации напряжения и тока разряда. В неподвижном газе наблюдались пульсации электрических параметров ТР с частотой f = 300 Гц.

При подаче воздуха появляются высокочастотные колебания в момент перехода разряда из нормального вида в темную форму. Частота высокочастотных колебаний электрических параметров разряда зависит от расхода воздуха и изменялась в диапазоне f = (100-170) кГц. С увеличением расхода воздуха частота указанных высокочастотных колебаний уменьшается.

- Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of voltage fluctuations in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012077.
- Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.
- 3. Yunusov R.F., Garipov M.M. Effect of gas flow on the form and the characteristics of Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1328 (2019) 012101 doi:10.1088/1742-6596/1328/1/012101
- Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of transient processes in a Glow Discharge //Journal of Physics: Conf. Series 1370 (2019) 012032 doi:10.1088/1742-6596/1370/1/012032

^{*} optanir@mail.ru

Оглавление

Физические и технологические аспекты формирования морфологии, структуры и управления элементным составом пленок алюминия и нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления Баранова Л.В. ^{1,2} , Струнин В.И. ^{1,2} , Чириков Н.А. ^{2,3}	5
¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Российская Федерация ² Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, Омск, Российская Федерация ³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация	
Плазменные процессы формирования	13
современных приборных структур	
наноэлектроники К.В. Руденко, А.В. Мяконьких Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, Москва, Россия	
Формирование мощного потока пароводяной	17
плазмы в газовом разряде с воднорастворным	
катодом	
Х.К. Тазмеев, Г.Х. Тазмеев Казанский федеральный университет, Набережночелнинский	
институт, Набережные Челны, Россия	
Физические характеристики газоразрядной	19
пылевой плазмы и возможности ее	
применения для синтеза наноструктур	
металлов и их оксидов	
И.И. Файрушин Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань,	
Россия	
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия	
Казанский национальный исследовательский технический	
университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия	

Возможен ли самостоятельный тлеющий разряд постоянного тока при отсутствии эмиссии электронов с катода? В.В. Горин	21
Combined reactive magnetron sputtering and molecular beam epitaxy synthesis, and further studies of structural, magnetic, and ferromagnetic resonance properties of thin-film epitaxial Pd _{0.96} Fe _{0.04} /VN/Pd _{0.92} Fe _{0.08} superconducting spin-valve heterostructure Янилкин И.В. ^{1,2} , Гумаров А.И. ^{1,2} , Киямов А.Г. ¹ , Родионов А.А. ¹ , Юсупов Р.В. ¹ , Aliyev М.N. ³ , Тагиров Л.Р. ^{1,2,4} 'Institute of Physics. Kazan Federal University, Kazan, Russia	25
^a Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia ^a Baku State University, Baku, Azerbaijan ^a Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia	
Плазмостимулированный процесс атомно- слоевого осаждения рутения и нитридов титана и тантала Смирнова Е.А. ¹ , Мяконьких А.В. ¹ , Рогожин А.Е. ¹ , Руденко К.В. ¹ ¹ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия	28
Применение интерферометрии и эллипсометрии для прецизионных измерений толщин слоев в процессах плазменного осаждения и травления Гайдукасов Р.А.¹, Клементе И.Э.¹, Мяконьких А.В.¹, Руденко К.В.¹ ¹ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия	32
Применение методов зонда Ленгмюра и оптической эмиссионной спектроскопии для исследования плазмы фторбромуглеродов Кузьменко В.О.¹, Мяконьких А.В.¹, Руденко К.В.¹ ¹Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, Москва, Российская Федерация	36
Усовершенствованный процесс глубокого анизотропного травления кремния с высоким аспектным соотношением для формирования TSV структур Долгополов В.М.¹, Варакин В.М.¹, Иракин П.А.¹ ¹АО НИИТМ, Зеленоград, Россия 203	40

Получение полимерных композиций с одновременным образованием в них	42
углеродных наночастиц	
Данилаев М.П. ¹ , Вахитов И.Р. ² , Евтюгин В.Г. ² , Куклин В.А. ^{1, 2} , Лунев И.В. ² , Осин Ю.Н. ² , Рогов А.М. ² , Тагиров Л.Р. ^{2, 3} ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева - КАИ, Казань, Россия	
Плазменные покрытия для повышения	44
адгезионной прочности стоматологических	
облицовочных материалов	
П.А. Тополянский ¹ , С.А. Ермаков ¹ , А.П. Тополянский ¹ ¹ ООО «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия	
Исключение непереносимости	48
стоматологических конструкционных	
материалов плазменными покрытиями	
П.А. Тополянский ¹ , С.А. Ермаков ¹ , А.П. Тополянский ¹ ООО «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия	
Общая математическая модель индуктивно- связанной плазмы	52
Никифоров С.А. ¹ , Цивильский И.В. ¹ , Гильмутдинов А.Х. ¹ , Рубля Р.С. ¹	
¹ КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, Россия	
Моделирование фазовых переходов металлических частиц при их обработке в индуктивно-связанной плазме	55
Мельников А.С. ¹ , Цивильский И.В. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия	
Восстановление в индуктивно-связанной плазме отработанных в аддитивном производстве порошковых материалов	58
Нагулин К.Ю.¹, Назаров Р.¹, Гайсина А.Р.¹, Гильмутдинов А.Х.¹ ¹КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия	
Электронно-микроскопическое исследование наночастиц, испускаемых при лазерном	61
спекании порошка из нержавеющей стали	
Носков А.И. ¹ , Дробышев С.В. ¹ , Лоскутова П.С. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им А.Н. Туполева-КАИ. Казань, Россия	

Электронно-микроскопическое исследование	64
наночастиц, испускаемых при лазерном	
спекании порошка из нержавеющей стали	
Носков А.И.¹, Дробышев С.В.¹, Лоскутова П.С.¹ ¹Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева-КАИ, Казань, Россия	
Особенности формирования плазмы в импульсном несамостоятельном дуговом	67
разряде	
Ковальский С.С. 1 , Денисов В.В. 1 , Островерхов Е.В. 1 1 ИСЭ СО РАН, Томск, Россия	
Нанесение твердых, коррозионно- и	72
износостойких а-c:h:sio _x покрытий	
плазмохимическим методом для медицинских применений	
Гренадёров А.С. ¹ , Жульков М.О. ^{1, 2} , Оскомов К.В. ¹ ¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия	
² Национальный медицинский исследовательский центр им.	
академика Е.Н.Мешалкина, Новосибирск, Россия	
Системы генерации газо-металлических	75
пучково-плазменных образований при низком	
давлении для упрочнения поверхности материалов и изделий	
Денисов В.В. ¹ , Денисова Ю.А. ¹ , Коваль Н.Н. ¹ , Ковальский С.С. ¹ , Леонов А.А. ¹ , Островерхов Е.В. ¹ , Савчук М.В. ¹ , Яковлев В.В. ¹ ¹ ИСЭ СО РАН, Томск, Россия	
Плазменно-растворный синтез наночастиц оксида меди	78
Смирнова К.В. ¹ , Извекова А.А. ¹ , Иванов А.Н. ¹ , Шутов Д.А. ¹ ,	
Рыбкин В.В. ¹ ¹ ФГБОУ ВО "ИГХТУ", Иваново, РФ	
Численные и экспериментальные	81
исследования характеристик барьерного	
микроразряда, генерируемого	
синусоидальной и прямоугольной формой сигнала напряжения	
Гайнуллина С.В. ¹ , Сайфутдинова А.А. ¹ , Сайфутдинов А.И. ¹ ,	
Асадуллин Т.Я. ¹ ¹ КНИТУ-КАИ им А.Н.Туполева, Казань, Россия	

Численное моделирование осаждения фракций дисперсной компоненты электрически заряженной многофракционной дисперсной среды в плоской постановке Тукмаков Д.А.1 1 ИММ КазНЦ РАН, Казань, РФ	86
Сравнение начальных распределений давления при моделировании ударной волны оптического пробоя на поверхности	90
Саттаров А.Г.¹, Сочнев А.В.¹, Зиганшин Б.Р.¹ ¹КНИТУ-КАИ, Казань, Россия	
Модель и дифракция на цилиндрических оцк решетках нанопроволок и элементов наноэлектроники, синтезированных на нанотрубках	94
Халитов З.Я. ¹ , Файзуллин Р.Р. ² , Одинцов В.Л. ¹ , Кокшевская В.А. ²	
¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ., Казань, Россия	
Влияние сверхзвукового потока газа на тлеющий разряд	98
Тимеркаев Б.А.¹, Шамсутдинов Р.С.¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, РФ	
Синтез карбида кремния в утопленном в мазут дуговом разряде	102
Тимеркаев Б.А. ¹ , Фельцингер В.С. ¹ , Ахметвалеева А.Р. ¹ , Зайнутдинова Д.А. ¹ , Залялиева А.А. ¹ , Даутов Г.Ю. ¹ , Абрамова ¹ <i>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия</i>	
Синтез наноалмазов и углеродных нанотрубок в кремниево - аргоновой дуге	106
Тимеркаев Б.А. ¹ , Шайхаттаров Р.Р. ¹ , Геворгян Р.К. ¹ , Ибрагимов И.С. ¹ , Ахметвалеева А.Р. ¹ , Курбангалеев Р. ¹ ¹ КНИТУ-КАИ, Казань, Россия	
Плазмохимический синтез нанотрубок из оксида цинка	110
Тимеркаев Б.А. ¹ , Фельцингер В.С. ¹ , Калеева А.А. ¹ , Эрлингайте Е.А. ¹ , Уктамов Ж.А. ¹ , Нуриддинов Х.С. ¹ 1КНИТУ-КАИ, Казань, Россия	

Плазмохимический синтез германиевых нанотрубок	113
Тимеркаев Б.А. ¹ , Калеева А.А. ¹ , Фельцингер В.С. ¹ , Залялиева А.А. ¹ , Сулейманов Р.М. ¹ , Ибрагимов И.С. ¹ , Сорокина А.Р. ¹ , Ахметвалеева А.Р. ¹ <i>¹КНИТУ-КАИ, Казань, Россия</i>	
Синтез кремниевых сферических	117
наноструктур в аргоновой плазме	
Тимеркаев Б.А. ¹ , Фельцингер В.С. ¹ , Геворгян Р.К. ¹ , Шайхатторов Р.Р. ¹ , Калеева А.А. ¹ ¹ КНИТУ-КАИ, Казань, Россия	
Микро-дуговой способ синтеза наноструктур кремния	120
Калеева А.А. ¹ , Тимеркаев Б.А. ¹ , Шамсутдинов Р.С. ¹ , Сайфутдинов А.И. ¹ , Шакиров Б.Р.1	
¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ	
Плазменно- дуговое получение кремниевых	124
покрытий	
Калеева А.А. ¹ , Тимеркаев Б.А. ¹ , Петрова О.А. ¹ , Шамсутдинов Р.С. ¹ , Даутов И.Г. ¹ , Мастюгин А.В. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ	
Синтез германиевых наноструктур в	128
аргоновой дуге	
Тимеркаев Б.А. ¹ , Калеева А.А. ¹ , Петрова О.А. ¹ , Чуманов Н.А. ¹ , Сорокина А.Р. ¹ , Ибрагимов И.С. ¹ , Сайфутдинов А.И. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ	
Расчет условий поддержания ВЧИ-разряда с	132
использованием самосогласованной модели Желтухин В.С. ^{1,2} , Терентьев Т.Н. ¹ , Шемахин А.Ю. ¹ , Самсонова Е.С. ¹	
¹ Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия	
² Казанский Национальный Исследовательский Технологический Университет, Казань, Россия	
Динамика импульсных-сфокусированных	136
микроволновых разрядов в молекулярных газах	
Сайфутдинов А.И. ¹ , Кустова Е.В. ² ¹ КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия ² СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия ₂₀₇	

Обработка изделий импульсным лазерным излучением	140
Хайруллина Л.Р.¹˚, Смородин Ф.К.¹ ¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия	
Особенности лазерной сварки чугунов со сталями	142
Звездин В.В. ¹ , Рахимов Р.Р. ¹ , Хисамутдинов Р.М. ¹ , Саубанов Р.Р. ¹ , Портнов С.М. ¹ ¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия	
Плазмохимический реактор для синтеза и модификации порошковых материалов для аддитивных технологий	146
Нагулин К.Ю. 1 , Назаров Р. 1 , Гайсина А.Р. 1 , Гильмутдинов А.Х. 1 <i>КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия</i>	
Синтез структурно-градиентных порошковых материалов в индуктивно-связанной плазме	149
Нагулин К.Ю. ¹ , Морозов М.В. ¹ , Гайсина А.Р. ¹ , Назаров Р. ¹ , Гильмутдинов А.Х. ¹ ¹ КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия	
Плазменная переработка отходов машиностроительных производств с целью создания порошковых материалов для аддитивного производства.	152
Нагулин К.Ю. 1 , Назаров Р. 1 , Гайсина А.Р. 1 , Гильмутдинов А.Х. 1 1 КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия	
К поиску оптимального режима плазменной полировки поверхности деталей	156
сельскохозяйственных машин при	
использовании разряда с жидким катодом.	
Тазмеев Б.Х. ¹ , Цыбулевский В.В. ¹ , Тазмеев Г.Х. ² ¹ Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия ² Казанский федеральный университет,	
Набережночелнинский институт, Набережные Челны,	

Исследование никелевых покрытий методами оптической и электронной микроскопии	159
Морозов М.В. ¹ , Дробышев С.В. ¹ , Газизулин А.Ф. ¹ , Нагулин К.Ю. ¹ , Гильмутдинов А.Х. ¹ ***********************************	
Моделирование электрических характеристик положительного столба продольного тлеющего разряда в плоском канале с дополнительным вдувом газа через боковую стенку Галеев И.Г. ¹ , Асадуллин Т.Я. ¹ , Цыбиков Р.О. ¹	161
талесь илг., деадуллип т.л., цысиков т.с.	
Плазменное напыление покрытий на основе порошка оксида алюминия	165
Калеева А.А. ¹ , Даутов И.Г. ¹ , Сорокина А.Р. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ	
Особенности газового разряда с жидким электролитным катодом в протяженном разрядном промежутке	167
Тазмеев Х.К.¹, Тазмеев А.Х.¹ ¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия	
Численное исследование параметров плазмохимического реактора на основе микродугового разряда для синтеза нанокристаллов германия Сайфутдинов А.И. ¹ , Сорокина А.Р., Абдуллин А., Тимеркаев	169
Б.А. КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия	
Моделирование плазменного реактора на основе свч-разряда атмосферного давления для синтеза наноструктур. Напалков О.Г.¹, Сайфутдинов А.И.¹, Тимеркаев Б.А.¹	173
1KHMTV KAM UM A H TVDODBOO KOOOUL POOCUD	

Экспериментальное исследование воздействия электрического разряда на углеродное волокно Закиров Д.У.¹, Каюмов Р.Р.¹, Хазеев Х.И.¹ ¹КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, Казань, Россия	174
Моделирование генератора неравновесной атмосферной плазмы на основе коронного разряда Сайфутдинова А.А.¹, Сайфутдинов А.И.¹, Гайнуллина С.В.¹, Тимеркаев Б.А.² 1// КНИТУ-КАИ им.А.Н. Туполева, Казань, Россия	176
Влияние электролитической плазмы на износостойкость высокоуглеродистого сплава железа Хафизов А.А. ¹ , Валиев Р.И. ¹ , Валиев Р.А. ¹ , Шакиров Ю.И. ¹ ¹ Казанский федеральный университет, Набережные Челны, Россия	180
Газоразрядный синтез наноструктур вольфрама и его производных А.О. Софроницкий ¹ , И.И. Файрушин ^{1, 2, 3} ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия ² Казанский федеральный университет, Казань, Россия ³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия	183
Детектирование примесей углеводородов в разряде с полым катодом в гелии Сайфутдинов А.И., Ахмедова Р.Р., Кудрявцев А.А. ¹ КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева, Казань, Россия ² СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия	185
О влиянии крупномасштабных возмущений поверхности жидкого электролитного катода на свойства газового разряда Тазмеев А.Х.¹, Тазмеева Р.Н.¹ ¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия	186

Эффект полярности электродов на развитие пробоя в проводящей воде с микропузырьками	188
Панов В.А. ¹ , Василяк Л.М. ¹ , Ветчинин С.П. ¹ , Печеркин В.Я. ¹ , Куликов Ю.М. ¹ , Савельев А.С. ¹ 10ИВТ РАН, Москеа, Россия	
Вопросы формирования базы знаний	189
результатов исследований исследований	
наноструктурированных материалов	
Асадуллин Т.Я.¹, Галеев И.Г.¹, Сайфутдинов А.И.¹ ¹Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполев - КАИ, Казань, Россия	
Возможности применения базы знаний для	191
исследований получения наноматериалов	101
Асадуллин Т.Я.¹, Галеев И.Г.¹, Сайфутдинов А.И.¹ ¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия	
Кинетика возбуждения спинов в	192
парамагнетике импульсом свч поля	
Асадуллина Н.Я. ¹ , Асадуллин Т.Я. ¹ ¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия	
Коэффициент массопереноса рутениевого катализатора	196
Холиков М.М. ¹ , Сафаров М.М. ² , Джураев Д.С. ¹ , Тиллоева Т.Р. ³ ¹ Политехнический институт Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими в городе Худжанде, Худжанд, Таджикистан	
² Таджикский технический университет имени акад.	
М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан ³ Филиал МЭИ в городе Душанбе, Душанбе, Таджикистан	
Влияние углеродных нанотрубок на изменение удельной теплоемкости изобутана	197
Сафаров М.М. ¹ , Джумаев С.С. ²	
¹ Таджикский технический университет имени акад.	
М.С.Осими, Душанбе, Таджикистан ² Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии	
НАНТ. Душанбе. Таджикистан	

Спектроскопия поверхностного слоя плазмы с 198 жидким катодом Гизатуллина Ф.А.¹, Калеева А.А.¹, Сорокина А.Р.¹ 1Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ Пульсации электрических параметров 200 тлеющего разряда Юнусов Р.Ф.¹

для заметок

Научное издание

І ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

Отпечатано с готового оригинал-макета

Выпускающий редактор Г. А. Кайнова

Подписано в печать 31.12.2020. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 12,55. Тираж 100 экз. Заказ 1233.

Издательство «Бук». 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25. Отпечатано в издательстве «Бук»