
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Российская академия наук
Научный совет РАН по проблеме «Физика низкотемпературной плазмы»
Ивановский государственный химико-технологический университет
Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН
Институт химии растворов РАН
Объединенное физическое общество Российской Федерации
Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева

300-летию Российской академии наук посвящается

**X Международный симпозиум
по теоретической и прикладной
плазмохимии**

**XVII Школа по плазмохимии для молодых
ученых России и стран СНГ**

9 – 13 сентября 2024 г., Иваново, Россия

СБОРНИК ТРУДОВ

Иваново 2024

УДК 533.9 + 541.1

Proceedings of the X International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (September 9–13, 2024. Ivanovo, Russia). Published by Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia, 2024 - 120 p.

X Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. (9 – 13 сентября 2024 г., Иваново, Россия): сборник трудов/ Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2024. – 120 с.

Сборник содержит тезисы пленарных, секционных и стендовых докладов, представленных на X Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии и 17-ой Школе по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ по следующим направлениям:

- **КИНЕТИКА, ТЕРМОДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ**
- **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**
- **ПОРОШКИ, ПЛЕНКИ, ПОКРЫТИЯ, МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ В ПЛАЗМЕ (ВКЛЮЧАЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ), СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ. ПЛАЗМЕННАЯ МЕДИЦИНА И БИОЛОГИЯ**
- **ОРГАНИЧЕСКИЙ И НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГАЗОФАЗНЫХ И ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ**
- **ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИКА РЕАГИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ**
- **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТОСТРОЕНИЕ**

Материалы представляют интерес для специалистов, работающих в области плазмохимии, а также для преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Материалы публикуются в авторской редакции

Составители сборника: Смирнов С.А.

© Ивановский государственный
химико-технологический университет, 2024

ISBN 978-5-6051371-3-9

Пленарные доклады

**ЛЕКЦИИ ШКОЛЫ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ**

Возможности глубокого плазменного травления кремния для создания интегральных конденсаторов высокой емкости

Possibilities of deep plasma silicon etching for formation high-capacity integrated capacitors

Мяконьких А.В., Руденко К.В.

Miakonkikh A.V., Rudenko K.V.

*Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук
117218, г. Москва, Нахимовский проспект, 36/1, E-mail: miakonkikh@ftian.ru*

The results of a study of promising etching technologies for the formation of trench integrated capacitors with high specific capacitance per unit of crystal surface are presented. Particular attention is paid to the technology of cryogenic etching of silicon, which makes it possible to obtain structures with a high aspect ratio and low roughness.

Широкое практическое применение процессы плазмохимического глубокого травления кремния нашли, в первую очередь, для формирования изолирующих и конденсаторных структур в микроэлектронике. В процессе увеличения плотности размещения ячеек динамической памяти (DRAM) на чипе, возникла необходимость в конденсаторах, формируемым в глубоких тренчах. Фактором, определяющим глубину канавки в ходе дальнейшей миниатюризации, являлась необходимость поддерживать емкость конденсаторов на уровне 25–30 фФ на ячейку при уменьшающейся занимаемой площади по мере миниатюризации СБИС, что привело к росту аспектного отношения тренчей вплоть до 80–100 [1], и потребовало непрерывного совершенствования процессов глубокого травления. Ещё одним направлением развития этой технологии является создание интегрированных 3D конденсаторных структур с емкостью вплоть до 1 мкФ/мм² и рабочими напряжением до 16 В [2], которое позволит размещать источники питания непосредственно на чипе в рамках концепции System-in-Package.

Особенностью глубокого анизотропного травления кремния является необходимость значительного уровня пассивации боковых стенок формируемого рельефа, которая может достигаться высаживанием фторуглеродного полимера (Bosch-процесс), либо снижением летучести пассивирующего слоя при низких температурах (криогенный процесс). Последний обладает рядом очевидных преимуществ из-за использования неполимеробразующей плазмы, но значительно слабее изучен как в теоретическом, так и в технологическом аспектах. В докладе будут представлены теоретические и экспериментальные результаты, относящиеся к травлению кремния в смеси SF₆/O₂ при криогенных температурах.

Экспериментальное исследование было выполнено для прямолинейных тренчей, контроль профиля тренча и шероховатости выполнялся методами сканирующей электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии, интерференционной профилометрии. Были получены значения шероховатости боковой стенки, не превышающие 10 нм при глубине травления до 20 мкм и отклонении профиля от вертикальности не более чем на 0,5°.

В докладе также будут приведены результаты моделирования профиля и глубины травления для структур различной топологии, полученные при моделировании с использованием трехмерного метода ячеек в подходе Монте-Карло. Для определения потоков активных частиц (радикалы кислорода и фтора, ионы) была выполнена диагностика плазмы с использованием методов зонда Ленгмюра и оптической эмиссионной спектроскопии. Полученные результаты использованы для оптимизации процесса травления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-69-00039, <https://rscf.ru/project/24-69-00039/>.

Библиографический список

1. Lee, C. G. N. The Grand Challenges of Plasma Etching: a Manufacturing Perspective / C. G. N. Lee, K. J. Kanarik, R. A. Gottscho // Journal of Physics D: Applied Physics. 2014. Vol. 47, no. 27. P. 273001. DOI: 10.1088/0022-3727/47/27/273001.
2. Three-Dimensional Silicon-Integrated Capacitor with Unprecedented Areal Capacitance for On-Chip Energy Storage / L. Strambini [et al.] // Nano Energy. 2020. Vol. 68, P. 104281. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104281.

Формирование протяженной трубчатой плазмы в аргоне при низком давлении и в слабом продольном магнитном поле

Formation of an extended tubular plasma in argon at low pressure and in a weak longitudinal magnetic field

Акишев Ю.С.,

Бахтин В.П., Булейко А.Б., Лоза О.Т., Петряков А.В., Раваев А.А., Фефелова Е.С.
Akishev Yu.S., Bakhtin V.P., Buleyko A.B., Loza O.T., Petryakov A.V., Ravaev A.A., Fefelova E.S.

АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Москва, Троицк, ул. Пушкиновых владение 12, e-mail: akishev@triniti.ru

В последнее время проявляется интерес к источникам СВЧ излучения на основе плазменного лазера. Плазменный лазер представляет собой устройство, в котором СВЧ излучение возникает в результате черенковского взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с протяженной трубчатой плазмой, создаваемой в разреженном инертном газе при давлении $P = 10^{-2} - 10^{-3}$ Торр. Для формирования трубчатой плазмы обычно применяется термоэмиссионный катод, проблемой которого является невысокий ресурс работы. Другая проблема связана с необходимостью изоляции трубчатой плазмы от близко расположенной металлической стенки лазера. Обычно для этой цели используется сильное продольное магнитное поле с индукцией в несколько Тесла, что требует очень больших токов для создания такого поля и потому снижает энергетическую эффективность лазера в целом.

В докладе изложены результаты экспериментальных исследований формирования и последующей эволюции протяженной ($l = 300$ мм) и тонкостенной ($\Delta r \approx 10$ мм) трубчатой ($2r \approx 110$ мм) плазмы в слабом продольном магнитном поле ($B = 175$ Гс) без использования термоэмиссионного катода. Цилиндрическая камера, в которой формировалась трубчатая плазма, прокачивалась аргоном высокой чистоты (99.998%) со скоростью около 1 м/с при давлении $P = 10^{-3} - 10^{-2}$ Торр. Использовалась электродная система с секционированными катодами. Для инициирования ионизационных лавин, формирующих плазму, необходимо наличие затравочных электронов в зоне разряда. Применялись два способа создания затравочных электронов. В первом способе использовался вспомогательный импульсный разряд, предшествующий подаче высокого напряжения основного разряда, который создавал предионизирующую плазму в небольшой области вокруг секционированных катодов. Во втором способе затравочные электроны создавались во всей рабочей зоне разрядной камеры ВЧ разрядом с частотой 85 кГц и длительностью около одной секунды.

Высокоскоростная съемка 4-кадровой ICCD камерой позволила установить динамику формирования разряда на всех его стадиях. Установлено различие в динамике пробоя, завершающегося формированием трубчатой плазмы, определяемое способом создания затравочных электронов. Проведены измерения продольного и радиального тока разряда, формирующего трубчатую плазму. Полученные результаты показали возможность создания протяженной трубчатой плазмы без использования термокатаода и сильного магнитного поля при приемлемой однородности плазмы и ее пространственной изоляции от близкорасположенной металлической стенки разрядной камеры.

Каталитические плазменные процессы в технологии наноэлектроники

Catalytic plasma processes in nanoelectronics technology

Амиров И.И.

Amirov I.I.

*Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН
1500067, г. Ярославль, ул. Университетская, д. 21, E-mail: ildamirov@yandex.ru*

The review of works devoted to the study of plasma catalytic processes used in nanoelectronics technology is given. These are plasma catalytic processes for the synthesis of nanomaterials, carbon nanotubes, graphene, and catalytic etching processes of silicon. Synergetic processes in plasma-catalyst systems and the advantages of plasma catalysis over "traditional" catalysis are considered. Plasma catalytic processes of CO₂ conversion, ammonia production and other gas-phase reactions are briefly described.

Среди новых нетрадиционных каталитических систем особое внимание привлекают плазменные каталитические системы [1]. Каталитические реакции, осуществляемые в плазме, происходят с более высокой скоростью и эффективностью. Большой интерес представляет плазменный катализ в области конверсии газов, таких как превращение CO₂, CH₄, синтеза NH₃ [2]. Было показано, что в плазменном каталитическом процессе реализуется синергетический эффект, при котором результат выше, чем сумма обоих процессов по отдельности [2]. В обзоре будут кратко приведены примеры таких плазменных каталитических процессов. Более подробно будут рассмотрены плазменные каталитические процессы синтеза наноматериалов, углеродных нанотрубок (УНТ), графена, которые являются перспективными материалами наноэлектроники [3]. Будут рассмотрены преимущества плазмокатализа (ПК) их роста по сравнению с термическим каталитическим процессом. Рассмотрены факторы, влияющие на рост углеродных нанотрубок в ПК процессе, а также механизм роста УНТ, влияния ионов на этот процесс, электронные эффекты, возникающие в плазмокаталитических системах [4]. Подробно будут рассмотрены процессы плазмохимического каталитического осаждения графена с использованием Ni и Cu в качестве катализаторов их отличие от термических каталитических процессов, эффекты ПК роста многослойных графеновых пленок. Так взаимодействие между плазмой и растворяющим углерод никелевым катализатором способствует выращиванию графеновых пленок на поверхности SiO₂, что невозможно в случае термического осаждения. Ионная бомбардировка поверхности стимулирует проникновение атомов углерода через пленку Ni, обеспечивая образование зародышей графеновых пленок на границе раздела между пленкой Ni и подложкой SiO₂. В случае термического каталитического осаждения происходит испарение нанопленки никеля. Будет рассмотрен также каталитический процесс травления кремния в плазме SF₆ пониженного давления, который широко используется в микротехнологии.

Библиографический список

1. Bogaerts A., Centi G., Hessel V., Rebrov. E. // *Catalysis Today* **2023**. 420. P. 114180.
2. Bogaerts A., Xin Tu X., Whitehead J.C., Centi G., Leon Lefferts L., Guaitella O., et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2020**. V. 53. P. 443001.
3. Neyts E, Ostrikov K., Sunkara M.K., Bogaerts A. // *Chemical reviews*. **2015**. 115. 24. P. 13408.
4. Zhang S., Oehrlein G.S. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2021**. V.54. P. 213001.

Плазмохимическое получение ацетилена из углеводородного сырья

Plasma chemical production of acetylene from hydrocarbon feedstock

Билера И.В., Лебедев Ю.А.

Bilera I.V., Lebedev Yu.A.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН
119991, г. Москва, Ленинский проспект, 29, E-mail: bilera@ips.ac.ru*

Acetylene and its homologues have great potential for the production of various valuable substances, and interest in the industrial production and application of acetylene is currently growing. The reaction of acetylene production from methane and other hydrocarbon feedstocks in thermal plasma is considered in a historical context with the involvement of information on acetylene production in industry.

Ацетилен – простейший углеводород с тройной углерод-углеродной связью — находит широкое применение в химической промышленности, в резке и сварке металлов, в строительстве и в других отраслях. До конца 60-х годов XX в. ацетилен оставался ключевым компонентом в основном органическом синтезе, но затем на первые роли выдвинулись олефины, в первую очередь этилен. За более чем 120-летнюю историю промышленного производства ацетилена было предложено множество способов его получения, но к началу XXI в. из всего разнообразия методов экономически оправданными остались всего три. Это – карбидный метод по реакции карбида кальция с водой, а также окислительный пиролиз и разложение в электрической дуге углеводородного сырья. Другой электрофизический метод получения ацетилена – пиролиз углеводородного сырья в струе плазмы водорода – был доведен фирмами Хэст и Хьюлс до успешных испытаний в промышленном масштабе на двух установках, однако на практике не был использован по экономическим причинам [1].

Традиционное сырье промышленного производства ацетилена при окислительном пиролизе и в электродуговом процессе – это метансодержащие газы природного происхождения, такие как природный газ, и газы промышленного происхождения – нефтезаводские газы и так далее. Целевые продукты реакции разложения метана – ацетилен и водород. Для количественного протекания этой реакции ее необходимо осуществлять при высоких температурах, в результате существенным становится протекание побочных реакций, приводящих к образованию продуктов, как полезных, например, диацетилен и другие гомологи ацетилена, так и нежелательных, например, сажа.

Ацетилен и его гомологи обладают большим потенциалом для получения различных ценных веществ, и в настоящее время интерес к промышленному производству и применению ацетилена растет. Для увеличения потребления ацетилена необходимо снижение стоимости его производства относительно стоимости производства этилена. Улучшению экономики производства ацетилена из углеводородного сырья будет способствовать использование побочных продуктов, например, водорода и синтез-газа, высших гомологов ацетилена. В связи с этим становится актуальной задача разработки новых, экономически эффективных вариантов производства ацетилена и подготовка компактных кинетических механизмов, пригодных для моделирования образования ацетилена, других углеводородов и сажи при конверсии углеводородов, и в первую очередь, метана [2].

Реакция получения ацетилена из метана и другого углеводородного сырья в термической плазме, рассмотрена в историческом контексте с привлечением сведений о получении ацетилена в промышленности.

Работа выполнена по Государственному заданию ИНХС РАН.

Библиографический список

1. Билера И. В., Лебедев Ю.А. // *Нефтехимия* **2022**. Т. 62. С. 154.
2. Bilera I. V., Lebedev Yu. A., Titov A. Yu., Epshtein I. L. // *High Energy Chemistry* **2024**. V. 58. P. 332.

Наночастицы из сплавов Cu-Ni – перспективные материалы для нанотехнологий

Nanoparticles from Cu-Ni alloys are promising materials for nanotechnology

Лелевкин В.М., Молдосанов К.А., Кайрыев Н.Ж.

Lelevkin V.M., Moldosanov K.A., Kairyev N.Z.

*Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина,
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44, Кыргызстан, E-mail: kamil.moldosanov@mail.ru*

Alloys of copper and nickel form a continuous series of solid solutions. Hence, thanks to the ability to regulate the density of states of electrons near the Fermi level by changing the alloy composition, it turns out to be possible to vary the electron mean free path l . This circumstance, in the case of using these alloys in the form of nanoparticles, makes it possible to implement a number of promising applications. Nanoparticles with diameter $D > l$ can be used in the following fields:

1. Broadband radar-absorbent materials (stealth technologies) [1];
2. Terahertz-to-infrared converters for visualizing sources of terahertz radiation [2];
3. Solar collectors for “green” technologies (heating of living space and water for domestic needs) [3].

And nanoparticles of the Cu-Ni alloy, in which the condition $D < l$ is realized, can find application in solid rocket fuel as catalysts for reducing the temperature of thermal decomposition of the oxidizer – ammonium perchlorate, which would increase the fuel combustion rate and, consequently, increase jet thrust.

Сплавы меди и никеля образуют непрерывный ряд твердых растворов. При этом, благодаря возможности изменяя состав сплава регулировать плотность состояний электронов вблизи уровня Ферми, оказывается возможным варьировать среднюю длину свободного пробега электронов l . Это обстоятельство, в случае использования этих сплавов в виде наночастиц, позволяет реализовать ряд перспективных приложений. Наночастицы с диаметром $D > l$ могут найти применение в следующих задачах:

1. Широкополосные радиопоглощающие материалы (технологии «стелс») [1];
2. Терагерц-инфракрасные конвертеры для визуализации источников терагерцевого излучения [2];
3. Солнечные коллекторы для «зелёных» технологий (обогрев помещений и нагрев воды для бытовых нужд) [3].

А наночастицы сплава Cu-Ni, в которых реализуется условие $D < l$, могут найти применение в твердом ракетном топливе как катализаторы снижения температур термического разложения окислителя – перхлората аммония, что позволило бы повысить скорость горения топлива и, следовательно, увеличить реактивную тягу.

Библиографический список

1. Молдосанов К.А., Лелевкин В.М., Широкополосное электромагнитное поглощающее покрытие. Патент Российской Федерации RU 2750215 С1. Опубликовано: 24.06.2021.
2. Moldosanov K., Bykov A., Kairyev N., Khodzitsky M., Kropotov G., Lelevkin V., Meglinski I., Postnikov A., and Shakhmin A., Terahertz-to-infrared converters for imaging the human skin cancer: challenges and feasibility, *Journal of Medical Imaging*, 10(2), 023501-1 (2023). doi: 10.1117/1.JMI.10.2.023501
3. Moldosanov K.A., Kashirin V.A., Skrynnikov A.M., Anisimova I.A., Anisimov V.P., and Kobtsov G.A., Black Coatings for Stray Light and Thermal Control Applications, in: “Solar and Switching Materials”, Carl M. Lampert, Claes-Goeran Granqvist, and Keith L. Lewis; Eds., *Proceedings of SPIE*, 4458, 87-94 (2001). doi: 10.1117/12.448262

Активация жидких сред с помощью низкотемпературной плазмы для биологических приложений: физика и техника эксперимента

Activation of liquid media using low-temperature plasma for biological applications:
physics and experimental techniques

Кончечков Е.М.^{1,2}, Гусейн-заде Н.Г.¹, Яныкин Д.В.¹, Колик Л.В.¹, Данилейко Ю.К.¹,
Луканин В.И.¹, Сергейчев К.Ф.¹, Моряков И.В.¹, Борзосек В.Д.^{1,2}, Гудкова В.В.^{1,2},
Асташев М.Е.¹, Гудков С.В.¹

Konchekov E.M., Gusein-zade N.G., Yanykin D.V., Kolik L.V., Danileiko Yu.K., Lukanin V.I., Sergeichev K.F., Moryakov I.V., Borzosekov V.D., Gudkova V.V., Astashev M.E., Gudkov S.V.

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38, E-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

2- Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В настоящее время важным направлением исследований в мире является поиск новых нехимических методов для ускорения прорастания семян, улучшения роста и развития растений, а также повышения их устойчивости к абиотическим и биотическим стрессовым факторам. В последние годы наблюдается значительное внимание к перспективным результатам использования физического метода воздействия на биологические объекты, такого как низкотемпературная плазма (НТП), что активно отражается в научной литературе. Тем не менее, в связи со сложностями в масштабировании источников НТП и получении стабильного и воспроизводимого результата обработки, внедрение в реальное сельское хозяйство генераторов НТП с прямым воздействием на растения и семена затруднительно и требует междисциплинарных исследований в областях физики, химии и биологии. Альтернативным и более легко масштабируемым подходом к использованию низкотемпературной плазмы в биологических задачах является производство плазменно-активированной воды (ПАВ) или солевых растворов (ПАР) с её последующим использованием для обработки биологических объектов.

В докладе представлен обзор источников НТП, разработанных в Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, и применяющихся в исследованиях как прямого воздействия НТП на биологические объекты, так и опосредованного (с помощью ПАВ и ПАР). Представлены результаты междисциплинарных исследований за последние годы как в решении агроинженерных задач, так и медицинских [1-10].

Публикация выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

Библиографический список

1. Gudkov S.V., Sarimov R.M., Astashev M.E., et al. // *Phys. Usp.* **2024**. V. 67, P. 194.
2. Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E., et al. // *IJMS* **2023**. V. 24. P. 15093.
3. Konchekov E.M., Gudkova V.V., Burmistrov D.E., et al. // *Biomolecules* **2024**. V. 14. P. 181.
4. Kuzin A.I., Kashirskaya N.Ya., Solovchenko A.E., et al. // *Horticulturae* **2024**. V. 10. P. 55.
5. Danileiko Y.K., Belov S.V., Egorov A.B., et al. // *Horticulturae* **2023**. V. 9. P. 1142.
6. Kuzin A., Solovchenko A., Khort D., et al. // *Plants* **2023**. V. 12. P. 385.
7. Ashurov M.Kh., Ashurov E.M., Astashev M.E. et al. // *ChemEngineering* **2022**. V. 6. P. 91.
8. Konchekov E.M., Kolik L.V., Danilejko Y.K. et al. // *Plants* **2022**. V. 11. P. 1373.
9. Belov S.V., Danileiko Y.K., Egorov A.B. et al. // *Processes* **2022**. V. 10. P. 1536.
10. Pavlik T., Gudkova V., Razvolyaeva D. et al. // *IJMS* **2023**. V. 24. P. 5100.

Воздействие низкотемпературной плазмы на сверхвысокомолекулярный полиэтилен и области его применения

The influence of low-temperature plasma on ultra-high molecular weight polyethylene and its application areas

Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А., Озерин А.Н.

Piskarev M.S., Gilman A.B., Kuznetsov A.A., Ozerin A.N.

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН
г. Москва, Профсоюзная улица, 70, E-mail: mikhailpiskarev@gmail.com*

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is characterized by high mechanical properties, resistance to aggressive chemicals, low water absorption, low coefficient of friction and high abrasion resistance. These properties determine the use of UHMWPE in many fields of technology, and in recent years in medicine and biology, including in the manufacture of artificial joints and implants in surgery and orthodontics. Currently, UHMWPE is produced on a large scale under various brand names. It should be noted that the polymer surface is hydrophobic and for many areas of applications, its contact and adhesive properties require significant improvement. One of the most promising, technologically advanced and environmentally friendly methods for modification the surface of UHMWPE is the effect of low-temperature plasma. This method leads to a significant improvement in contact, adhesion and tribological properties, which is associated with changes in the chemical composition and morphological structure of the polymer surface [1, 2]. Using X-ray photoelectron spectroscopy and IR spectroscopy, it was shown that a significant amount of new oxygen-containing groups are formed on the surface of UHMWPE. Using the method of atomic force microscopy, a change in the average and root-mean-square roughness of the polymer surface was also determined.

The use of the plasma-chemical method of modification is ensured by the production of the necessary industrial equipment.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) характеризуется высокими механическими свойствами, стойкостью к агрессивным химическим веществам, низким водопоглощением, низким коэффициентом трения и высокой устойчивостью к истиранию. Эти свойства определяют использование СВМПЭ во многих областях техники, а в последние годы в медицине и биологии, в том числе при изготовлении искусственных суставов и имплантатов в хирургии и ортодонтии. В настоящее время СВМПЭ выпускается в значительных масштабах под различными торговыми марками. Следует отметить, что поверхность полимера является гидрофобной и для многих областей применения его контактные и адгезионные свойства требуют существенного улучшения. Одним из наиболее перспективных, технологичных и экологически чистых методов модифицирования поверхности СВМПЭ является воздействие низкотемпературной плазмы. Этот метод приводит к существенному улучшению контактных, адгезионных и трибологических свойств, что связано с изменениями химического состава и морфологической структуры поверхности полимера [1,2]. Методами рентгенофотоэлектронной спектроскопии и ИК-спектроскопии было показано, что на поверхности СВМПЭ образуется значительное количество новых кислородсодержащих групп. С помощью метода атомно-силовой микроскопии было также установлено изменение средней и средне-квадратичной шероховатости поверхности полимера.

Использование плазмохимического метода модифицирования обеспечено выпуском необходимого промышленного оборудования.

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации, номер темы FFSM-2024-0002.

Библиографический список

1. Гильман А. Б., Пискарев М. С., Кузнецов А. А., Озерин А. Н. // Химия высоких энергий. **2017**. Т. 51. С. 147.
2. Гильман А. Б., Кузнецов А. А., Озерин А. Н. // Известия Академии Наук, Серия Химическая. 2017. № 4. С. 577.

Особенности плазмохимического синтеза наночастиц Cu/Графен: эксперимент и компьютерное моделирование

Features of plasma-chemical synthesis of Cu-Graphene nanoparticles: experiment and computer modeling

Шавелкина М.Б.^{a*}, Крылова К.А.^{b,c}, Баймова Ю.А.^{b,d}, Кавыршин Д.И.^a
Shavelkina M.B., Krylova K.A., Baimova J.A., Kavyrshin D.I.

^a*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, 125412, Russia E-mail: mshavelkina@gmail.com*

^b*Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, Khalturina St. 39, Ufa, 450001, Russia*

^c*Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, Kosmonavtov st.1, Ufa, 450064, Russia*

^d*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, st. Zaki Validi, 32, Ufa, 450076, Russia*

Сочетание эксперимента и компьютерного моделирования позволили исследовать особенности процесса синтеза композитных наночастиц Cu / графен. Наночастицы синтезированы при пиролизе пропан-бутановой смеси в плазменной струе гелия, генерируемой плазмотроном постоянного тока. Физико-химическими методами установлено, что наночастица представляет собой графен, декорированный медью. Методом молекулярной динамики изучено взаимодействие между атомами меди и поверхностью графена в потоке плазмы.

The combination of experiment and computer modeling made it possible to study the features of the synthesis process of Cu/graphene composite nanoparticles. Nanoparticles were synthesized by pyrolysis of a propane-butane mixture in a helium plasma jet generated by a DC plasma torch. Using physicochemical methods, it was established that the nanoparticle is graphene decorated with copper. The interaction between copper atoms and the graphene surface in a plasma flow was studied using molecular dynamics simulation.

Проведена серия экспериментов в плазмохимическом реакторе по конверсии пропан-бутановой смеси в гелиевой плазме при давлении 350 Торр. В результате были получены композитные наночастицы, представляющие собой чешуйки графена с вкраплениями из медных доменов. Показано, что концентрация меди в композите зависит от скорости расхода плазмообразующей смеси и мощности плазмотрона постоянного тока. Установлена корреляция между данными параметрами и концентрацией заряженных частиц меди в высокотемпературной области плазменного потока.

Для изучения на атомарном уровне механизма образования композитных наночастиц Cu/графен в струе медьсодержащей плазмы применялся метод молекулярно-динамического моделирования (МД моделирование). Моделирование проводилось в свободно распространяемом программном пакете LAMMPS [1]. Показано, что возможно три типа взаимодействия между наночастицами меди и чешуйками графена в зависимости от скорости движения наночастицы. В области конденсации углерода (2500-3500K [2]), когда скорость частицы меди менее 1 км/с, происходит ее прилипание к поверхности чешуйки графена, а затем скручивание в нее. Этот результат согласуется с морфологией полученных наночастиц Cu / графен и рентгеноспектральным микроанализом.

Библиографический список

1. Thompson A.P., et al // *J. Comput. Phys.* **2022**. V.271. article id. 108171.
2. Shavelkina M. B., Ivanov P. P., Vocharov A. N., Amirov R. Kh. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2019**. V. 52. Issue 49. P.495202.

Плазмохимические процессы с применением высокочастотных разрядов пониженного давления для формирования диффузионных покрытий

Plasma-chemical processes using high-frequency low-pressure discharges for the formation of diffusion coatings

Абдуллин И.Ш.*, Миронов С.В., Некрасов И.К.****

Abdullin I.Sh., Mironov S.V., Nekrasov I.K.

* ООО «Плазма-ВСТ» 420080 г. Казань ул. Курская 27, оф. 1000 e-mail: 2960091@mail.ru

** Казанский (Приволжский) федеральный университет 420008 г. Казань, ул. Кремлевская, 18, e-mail: igor05071997@mail.ru

An effect of a low-pressure radio frequency inductively coupled discharge on the physical and mechanical characteristics of diffusion coatings is examined.

Известно, что плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей позволяет насыщать их атомами плазмообразующих газов [1]. В настоящее время проблема повышения стойкости изделий машиностроения приобретает все большее значение в связи с повышающимися требованиями к надежности, долговечности и к их сроку службы. Это связано с тем, достижения требуемых показателей качества во много определяются состоянием поверхностного слоя. Поэтому разработка новых плазмохимических процессов и совершенствование имеющихся с целью создания диффузионных покрытий является актуальной задачей. В работе представлены результаты воздействия потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы ВЧИ разряда пониженного давления на изделия различных марок сталей: 08X18T1, 12X18H10T и 40X13. При варьировании режимов плазменной обработки: в качестве плазмообразующих газов применялись азот, углекислый газ, воздух, кислород, аргон и их смеси. Энергия ионов от 30 до 50 эВ, плотность ионного тока от 1,5 до 15 А/м², давление в вакуумной камере от 13,3 до 130 Па, частота генератора – 1,76 МГц, длительность обработки от 1 до 30 минут, расстояние от базовой плиты вакуумной камеры до образца – от 30 до 100 мм. Установлено, что в условиях знакопеременных нагрузок, за счет сформированных диффузионных покрытий повысился предел выносливости на 25-30%, глубина модифицированного слоя составила 300 мкм, микротвердость увеличилась на 10%, и достигла 1240 МПа, временное сопротивление на стали 40X13 повысилось до 920 МПа (исходное – 910 МПа). В этом режиме формируются сжимающие напряжения с плавной эпюрой остаточных напряжений. Таким образом, в результате исследования установлена эффективность формирования плазмохимических диффузионных покрытий с помощью струйного ВЧИ разряда пониженного давления.

Библиографический список

1. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей М.: Техносфера, 2012. – 464с.

Кинетика быстрых электронов в плазме коротких тлеющих разрядов в инертных газах и их приложение в анализе продуктов конверсии углеводородов и силана

Kinetics of fast electrons in the plasma of short glow discharges in inert gases and their application in the analysis of hydrocarbon and silane conversion products

Сайфутдинов А.И.

Saifutdinov A.I.

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева – КАИ

420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, E-mail: as.uav@bk.ru

The kinetics of fast electrons in the plasma of a short glow discharge has been studied. The possibility of recording the spectra of fast electrons formed in Penning ionization reactions of metastable helium atoms and hydrocarbon and silane impurities has been demonstrated numerically and experimentally. The possibility of separating conversion products is shown.

В работе представлены результаты исследований параметров плазмы и кинетики быстрых электронов в области отрицательного свечения (ОС) короткого тлеющего разряда в широком диапазоне давлений на основе гибридной модели [1, 2], включающей кинетическое описание электронов и гидродинамическое описание тяжелой компоненты плазмы.

Результаты численных расчетов сравниваются с результатами зондовых исследований. Показано, что гибридная модель хорошо описывает параметры плазмы в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда. Кроме того, гибридная модель позволяет достаточно точно описать формирование пиков ФРЭЭ от быстрых электронов, образующихся в результате реакций Пеннинговской ионизации и ударов второго порядка. Показана возможность регистрации малых фракций примесей углеводородов, силана и других молекул [3-5].

Достоверность определения концентрации возбужденных атомов гелия в плазме ОС показана на основе анализа экспериментально измеренной высокоэнергетической части ФРЭЭ, а именно пиков от быстрых электронов, генерируемых в реакциях Пеннинговской ионизации между двумя метастабильными атомами гелия и примесных атомов и молекул, а также продуктов их конверсии. Описанная методика может быть успешно применена для определения абсолютных значений концентрации атомов и молекул примеси путем исключения второй производной ионного тока на зонде и анализа высокоэнергетической части ФРЭЭ.

Данная методика может быть востребована как в газоаналитических приложениях, так и в приложениях, связанных с плазмохимическим синтезом различных типов микро- и наноструктур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20099, <https://rscf.ru/project/22-22-20099/>.

Библиографический список

1. Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Physics Reports. **2023** V.49 772–785
2. Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Sources Science and Technology. **2023** V.32 114001
3. Zhou C. et al. // Plasma Sources Science and Technology. **2022** V.31 107001
4. Zhou C. et al. // Plasma Sources Science and Technology. **2021** V.30 117001
5. Saifutdinov A. I., Sysoev S. S // Plasma Sources Science and Technology. **2021** V.30 017001

Влияние гетерогенных физико-химических процессов на параметры низкотемпературной плазмы

The effect of heterogeneous physico-chemical processes on the parameters of low-temperature plasma

Смирнов С.А.*, Титов В.А.** , Рыбкин В.В.*

Smirnov S. A., Titov V. A., Rybkin V. V.

**Ивановский государственный химико-технологический университет*

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: sas@isuct.ru

***Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук*

153045, г. Иваново, ул. Академическая, д. 1, E-mail: titov25@gmail.com

Feedback channels between heterogeneous reactions initiated by the action of plasma on polymer materials and the physico-chemical parameters of a glow discharge have been identified.

Неравновесная плазма пониженного давления находит практическое применение для обработки поверхностей различных материалов в электронной промышленности, машиностроении, автомобиле и авиастроении, легкой и текстильной промышленности и многих других отраслях. В промышленности уже десятки лет эксплуатируется оборудование для обработки полимерных пленок и текстильных тканей в плазме, обеспечивая экономичность и экологическую чистоту производственных процессов. В промышленных машинах плазма практически полностью ограничена обрабатываемым полимерным материалом, и потоки продуктов реакций в газовую фазу могут быть соизмеримы с потоком основного плазмообразующего газа. Учет таких обратных связей между гетерогенными реакциями, инициируемыми действием плазмы, и ее физико-химическими параметрами особенно важен при выборе режимов работы промышленных реакторов [1].

Для положительного столба тлеющего разряда в потоке различных плазмообразующих газов (воздуха, аргона, кислорода и его смесей с аргоном и азотом) были экспериментально измерены напряженность электрического поля, температура газа и стенки реактора, состав стабильных нейтральных частиц, потоки положительных ионов на стенку, абсолютные интенсивности излучения основных компонентов плазмы при различном количестве полимерного материала в реакторе.

Для выявления каналов «химической» обратной связи была разработана математическая модель, которая строилась на совместном решении уравнения Больцмана для электронов в плазме, уравнений колебательной кинетики основных электронных состояний молекул, уравнений химической кинетики, включающей возбужденные электронные состояния атомов и молекул и уравнения теплопроводности [2].

В ходе моделирования были выделены основные процессы, определяющие концентрации компонентов плазмы, а также рассчитаны потоки активных частиц на обрабатываемый материал. Проанализировано влияние газообразных продуктов плазмолиза полимеров (полиэтилена, полипропилена, полиимида, полиэтилентерефталата, поликарбоната) на функцию распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) и кинетические параметры электронного газа за счет набора электронных соударений и изменения приведенной напряженности электрического поля (E/N), которое изменяется в свою очередь как за счет изменения баланса скоростей образования и гибели заряженных частиц, так и за счет изменения температуры газа (изменения как набора так и самих скоростей процессов разогревающих газ). Необходимо также учитывать изменение граничных условий на поверхности как для нейтральных (изменение вероятности гибели активных частиц на модифицированной поверхности полимера), так и заряженных частиц за счет влияния поля объемного заряда и изменения транспортных коэффициентов заряженных частиц.

Библиографический список

1. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука, **2004**, 496 с.
2. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ 2022662068 РФ. Программа расчета скоростей образования и гибели активных частиц в условиях неравновесного газового разряда / С. А. Смирнов, В. В. Рыбкин; заявитель и правообладатель ФГБОУВО «Ивановский гос. химико-технологический университет». – № 2022660837; заявл. 11.06.2022; опубл 29.06.2022. – 1 с.

Секция 1

КИНЕТИКА, ТЕРМОДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Образование пероксида водорода в бидистиллированной воде в электрофизической системе «воздух-плазма-жидкость»

Formation of hydrogen peroxide in bidistilled water with an electrophysical system “air-plasma-liquid”

Грушко О.И., Субботин Д.И.*, Снетов В.Н.*, Пинчук М.Э.*, Степанова О.М.*
Grushko O.I., Subbotin D.I., Snetov V.N., Pinchuk M.E., Stepanova O.M.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

190013, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49, E-mail: grushkoleg02@mail.ru

**Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук*

191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, E-mail: omstepanova@ieeras.ru

The formation of hydrogen peroxide in bidistilled water treated by products of plasma-chemical reactions in an ambient air flow passed through a dielectric-barrier discharge (DBD) have been studied. Kinetic curves were recorded at 5, 10, 15 and 20 min of DBD products bubbling in the liquid in terms of the amplitude of an applied voltage. They are observed to have maximums.

Одним из направлений исследования применений низкотемпературной воздушной плазмы (НВП) атмосферного давления является инактивация болезнетворных микроорганизмов в жидких средах. Уничтожение бактерий происходит в результате их взаимодействия с высоко реакционноспособными частицами НВП.

В работе рассмотрена оригинальная электрофизическая система «воздух-плазма-жидкость», созданная на базе барьерного разряда с коаксиальной электродной системой. Осушенный цеолитом воздух с расходом 0,2 л/мин поступает в проточный плазмохимический реактор, изготовленный из кварцевой трубки. На электроды подают синусоидальное напряжение с частотой 27 кГц, амплитуду которого в этой работе устанавливали равной 5 и 6 кВ. На выходе из реактора получают потока газа с продуктами плазмохимического синтеза (ПХС), в состав которых входят оксиды азота, озон и короткоживущие радикалы. Далее его барботируют через 20 мл бидистиллированной воды в конической колбе. В жидкой фазе протекают вторичные реакции с участием растворителя и продуктов ПХС, в том числе с образованием пероксида водорода. Длительность обработки воды составляет от 5 до 20 минут.

Согласно [1], при обработке плазмой барьерного разряда в осушенном воздухе образования пероксида водорода не происходит, связи с отсутствием достаточного количества воды в потоке газа. Перекись образуется в жидкой фазе благодаря высокоэнергетическим радикальным частицам. Они разрушают молекулы воды до гидроксорадикалов. Последние рекомбинируют в пероксид водорода.

В обработанных образцах воды методом спектрофотометрии согласно ГОСТ 32460-2013 измеряли концентрации пероксида водорода. В качестве аналитической реакции применялось каталитическое разложение перекиси с помощью пероксидазы хрена и последующее окисление лейкокристаллического фиолетового до окрашенного соединения с максимумом поглощения 591 нм.

Кинетические кривые концентрация пероксида водорода проходят через максимум. Причиной может служить протекание последовательной реакции, в которой перекись водорода выступает промежуточным продуктом. С увеличением напряжения концентрация пероксида снижается, а расположение максимума уходит в сторону меньшего времени. Возможными причинами этого являются взаимодействие материала высоковольтного электрода с продуктами ПХС и/или нагрев обрабатываемой жидкости, который усиливает разложение перекиси.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-29-00816, <https://rscf.ru/project/24-29-00816/>.

Библиографический список

1. Soloshenko A., Tsiolko V.V., Pogulay S.S. // *Plasma Sources Science and Technology* **2009**. Vol. 18. P. 045019.

Плазмохимическая деструкция левомецетина в воде

Plasmochemical destruction of chloramphenicol in water

Извекова А.А., Квиткова Е.Ю., Худякова А.Ю., Гушин А.А.

Izvekova A.A., Kvitkova E.Yu., Khudyakova A.Yu., Gushchin A.A.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: esket@yandex.ru*

The process of decomposition of chloramphenicol in a dielectric barrier discharge has been studied. The oxidation process is efficient, the degree of decomposition is 70-85%. The effective rate constants, the rate of destruction of chloramphenicol and the energy yield of the process were assessed. The decomposition products of chloramphenicol were determined.

Обнаружение лекарственных соединений и их остатков в природной воде практически по всему миру говорит о необходимости разработки новых технологических решений по очистке сточных бытовых и промышленных вод. Основными каналами поступления фармацевтических препаратов (ФП) и их метаболитов в водные объекты является антропогенная деятельность, связанная с их производством и потреблением. Традиционные методы очистки не способны эффективно очищать сточные воды. Наиболее эффективным способом водоочистки в данном случае является применение деструктивных методов, к которым относится диэлектрический барьерный разряд, позволяющий разлагать устойчивые органические соединения за счет комплексного воздействия ряда факторов - образования активных частиц (перекись водорода, озон, молекулярный и атомарный кислород, гидроксидный, гидропероксидный и другие радикалы), УФ-излучения и температуры.

В данной работе приведены результаты исследования процесса окислительной деструкции одного из известных и распространённых антибиотиков – левомецетина под действием диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Модельные растворы обрабатывали на экспериментальной установке с коаксиальным расположением электродов, описание которой приведено в работе [1]. Величина приложенного напряжения к электродам составляла 13 кВ, ток разряда – 0,68 мА, удельная мощность разряда – 0,4 Вт/см³.

Было установлено, что степень разложения левомецетина в ДБР в диапазоне начальных концентраций (C_n) 9-45 мг/л составляет 70-85 %. Эффективные константы скорости разложения левомецетина (k) в исследуемом диапазоне начальных концентраций, определенные по кинетическим зависимостям, уменьшались с ростом C_n в 2 раза с $(0,30 \pm 0,03)$ до $(0,16 \pm 0,01)$ с⁻¹, а скорость процесса разложения W (рассчитанная как $W=k \cdot C_n$) увеличивалась с 8,2 до 22,0 мкмоль/л·с. Сравнение кинетических параметров процесса разложения левомецетина с аналогичным процессом обработки в ДБР растворов парацетамола показало, что левомецетин является более устойчивым соединением [2]. Энергетический выход процесса разложения исследуемого ФП (число распавшихся молекул на 100 эВ вложенной энергии) составлял $0,002 \div 0,006$ молекул/100эВ, что на порядок меньше, чем при разложении парацетамола в аналогичных условиях ($0,015 \div 0,022$ молекул/100эВ) [2].

В качестве продуктов разложения левомецетина в растворе были обнаружены альдегиды, карбоновые кислоты, аммонийный азот, нитрит- и нитрат-ионы. При этом с увеличением времени контакта раствора с зоной горения плазмы концентрация альдегидов, ионов NH_4^+ и NO_3^- увеличивалась, а кинетические кривые образования карбоновых кислот и ионов NO_2^- проходили через максимум. Установлено, что от 12,2 до 25,3 % углерода, входящего в состав левомецетина окисляется до CO_2 . Степень минерализации исходного соединения возрастала с уменьшением его исходной концентрации в растворе.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что ДБР можно использовать в целях очистки воды от фармацевтических соединений, в частности левомецетина.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР. Тема № FZZW-2023-0010.

Библиографический список

1. Grinevich V.I., Kvitkova E.Y., Plastinina N.A., Rybkin V.V. // *Plasma Chem. Plasma Process.* **2011.** V. 31. № 4. P. 573.
2. Ignatiev, A. A., Gushchin, A. A., Grinevich, V. I., Kvitkova, E. Y., Izvekova, A. A., & Rybkin, V. V. // *High Energy Chemistry.* **2023.** 57(6), P. 522-526.

Электронные кинетические коэффициенты для моделирования разрядов в смесях воздуха с парами воды

Electron kinetic coefficients for simulating discharges in air-water vapor mixtures

Александров Н.Л.*, Кочетов И.В.***,******

Aleksandrov N.L., Kochetov I.V.

**Московский физико-технический институт,*

1417000, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9, E-mail: nick_aleksandrov@mail.ru

***Объединенный институт высоких температур РАН,*

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

****Государственный научный центр РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",*

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, E-mail: kochet@triniti.ru

***** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,*

119991 г. Москва, ГСП-1 Ленинский проспект д. 53

Based on a numerical solution of the Boltzmann equation, electron drift velocity, diffusion coefficients and ionization and attachment coefficients are calculated in weakly-ionized air-water vapor mixtures in a wide range of reduced electric field and mole fraction of H₂O. The calculated results are compared with available new measurements.

С помощью численного решения уравнения Больцмана выполнен расчет скорости дрейфа электронов, коэффициентов их продольной и поперечной диффузии, а также коэффициентов ионизации и диссоциативного прилипания в слабоионизованных смесях воздуха с парами воды в широком диапазоне приведенных электрических полей (1-650 Тд, 1 Тд = 10⁻¹⁷ В см²) и мольных долей H₂O (0 – 1). Выполнено сравнение результатов расчета с новыми экспериментальными данными [1], и получено хорошее согласие между ними. Показано, что для всех коэффициентов и средней энергии электронов их зависимость от состава газа меняется с ростом электрического поля: при малых приведенных полях E/N (N – концентрация нейтральных частиц) увеличение содержания H₂O в смесях приводит к уменьшению коэффициентов переноса и средней энергии электронов, в то время как при больших значениях E/N наблюдается обратная тенденция. Кроме того, для скорости дрейфа и коэффициента диссоциативного прилипания электронов существуют электрические поля, при которых значения этих коэффициентов в газовых смесях могут быть больше коэффициентов в сухом воздухе или в парах воды. Дано качественное объяснение полученным зависимостям.

Расчет коэффициента тройного прилипания электронов к молекулам O₂ также дает согласие с экспериментом [1] в рассматриваемом диапазоне параметров. При этом эффективный коэффициент тройного прилипания снижается с ростом E/N и увеличивается с ростом содержания H₂O в смеси. При добавлении 50% H₂O коэффициент тройного прилипания практически не зависит от E/N , хотя средняя энергия электронов при этом меняется в несколько раз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

Библиографический список

1. de Urquijo J., Gonzalez-Magana O., Basurto E., Juarez A.M. // *Journal of Physics D: Applied Physics* 2024. V. 57. P. 125205.

Динамика молекул CO и CO₂ в смеси с инертными газами в плазме газового разряда постоянного тока

Dynamics of CO and CO₂ molecules mixed with inert gases in the plasma of a DC discharge

Григорьян Г.М.*, Кочетов И.В.,**,*** Ткаченко Т.Л.*

Grigorian G.M., Kochetov I.V., Tkachenko T.L.

*Санкт-Петербургский государственный университет,

198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская 3, E-mail: galgr2@rambler.ru

**Государственный научный центр РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",

108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, влад.12, E-mail: kochet@trini.ru

***Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,

119991, Москва, ГСП-1, Ленинский пр., 53

Experimental and theoretical calculations have been carried out to study changes in the composition of mixtures of CO with inert gases (He, Xe) in the DC discharge in the tube. Two types of discharge tubes were used in the experiments: the molybdenum glass and the Al₂O₃ ceramics.

В работе проведены экспериментальные и расчетно-теоретические исследования изменения состава смесей CO с инертными газами (He, Xe) в процессе горения разряда постоянного тока. В экспериментах использовались разрядные трубки двух видов - изготовленные из молибденового стекла и из Al₂O₃ - керамики. Исследования проводились в условиях отсутствия прокачки газовой смеси через зону разряда. Содержание CO в исходной газовой смеси составляло 1-15%, а содержание O₂ варьировалось в диапазоне от 0 до 5% по отношению к CO. Давление газа в зоне разряда составляло 5-20 Торр, ток менялся в диапазоне 10-50 мА.

В ходе экспериментов измерялись концентрации CO и продуктов плазмохимических реакций, возникающих в процессе горения разряда. Концентрации молекул CO, CO₂, O₂ и C₃O₂ измерялись с помощью масс-спектрометра, а концентрации молекул C₂ и атомов углерода и кислорода определялись из спектроскопических измерений. Проведены сравнения экспериментальных концентраций компонентов газовой смеси с результатами расчетов. Предложены схемы плазмохимических процессов, описывающих деградацию исходной газовой смеси в зависимости от условий эксперимента.

Показано, что в отличие от смесей без кислорода, где конечными продуктами деградации исходной газовой смеси являются CO, CO₂ и углерод, в смесях содержащих добавки кислорода конечными продуктами являются CO, CO₂, C₃O₂ и полимер C_nO_m, который образуется на стенке разрядной трубки в виде пленки. Степень диссоциации молекул CO в стеклянной трубке была заметно меньше, чем в керамической, что можно объяснить различием констант гетерогенной рекомбинации C+O = CO [1]. В случае смесей, содержащих кислород степени диссоциации CO в обоих случаях, были близки. Оценки показали, что вероятность гетерогенной рекомбинации атомов C и O на поверхности C_nO_m составляет 10⁻³.

Библиографический список

1. Grigorian G.M., Cenian A.// *J.Phys.D: Appl.Phys.*, **2015**. V.48. P.105201.

Влияние кластеризации отрицательных ионов на генерацию затравочных электронов при распространении волн ионизации в смесях He:O₂

The effect of negative ion clustering on generation of seed electrons during ionization wave propagation in He:O₂ mixtures

Александров Н.Л.**, Пономарев А.А.****, Сысоев А.А. ****, Иудин Д.И. ****
Aleksandrov N.L., Ponomarev A.A., Sysoev A.A., Iudin D.I.

**Московский физико-технический институт,*

1417000, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9, E-mail: nick_aleksandrov@mail.ru

***Институт прикладной физики РАН,*

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д.46

****НИУ Высшая школа экономики,*

101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20, E-mail: aaronomarev@hse.ru

*****Приволжский исследовательский университет,*

603005 г. Нижний Новгород, пл.Минина и Пожарского д. 10/1,

E-mail: asysoev@ipfran.ru, iudin@ipfran.ru

The kinetics of electrons and negative ions is numerically studied in He:O₂ mixtures in a repetitively pulsed nanosecond discharge for 0.2 – 1 atm. It is shown that negative ion clusterization hinders the generation of seed electrons, which are required for repeatability of atmospheric-pressure plasma jets (guided ionization waves).

Ионизационные волны, распространяющиеся вдоль струи инертного газа (чаще всего - гелия) в воздухе атмосферного давления (atmospheric-pressure plasma jets or guided ionization waves), создают неравновесную плазму с широким спектром приложений, от плазменной медицины и до нанотехнологий [1]. При не слишком малой частоте повторяющихся высоковольтных импульсов этот плазменный объект, в отличие от традиционных стримерных разрядов, характеризуется повторяемостью своего развития. Это его свойство связывают с наличием достаточно высокой концентрации затравочных электронов, которые остаются в чистом инертном газе от предыдущего импульса или образуются при разрушении отрицательных ионов (считается, ионов O₂⁻) в инертном газе с примесью воздуха или O₂ [2].

В данном исследовании на основе численного моделирования показано, что в реальных условиях ионы O₂⁻ быстро превращаются в кластерные ионы O₄⁻, оторвать от которых электрон гораздо сложнее. В работе методом Монте-Карло вычислены константы скорости диссоциации ионов O₄⁻ и отрыва электронов от ионов O₂⁻ в сильном электрическом поле для смесей He с малым (1-10 %) содержанием O₂ и давлений 0.2 – 1 атм. На основе полученных данных проведено моделирование распада отрицательных ионов и генерации затравочных электронов при наложении различных высоковольтных наносекундных импульсов. Эффективность образования этих электронов существенно зависит от амплитуды импульса и состава газовой смеси. Также рассмотрены смеси с очень малым (на уровне 0.01 %) содержанием паров воды. Показано, что при этом после очередного импульса образуются кластерные ионы O₂(H₂O)_к, отрыв электронов от которых еще более затруднен.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00245).

Библиографический список

1. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M., Ostrikov K. // *Phys. Rep.* **2014.** V. 540. P. 123.
2. Lu X., Ostrikov K. // *Appl. Phys. Rev.* **2018.** V. 5. P. 031102.

Деструкция родамина С под действием диафрагменного разряда

Destruction of rhodamine C under the action of diaphragm discharge

Обозная Е.Н., Субботкина И.Н.

Oboznaya E.N., Subbotkina I.N.

Ивановский государственный университет

153025, г. Иваново, ул. Ермака, 39, E-mail: rector@ivanovo.ac.ru

In this work, the destruction of the xanthene dye rhodamine C under the action of a diaphragm discharge is investigated. By changing the optical density at the maximum absorption of the dye, the kinetics of destruction of the chromophore system of the dye was estimated.

В большинстве технологических операций по производству и применению синтетических красителей образуются загрязненные сточные воды, содержащие как красители, так и другие органические вещества. Удаление этих веществ серьезная проблема, потому что они являются довольно стабильными соединениями и медленно разлагаются при физической, химической и биологической очистке. [1-2]

Привлекательность плазменных систем для таких задач заключается в образовании широкого спектра активных частиц, обладающих как окислительными, так и восстановительными свойствами.

В качестве объекта исследования был выбран ксантеновый краситель родамин С. Родамины, одни из наиболее востребованных непивцевых красителей. Они широко применяются в промышленности: при производстве цветного картона, бумаги, окрашивания кожаных изделий, шерсти. В текстильной промышленности использование родамина в качестве красителя тканей достигает 60%. [3]

В данной работе был исследован процесс разрушения родамина С под действием диафрагменного разряда, в котором инициирование активных частиц происходило внутри жидкой фазы, когда оба электрода расположены в объеме жидкости. Время воздействия диафрагменного разряда варьировалось от 10 до 40 минут. В качестве электролита, используемого для инициирования разряда использовался раствор хлорида натрия с концентрацией 0,003 моль/л.

По изменению оптической плотности в максимуме поглощения исследуемого красителя, который соответствует 553 нм, оценивалась кинетика деструкции в первую очередь хромофорной группы красителя от исходной концентрации, времени воздействия, а также исходных вольт-амперных характеристик.

Библиографический список

1. Манукян, А. С., Сейоум, М. Б., Рыбкин, В. В. Разложение органических красителей в их водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2021. — № 3. — С. 4-12.
2. Сергеева, И. Н., Титова, Ю. В., Максимов, А. И. Пост-эффект действия газовых разрядов атмосферного давления на растворы электролитов// Электронная обработка материалов. — 2002. — № 4. — С. 34-39.
3. Мчедлов - Петросян Н.О. Флуоресцентные красители в растворах – хорошо изученные системы? / Вестник Харьковского национального университета. 2004. №626. Химия. Вып. 11 (34).

Параметры плазмы и кинетика реактивно-ионного травления кремния в смесях $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{CF}_4 + \text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$

Plasma parameters and reactive-ion etching kinetics of silicon in $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ and $\text{CF}_4 + \text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ gas mixtures

Бобылев А.В., Ефремов А.М.*, Казначеева Е.М., Kwon К.-Н.**

Bobylev A.V., Efremov A.M., Kaznacheeva E.M., Kwon K.-H.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский просп., 7, E-mail: prototyp16@mail.ru*

**НИИ Молекулярной электроники*

124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Акад. Валиева, 6/1, E-mail: aefremov@niime.ru

*** Korea University,*

339-700, Sejong, South Korea, E-mail: kwonkh@korea.ac.kr

The work discusses how the low- and high-polymerizing fluorocarbon gas ratio in $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ and $\text{CF}_4 + \text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ mixture does influence steady-state plasma composition and silicon etching kinetics. It was shown that the substitution of CF_4 for any second fluorocarbon gas influences both F atom density and Si etching rate. The latter follows the change in F atom flux, but also appears to be sensitive to polymer deposition/decomposition balance that influences the effective reaction probability.

Различные фторуглеродные газы широко используются в технологии изделий микроэлектроники при проведении процессов реактивно-ионного травления (РИТ) кремния и его соединений. В предшествующих работах было найдено, что выходные параметры РИТ (скорость, селективность, анизотропия) определяются полимеризационной способностью плазмообразующего газа, которая зависит от соотношения числа атомов фтора и углерода (F/C) в исходной молекуле. Таким образом, комбинирование в одной смеси двух газов с различными значениями F/C может являться эффективным инструментом регулирования полимеризационной способности плазмы и оптимизации конечного результата РИТ. К сожалению, механизмы соответствующих процессов изучены гораздо слабее по сравнению с эффектами стандартных добавок – аргона и/или кислорода.

Целью данной работы являлось исследование параметров плазмы, кинетики активных частиц и закономерностей реактивно-ионного травления кремния в смесях $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{CF}_4 + \text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ при варьировании соотношений CF_4/CHF_3 и $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{F}_8$. Схема исследования включала диагностику плазмы (двойной зондом Лангмюра, оптическая эмиссионная спектроскопия), моделирование кинетики плазмохимических процессов и феноменологический анализ механизма травления в приближении эффективной вероятности взаимодействия.

Установлено, что увеличение доли второго фторуглеродного газа в обеих исследованных смесях а) вызывает слабые возмущения электрофизических параметров плазмы; б) приводит к росту концентраций полимеробразующих радикалов и скорости осаждения полимерной пленки; и в) сопровождается заметным снижением концентрации атомов фтора. Причинами последнего эффекта являются изменение скорости образования атомов в процессах электронного удара, а также увеличение частоты их гибели по механизмам $\text{CHF}_x + \text{F} \rightarrow \text{CF}_x + \text{HF}$ (при добавлении CHF_3) и $\text{C}_2\text{F}_4 + \text{F} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{CF}_2$ (при добавлении C_4F_8).

Показано, что доминирующим механизмом травления кремния является химическая реакция $\text{Si} + x\text{F} \rightarrow \text{SiF}_x$, скорость которой монотонно снижается при замещении тетрафторметана на второй фторуглеродный компонент. Такое изменение скорости травления качественно согласуется с поведением плотности потока атомов фтора, но также отражает изменение эффективной вероятности взаимодействия при постоянной температуре обрабатываемой поверхности. Основными факторами, обуславливающими изменения эффективной вероятности, являются а) изменение баланса процессов осаждения/деструкции полимерной пленки, приводящее к увеличению ее толщины; и б) непостоянство концентрации атомов кислорода, что вызывает изменение степени заполнения активных центров на обрабатываемой поверхности нереагирующими частицами.

Работа поддержана Министерством высшего образования и науки Российской Федерации, проект FZZW-2023-0010.

Секция 2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ.
ОЦЕНКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Концентрации атомов брома и фтора в CF_3Br плазме низкого давления

Number densities of Br and F atoms in the low-pressure CF_3Br plasma

Автаева С.В.^{1,2}

Avtaeva S.V.

¹Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15Б,

E-mail: s_avtaeva@mail.ru

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса 20

В работе [1] было предложено использовать плазму низкого давления CF_3Br для стимуляции анизотропного травления глубоких канавок в различных материалах. Исследование ВЧ-емкостного разряда в CF_3Br при давлении 5-10 Па показало, что плазма содержит заметное количество атомов Br и ионов Br^+ , а в спектре разряда присутствует большое количество интенсивных линий BrI и BrII [2]. В то же время в спектре присутствовало лишь несколько малоинтенсивных линий атомов фтора. Измерение концентрации атомов методом оптической актинометрии показало, что концентрация атомов брома превышает концентрацию атомов фтора. Недавние исследования индуктивно-связанной плазмы в CF_3Br при давлениях 1–30 Па продемонстрировали обратную зависимость между концентрациями атомов фтора и брома [3, 4].

Целью настоящей работы было численное исследование влияния электронной температуры (T_e) и температуры газа (T_g) в плазме CF_3Br при низких давлениях (5-30 Па) на соотношение концентраций атомов брома и фтора и выявление реакций, ответственных за реализующиеся соотношения. Для этой цели была разработана модель, основанная на решении кинетических уравнений для частиц плазмы и уравнения баланса энергии электронов.

Моделирование показало, что T_e оказывает определяющее влияние на соотношение концентраций атомов фтора и брома за счет изменения соотношений скоростей различных каналов диссоциативной ионизации молекул CF_3Br и диссоциативного прилипания электронов к молекулам CF_3Br при столкновениях с электронами. При низких T_e (~2 эВ) концентрация атомов фтора превышает концентрацию атомов брома. Однако увеличение T_e приводит к более сильному увеличению концентрации атомов брома по сравнению с концентрацией атомов фтора. Влияние T_g на концентрацию атомов брома и фтора качественно одинаково. Увеличение T_g приводит к уменьшению концентраций обоих атомов за счет уменьшения скоростей реакций взаимной нейтрализации ионов, в которых, наряду с диссоциацией, рождаются эти атомы.

Библиографический список

1. Flamm D.L., Cowan P.L., Golovchenko J.A. // *J. Vac. Sci. Technol.* **1980**. V. 17. P. 1341.
2. Avtaeva S.V., Otorbaev D.K. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **1993**. V. 26. P. 2148.
3. Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V. // *Tech. Phys. Lett.* **2021**. V. 47. P. 99.
4. Miakonkikh A., Kuzmenko V., Efremov A., Rudenko K. // *Vacuum*. **2022**. V. 200. P.110991.

Моделирование равновесных состояний термодинамической системы MgFОН для плазменного пирогидролита фторида магния с получением оксида магния и фтороводорода

Modeling of equilibrium states of the thermodynamic MgFОН system for plasma pyrohydrolysis of magnesium fluoride to produce magnesium oxide and hydrogen fluoride

Тверской А.В.¹, Тверской В.С.^{1,2}, Кылышканов М. К.³,
Подойников М.А.³, Шестаков К.А.³

Tverskoi A.V., Tverskoi V.S., Kylyshkanov M.K., Podoinikov M.A., Shestakov K.A.

¹ООО «ПЛАЗАРИУМ»

109316, г. Москва, Волгоградский проспект, 42, корп.5, E-mail: info@plazarium.com

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

111250 Москва, улица Красноказарменная, дом 17, E-mail: TverskoyVS@mpei.ru

³АО «Ульбинский металлургический завод»

Проспект Абая, д. 102, 070005, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан,

E-mail: PodoinikovMA@ulba.kz

The relevance of the study is due to the industrial need for processing magnesium fluoride - a waste product from beryllium production, formed during the magnesium-thermal reduction of beryllium fluoride, with the production of commercial magnesium oxide and the return of fluorine in the form of hydrofluoric acid to the production process.

Attention was drawn to the possibility of using steam-water plasma for processing dispersed magnesium fluoride using the method of pyrohydrolysis [1]. The equilibrium states of the MgFОН thermodynamic system for plasma pyrohydrolysis of magnesium fluoride in the temperature range 1500-5000 K, pressure 0,025-0,225 МПа, molar ratio of reagents was simulated. From the condition of the maximum total mass fraction of the target products (HF, MgO), the optimal value of the molar ratio of the initial reagents $n = \text{НОН}/\text{MgF}_2 = 1,686$, process temperature 2023 K, pressure 100 kPa was established. The hydrolysis products contain magnesium fluoride vapor. To separate the target products, sequential stepwise separation of the condensation and vapor-gas phases is required. It is shown that the process of plasma pyrohydrolysis of magnesium fluoride can be practically waste-free.

Актуальность исследования обусловлена производственной необходимостью переработки фторида магния - отхода производства бериллия, образующегося в процессе магнийтермического восстановления фторида бериллия, с получением товарного оксида магния и возвратом фтора в виде фтороводородной кислоты в производственный процесс.

Обращено внимание на возможность использования пароводяной плазмы для переработки дисперсного фторида магния методом пирогидролита [1]. Выполнено моделирование равновесных состояний термодинамической системы MgFОН для плазменного пирогидролита фторида магния в интервале температур 1500-5000 К, давления 0,025-0,225 МПа, мольного соотношения реагентов $n = \frac{\text{НОН}}{\text{MgF}_2} = 1 - 3,4$. Из условия максимума суммарной массовой доли целевых продуктов (HF, MgO) установлено оптимальное значение мольного соотношения исходных реагентов $n = \text{НОН}/\text{MgF}_2 = 1,686$, температура процесса 2023 К, давление 100 кПа. В продуктах гидролиза присутствует пар фторида магния. Для выделения целевых продуктов требуется последовательное ступенчатое разделение конденсированной и парогазовой фаз. Показано, что процесс плазменного пирогидролита фторида магния может быть практически безотходным.

Библиографический список

1. Processing of industrial waste by plasma-chemical method Kylyshkanov M.K., Shestakov K.A., Sagdoldina Zh.B., Rakhadilov B.K., Kengesbekov A.B. Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2021. № 3 (103). С. 45–51.

Моделирование функции распределения ионов по энергиям в плазме аргона: Влияние параметров процесса на характеристики функции распределения ионов по энергиям

Modeling the ion energy distribution function in argon plasma: Influence of process parameters on the characteristics of the ion energy distribution function

Кузьменко В.О.¹, Мяконьких А.В.¹, Халилуллин Р.Р.^{1,2}

Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V., Khalilullin R.R.

¹ Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук
117218, г. Москва, Нахимовский проспект, 34

² МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78, E-mail: ramis.khal@gmail.com

This article explores the ion energy distribution function in argon plasma in inductively coupled plasma (ICP) reactors. A series of calculations were performed with different values of frequency and amplitude of the radio frequency (RF) bias on the processed wafer, as well as ion concentration and pressure in the reactor. The results show that changes in frequency, amplitude, concentration, and pressure have a significant impact on the average energy and width of the ion distribution reaching the plate.

Ионно-стимулированные реакции травления материалов в непрерывных и циклических процессах являются важным механизмом, используемым в микроструктурировании при создании приборов микро- и нанoeлектроники [1]. В ICP управление энергией ионов, достигающих подложки осуществляется за счет приложения напряжения смещения к образцу. Применение генератора смещения и генератора ICP обеспечивает независимый контроль потока и энергии частиц, падающих на пластину [2]. Однако в современных приложениях нанoeлектроники, где роль играет селективность процессов травления, синергия в процессах атомно-слоевого травления, и где требуется высокая латеральная однородность, результат травления определяется не только средней энергией ионов, достигающих поверхности образца, но и шириной их энергетического спектра. В данном исследовании проведено моделирование функции распределения ионов по энергиям в плазме аргона в реакторе с источником индуктивно связанной плазмы.

Для решения этой проблемы разработана гидродинамическая модель плазменного слоя в программном пакете COMSOL. Моделирование проводилось на основе концентраций электронов и их температур, измеренных методом зонда Ленгмюра, а также температур газа, измеренных оптической актинометрией в установке плазмохимического травления Oxford Plasmalab system 100. Функция распределения ионов по энергиям рассчитывалась с помощью разработанного метода трассировки частиц близким по условиям к методу Монте Карло.

В ходе работы было изучено влияние различных параметров процесса и проведена серия расчетов с различными значениями частоты и амплитуды напряжения смещения, подаваемого на стол в реакторе, концентрации электронов в плазме и давление в реакторе, чтобы понять, как изменения в этих параметрах влияют на характеристики распределения энергий ионов.

Результаты работы показали, что зависимость средней энергии и ширины функции распределения ионов по энергиям сильно зависит от изменения частоты и амплитуды подаваемого напряжения смещения. Зависимость функции распределения от концентрации выражена чуть слабее по сравнению с зависимостью от частоты и амплитуды подаваемого напряжения смещения.

Библиографический список

1. Bogdanova, D. Lopaev и др. // Virtual IED sensor for df rf CCP discharges / Plasma Sources Sci. Technol - 2021. V30 №7.
2. M. Armacost et al., "Plasma-etching processes for ULSI semiconductor circuits," in IBM Journal of Research and Development, vol. 43, no. 1.2, pp. 39-72, Jan. 1999.

Моделирование гетерогенных систем

Modeling heterogeneous systems

Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. *, Чебакова Е.В. *

Kashapov N.F., Chebakova V.Yu., Chebakova E.V.

ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

420111 г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31, E-mail: kashnail@gmail.com

**Казанский федеральный университет,*

420 008 г. Казань, Кремлевская, 35 E-mail: vchebakova@mail.ru

The work presents numerical modeling of a heterogeneous system: metal electrode-liquid electrolyte.

В настоящее время во всем мире происходит поиск технологий, позволяющих использовать альтернативные (возобновляемые) источники энергии. Так при переходе к альтернативным источникам энергии актуальное значение придается водородной энергетике. Одним из наиболее распространенных способов получения водорода является электролиз, в связи с чем модифицируются существующие модели электролизеров и разрабатываются новые, в частности использующие плазменный электролиз. Наряду с экспериментальными исследованиями, численное моделирование позволяет исследовать и выявить взаимосвязь внутренних процессов и внешних характеристик для дальнейшей оптимизации работы установок. Граница раздела твердое тело - жидкость представляет собой сложную для описания и моделирования задачу. Это связано с различным протеканием процессов в зависимости от различных факторов, определяющих гетерогенные системы. В данной работе прогнозирование выхода по току основывается на расчете констант скоростей электрохимических процессов, необходимых для численной реализации системы кинетических уравнений, моделирующей гетерогенный процесс. Разработанный и реализованный алгоритм решения обратных задач химической кинетики позволяет находить скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с заданными экспериментальными данными по выходу, а также рассчитывать концентрации веществ, участвующих в приэлектродных процессах на конкретные моменты времени. Данный алгоритм базируется на совместном использовании модифицированного метода Хука-Дживса для решения обратной задачи с методом Рунге-Кутты для вычисления минимизируемого функционала. Проведено численное моделирование приэлектродных процессов функционирующего электролизера [1]. Дан сравнительный анализ расчета выхода водорода и кислорода в процессе электролиза раствора гидроксида калия при постоянной температуре со значениями, полученными в ходе натурного эксперимента. Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными. Проведена верификация данного метода путем сравнения результатов натурных экспериментов с расчетными данными, полученными по математическое модели, описывающей выхода водорода в растворе гидроксида калия. Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными. Полученные в ходе расчета скорости приэлектродных процессов использовались для постановки граничных условий в пространственной задаче расчета характеристик в межэлектродном пространстве в процессе электролиза раствора гидроксида калия.

Также данный алгоритм был опробован в задаче получения цинкового порошка [2] и при моделировании окисления алюминиевого электрода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00099).

Библиографический список

1. Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59(6). С. 869-876.
2. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Chebakova V.Yu., Chebakova E.V. // *Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics*. 2023. Т. 16(5). С. 572-582.

Зависимость выбора метода консервации археологических объектов из натуральной кожи от состояния сохранности

Богатова Л.Ф.^{1,2}, Шаехов М.Ф.³

Bogatova L.F., Shaekhov M.F.

¹*Казанский приволжский федеральный университет, 420000, г. Казань*

²*Институт археологии имени А. Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан, 420012, г. Казань*

³*ГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420111, г. Казань, E-mail: linafeliksovna@mail.ru*

Обнаруженный при проведении археологических изысканий объект из натуральной кожи, необходимо законсервировать – приостановить или замедлить процесс деградации материала. Для оценки и характеристики современных методов реставрации археологических предметов из натуральной кожи, необходимо обратиться к состоянию сохранности предмета материальной культуры.

Применение плазменной обработки для повышения физико-механических свойств и качества состояния сохранности археологических предметов из натуральной кожи ведет к повышению качества консервации. Обработка артефакта в потоке ионов приводит к положительным модификациям, как поверхности, так и объема кожной ткани [1].

Библиографический список

1. Богатова Л.Ф., Вознесенский Э.Ф., Тихонова Н.В., Гайсин А.Ф./ Разработка методики консервации археологических изделий из натуральной кожи // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2022. - №56 том 2. - с. 48-51.

Моделирование плазмохимических процессов в барботажном реакторе с металлическим расплавом

Simulation of plasma-chemical processes in a bubbler reactor with a metal melt

Пушкарев А.И., Полисадов С.С., Сосновский С.А.

Pushkarev A.I., Polisadov S.S., Sosnovski S.A.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, г. Томск, проспект Ленина, 30, E-mail: aipush@mail.ru

The results of modeling of radical chain processes in a bubbler reactor with a metal melt under the production of additional radicals in an electric discharge are presented. The paper presents the results of methane pyrolysis and direct synthesis of methanol from methane.

Известно, что конверсия углеводородов реализуется как радикально-цепной процесс, скорость которого ограничивается скоростью генерации активных радикалов. Для увеличения скорости процесса и снижения температуры в реакционной зоне перспективно использовать плазмохимические реакции. При низкой температуре, когда термическое инициирование процесса незначительно, в электрическом разряде возникают дополнительные радикалы и неравновесный радикально-цепной процесс будет проходить с более высокой скоростью, так как плазма облегчает наиболее энергоемкую стадию инициирования цепного процесса [1].

В работе представлены результаты моделирования неравновесного радикально-цепного пиролиза метана в барботажном реакторе с металлическим расплавом. Моделирование выполнено по программе Kintecus [2] с использованием констант скорости реакций из базы данных NIST [3]. Кинетическая схема пиролиза метана основана на схеме Касселя [4]. Моделирование выполнено при объемной концентрации радикалов CH_3 , равной 0.1%, начальной температуре 1000-1300 К и давлении 1 атм. Получено, что при протекании эндотермических реакций пиролиза метана в проточном газовом реакторе температура газа снижается на 300-500 градусов, что обеспечивает степень конверсии не более 20 %. В барботажном реакторе с металлическим расплавом при диаметре газового пузырька 1 мм снижение температуры газа не превышает 10 градусов. Интенсивный подвод тепловой энергии в зону эндотермических реакций пиролиза метана и неравновесная концентрация радикалов CH_3 , равная 0.1 %, обеспечивают ускорение пиролиза метана с достижением полной конверсии в течении менее 0.1 с при температуре 1300 К. Энергозатраты на синтез радикалов не превышают 20 Вт на 1 м³ метана (при н.у.).

В работе также представлены результаты моделирования неравновесного радикально-цепного синтеза метанола в барботажном реакторе с металлическим расплавом. Кинетическая схема основана на схеме Веденева В.И. [5], которая дополнена реакциями метана и кислорода с радикалами CH_3 . Моделирование выполнено для смеси метана и кислорода (в соотношении 10:1 об.) при объемной концентрации радикалов CH_3 , равной 0.1 %, давлении 2-50 атм. и начальной температуре 600-900 К. Получено, что интенсивный отвод тепла при протекании газофазных экзотермических реакций в микропузырьках барботажного реактора с металлическим расплавом предотвращает реакции глубокого окисления и рост температуры, что обеспечивает значительное повышение селективности синтеза метанола.

Использование новых факторов (интенсивный отвод тепловой энергии из зоны экзотермических реакций, интенсивный подвод тепловой энергии в зону эндотермических реакций, неравновесные радикально-цепные реакции) значительно расширяет возможности оптимизации процесса конверсии метана в барботажном реакторе с металлическим расплавом.

Библиографический список

1. Пушкарев А.И., Новоселов Ю.Н., Ремнев Г.Е. Цепные процессы в низкотемпературной плазме. Новосибирск: Наука, 2006.
2. Ianni James C. Kintecus, 2021, www.kintecus.com.
3. <https://kinetics.nist.gov/kinetics/index.jsp>
4. Kassel L.S. // J. Amer. Chem. Soc. 1935. V. 57. № 5. P. 833.
5. Веденев В.И., Гольденберг М.Я., Горбань Н.И., Тейтельбойм М.А. // Кинетика и катализ 1988. V. 29. С. 7.

Метод моделирования плазмохимических реакций в барьерном разряде

An approach to modeling plasma chemical reactions in a barrier discharge

Рябов А.Ю., Кудряшов С.В., Очередыко А.Н., Лещик А.В.

Ryabov A.Yu., Kudryashov S.V., Ochered'ko A.N., Leshchik A.V.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти

Сибирского отделения Российской академии наук

634055, г. Томск, пр. Академический, 4, E-mail: a.y.ryabov@yandex.ru

A method has been developed for modeling chemical kinetics in a barrier discharge using the effective rate constant of the electron-molecular reaction. It is proposed to use a simple expression to evaluate it, which connects the actual rate constant of the electron-molecular reaction with key discharge parameters (discharge specific power, electric field strength and electron drift velocity). The results obtained make it possible to optimize and control the plasma-chemical process of converting hydrocarbons in a barrier discharge.

Технологии на основе неравновесной низкотемпературной плазмы электрических разрядов находят широкое применение в различных отраслях науки или техники, и продолжают активно развиваться. Использование электрических разрядов для осуществления химического превращения обусловлено получением сверхравновесной концентрации активных частиц (возбуждённых молекул, атомов, радикалов, ионов) в объёме плазмы, благодаря чему реакции с высокой энергией активации протекают при комнатной температуре и атмосферном давлении без участия катализаторов. Применение барьерного разряда (БР) для осуществления плазмохимической реакции окисления углеводородов оправдано примерами промышленного способа генерации атомов кислорода и получения озона в БР [1].

Построение математической модели кинетики плазмохимического процесса является действующим инструментом для оптимизации химического превращения веществ в электрическом разряде и управления протекающей реакцией. Поскольку БР представляет собой совокупность микроразрядов, его моделирование, как правило, сводится к моделированию отдельного микроразряда [1, 2]. Полная математическая модель микроразряда включает в себя уравнение электромагнитного поля, уравнение функции распределения электронов по энергиям, уравнения, описывающие изменения во времени концентрации нейтральных, ионизированных, возбужденных компонентов среды и электронов. Построение полной математической модели микроразряда сопряжено с рядом трудностей, в первую очередь из-за недостатка исходных данных (констант скорости реакций с участием электронов, возбужденных и заряженных частиц и т.д.). Поэтому на практике активно применяют упрощенные подходы, в которых БР считается однородным, а напряженность поля на разрядном промежутке постоянной. Тогда кинетику плазмохимического процесса можно представить в виде двух последовательных стадий: 1) образование атомов, радикалов, ионов и частиц в возбужденных состояниях под действием электронов БР; 2) химические реакции с участием образовавшихся частиц.

Авторами предложен метод моделирования химической кинетики в БР с использованием эффективной константы скорости электронно-молекулярной реакции. Простое выражение для ее оценки связывает действительную константу скорости электронно-молекулярной реакции с ключевыми параметрами БР, такими как удельная мощность разряда, приведенная напряженность электрического поля и дрейфовая скорость электронов. Метод моделирования химической кинетики в БР опробован при превращении метана, пропана и этилена, а также при окислении пропана, пропилена, циклогексана, циклогексена и бензола. Наблюдается удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют оптимизировать и управлять плазмохимическим процессом превращения углеводородов в БР.

Библиографический список

1. Самойлович В.Г. Гибалов В.И. Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ. **1989**. 174 с.
2. Kogelschatz U. Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications / U. Kogelschatz // Plasma Chem. Plasma Process. **2003**. V. 23. № 1. P. 1–46.

СВЧ разряд в воде при барботировании метаном. Математическое моделирование

Microwave discharge in water when bubbling with methane. Math modeling

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.

Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L., Titov A.Yu.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, 119991 Москва, Россия, Ленинский проспект, 29, E-mail: epstein@ips.ac.ru

In the zero-dimensional approximation, a microwave discharge was simulated inside a bubble with methane in boiling water. Working pressure is one atmosphere. The simulation examines the kinetics of processes in a bubble, the volume of which is calculated at each time step. The calculated concentrations of the main decomposition products of methane and water are in good agreement with experimental data.

Неравновесные разряды в различных жидкостях являются объектом интенсивного исследования в последние десятилетия [1, 2]. СВЧ разряд является эффективным средством проведения плазмохимических реакций в жидких средах. В настоящей работе приведены результаты моделирования в СВЧ-разряде в метане, поток которого подавался в воду через трубку центрального электрода-антенны. Разряд представляет собой последовательность растущих на торце электрода-антенны пузырей, которые достигнув определенного размера, отрываются от электрода, всплывают и схлопываются на поверхности воды. После отрыва от электрода разряд в пузыре прекращается, и пузырь с продуктами, образовавшимися в результате плазмо-химических процессов, поднимается вверх.

В работе используется нестационарная нульмерная модель при условии постоянства давления равного 1 атмосфере. Через внешние стенки реактора задается поток паров испаряющейся воды, а также вводится газ метан. Поток вводимого пара соответствует испарению кипящей вне реактора воды внутрь пузыря, объем которого вычисляется на каждом шаге по времени. Расширение пузыря с плазмой происходит за счет следующих процессов: наличие постоянного потока метана через подводную трубку; испарения окружающей воды внутрь пузыря с плазмой; изменения суммарного числа частиц за счет плазмо-химических процессов; изменение температуры плазмы за счет химических реакций и омического нагрева.

Модель включает в себя уравнения неразрывности для всех нейтральных и заряженных компонент плазмы. Для вычисления газовой температуры плазмы используется уравнение теплопроводности. Предполагается также, что на нагрев газа расходуется половина СВЧ мощности. Константы скоростей реакций электронных процессов рассчитывались как функции значений приведенного поля E_{mw}/N с помощью программы BOLSIG+. Для описания термических процессов используется набор реакций GRI-Mech Version 3.0, дополненный реакциями для заряженных частиц.

Основными продуктами разложения метана и водяного пара являются H_2 , CO и CO_2 . Показано, что в зависимости от начального отношения потоков метана и испаряемого водяного пара в продуктах распада преобладает CO либо CO_2 . С уменьшением этого отношения увеличивается выход CO_2 . Согласие полученных в расчетах концентраций основных продуктов хорошо согласуются с полученными концентрациями в экспериментах.

Для всех рассчитанных нами случаев при временах более 10^{-5} с разряд является электроположительным. На меньших временах основными отрицательно заряженными частицами являются ионы OH^- и O^- плазма электроотрицательная.

Концентрация электронов меняется в диапазоне $10^{-13} \div 10^{-14}$ cm^{-3} . Основным положительным ионом является ион H_3O^+ . При уменьшении потока водяного пара на временах $10^{-6} \div 10^{-4}$ с существенными становятся углеводородные ионы ($C_2H_2^+$, $C_2H_4^+$, CH_4^+).

Работа выполнена в рамках государственной программы ИХС РАН.

Библиографический список

1. Bruggeman P. *et al* // Plasma Sources Science & Techn. **2016**. V. 25. 053002.
2. Лебедев Ю.А. // Физика плазмы **2017**. Т. 43, С. 577-588.

Моделирование плазмохимических процессов в кластированной сверхзвуковой струе

Художитков В.Э., Зарвин А.Е., Каляда В.В.

Khudozhitkov V.E., Zarvin A.E., Kalyada V.V.

Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, E-mail: v.khudozhitkov@g.nsu.ru

На сегодняшний день хорошо известные методы каталитической переработки летучих углеводородов ориентированы на стационарное производство и не применимы для конверсии природного и нефтяного попутного газа в условиях удаленных нефтедобывающих установок. Чрезвычайно привлекательной представляется разработка технологии прямого метода конверсии тяжелых углеводородов, реализуемого на компактном высокопроизводительном устройстве. Получаемые в результате жидкие углеводороды должны быть пригодны для транспортировки, что указывает на целесообразность использования методик конверсии, базирующихся на плазмохимических процессах в газе, где реализуются большие сечения взаимодействия ионизированных и активированных частиц. На сегодняшний день было осуществлено множество попыток решения поставленной задачи различными методами, которые не дали положительного результата. Для реализации поставленной задачи требуется найти дополнительные механизмы, способствующие протеканию реакций синтеза. На протяжении ряда лет нами исследовалась возможность использования в качестве такого механизма процесса формирования газовых кластеров.

Для экспериментального моделирования инициации плазмохимических процессов удобно использовать кластеры в виде молекулярных пучков. Такие кластерные молекулярные пучки имеют широкое практическое применение в формировании тонких пленок, полировки поверхностей и образовании новых частиц и материалов. Генерация кластерных пучков, как правило, осуществляется в результате истечения газов (или газовых смесей) через звуковое (или сверхзвуковое) сопло в разреженное пространство, что сопровождается резким падением плотности и температуры в сверхзвуковом потоке и, при определенном наборе исходных газодинамических параметров, кластерообразованием в потоке. В зависимости от сорта газа, геометрических параметров сопла и газодинамических параметров истечения доля конденсирующихся кластеров в струе может достигать 20-30%, а размер кластеров варьироваться в пределах от димеров до тысячемеров. Формирование кластерного молекулярного пучка из газовой струи с кластерами традиционно реализуется путём скиммирования сверхзвуковой струи.

Для моделирования плазмохимических процессов в кластированной сверхзвуковой струе на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета [1] разработан и апробирован комплекс диагностических методик, рассмотренных в данной работе.

1. Традиционная масс-спектрометрия кластированного молекулярного пучка, ионизированного потоком низкоэнергетичных электронов.
2. Масс-спектрометрия в сочетании с активации газового потока высоковольтным электронным пучком. Для реализации методики отлажен транспорт ионов из струи на детектор масс-спектрометра через скиммер и коллиматор молекулярно-пучковой системы.
3. Возбуждение и ионизация газового потока электрическим разрядом в диффузорной области сопла с дальнейшей конденсацией кластеров в потоке. Для этой цели разработан соответствующий газовый источник.

Иллюстрация использования данных методов диагностики приведена на примерах полученных экспериментальных результатов.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ и финансовой поддержке Российского научного фонда (22-11-00080).

Библиографический список

1. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., Korobeishchikov N.G., Khodakov M.D., Yaskin A.S., Khudozhitkov V.E., Gimelshein S.F. // IEEE Transact. Plasma Sci. **2017**. Vol. 45, No. 5. P. 819-827. DOI: 10.1109/TPS.2017.2682901

Влияние степени дисперсности газовой фазы на скорость разложения метана в плазменно-расплавленной технологии

Gas phase dispersion effects on methane pyrolysis in plasma-melt technology

Кофанова Е.Д., Лебедев А.В.*, Деминский М.А.*

Kofanova E.D., Lebedev A.V., Deminsky M.A.**

Московский физико-технический институт

Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701, E-mail:

kofanova.ed@phystech.edu

**ООО Кинтех Лаб, 3-я Хорошевская ул., 12, Москва 123298, Russia, E-mail: info@kintech.ru*

Производство водорода посредством пиролиза метана является одним из альтернативных подходов в водородной энергетике. Одной из перспективных технологий является гетерогенный плазменно-расплавный метод, в котором процесс конверсии метана в водород осуществляется путем пропускания газовой фазы в расплаве металла [1]. Данный способ позволяет снять ограничения, возникающие из-за температуры, которая требовалась для преодоления высокого активационного барьера реакции. Высокая теплопроводность металла обеспечивает восполнение эндотермичности процесса и равномерное распределение температуры в реакторе. При этом металлы обладают каталитической активностью по отношению к разложению метана, что позволяет воспроизводить пиролиз на поверхности раздела фаз газ-жидкость. Данная работа посвящена разработке и анализу 3-мерной гидродинамической многофазной модели для условий расплавной технологии пиролиза метана, позволяющей делать расчёты производительности реакторов и их оптимизацию. Развита модель позволяет определять эффективность и производительность этой технологии, а также зависимости характеристик процесса от температуры, давления и скорости подачи газа.

Модель учитывает набор физико-химических явлений, происходящих как внутри газовой фазы, так и на поверхности раздела фаз газ-жидкость и внутри жидкого металла. Анализ этих явлений показывает, что в зависимости от условий протекания (температуры, давления) лимитирующим процессом может выступать либо скорость пиролиза метана внутри пузырьков газа, либо гетерогенное каталитическое разложение его на поверхности контакта газ-расплавленный металл. Процессы массопереноса оказывают влияние только для слабо дисперсной газовой фазы при отсутствии интенсивного турбулентного перемешивания. Степень дисперсности газовой фазы (размер пузырьков газа) в первую очередь влияет на время пребывания газовой фазы в расплаве, а следовательно, на степень протекания реакции разложения.

В разработанной модели решения уравнений многофазной гидродинамики сопряжены с уравнениями на функцию распределения пузырей по размерам – учитываются процессы роста и дробления с учётом турбулентного характера взаимодействия фаз. Интенсивное перемешивание фаз, которое осуществляется в реакторах подобного типа, сильно влияет на функцию распределения пузырей по размерам, которая определяется балансом коалесценции и дробления. Показано, что этот баланс чувствителен к типу расплава и особенностям турбулентного его движения, которые, в свою очередь, зависят от таких характеристик как поверхностное натяжение, вязкость, энергия и скорость диссипации турбулентного движения.

В ходе моделирования было установлено, что в условиях донного дутья, квазистационарная функция распределения пузырей по размерам устанавливается достаточно быстро по высоте реактора. Доля газовой фазы, приходящаяся на объём расплава (газо содержание), зависит от способа подачи газа. Так распределённый по дну реактора ввод газа обеспечивает максимальное газо содержание и минимальный размер пузырей газа. От характеристик расплава (плотности, вязкости и поверхностного натяжения), а также расхода газовой фазы зависит её дисперсность и распределение по объёму реактора, что является ключевым фактором, оказывающим влияние на его производительность. Проведён анализ зависимостей степени конверсии от температуры, давления процесса, типа металла и способа ввода газовой фазы.

Библиографический список

1. А. И. Бабарицкий, М. А. Деминский, С. А. Демкин, И. А. Заев, А. В. Клеймёнов, С. В. Коробцев, М. Ф. Кротов, Б. В. Потапкин, Р. В. Смирнов, Ф. Н. Чебаньков, Плазменно-расплавная переработка углеродосодержащего сырья, 2016 г. *Химия твёрдого топлива, 2016, № 3, с. 60–70, DOI: 10.7868/S0023117716030026*

Особенности кинетики атомов фтора и закономерности реактивно-ионного травления кремния в смесях различных фторуглеродных газов с кислородом

Features of fluorine atom kinetics and regularities of reactive-ion etching of silicon in various fluorocarbon gases mixed with oxygen

Ефремов А.М., Бобылев А.В.*, Казначеева Е.М.*, Kwon К.-Н.**

Efremov A.M., Bobylev A.V., Kaznacheeva E.M., Kwon K.-H.

НИИ Молекулярной электроники

124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Акад. Валиева, 6/1, E-mail: aefremov@niime.ru

**Ивановский государственный химико-технологический университет*

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: prototyp16@mail.ru

*** Korea University, 339-700, Sejong, South Korea, E-mail: kwonkh@korea.ac.kr*

The work discusses how the oxygen/fluorocarbon gas ratio in $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ and $\text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ mixture does influence steady-state plasma composition and silicon etching kinetics. It was shown that a) formally identical changes in F atom density vs. O_2 content in a feed gas are caused by different reasons; and b) the effective reaction probability of F atoms with silicon is controlled by both polymer film thickness and surface oxidation.

Газы семейства фреонов ($\text{C}_x\text{H}_y\text{F}_z$) нашли широкое применение в технологии изделий микроэлектроники при проведении процессов реактивно-ионного травления (РИТ) кремния и его соединений. Известно, что конечный результат РИТ зависит от полимеризационной способности плазмообразующего газа, которая определяется отношением z/x в исходной молекуле. Характерной особенностью современной технологии РИТ является использование бинарных смесей, комбинирующих фторуглеродный газ с кислородом. Установлено, что последний увеличивает концентрацию атомов фтора, а также способствует подавлению полимеризации за счёт окисления радикалов CF_x в объеме плазмы и окислительной деструкции уже осажденной фторуглеродной полимерной пленки. Механизмы соответствующих процессов детально изучены лишь для плазмы $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, но по аналогии постулируются и для других фторуглеродных газов.

Целью данной работы являлось сравнительное исследование параметров плазмы, кинетики атомов фтора и закономерностей реактивно-ионного травления кремния в смесях $\text{CF}_4 + \text{O}_2$, $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ переменного начального состава. Схема исследования включала диагностику плазмы (двойной зондом Лангмюра, оптическая эмиссионная спектроскопия), моделирование кинетики плазмохимических процессов и феноменологический анализ механизма травления в приближении эффективной вероятности взаимодействия.

Установлено, что увеличение доли кислорода во всех исследованных смесях а) вызывает качественно однотипные изменения электрофизических параметров плазмы; б) приводит к резкому снижению концентраций полимеробразующих радикалов; и в) сопровождается немонотонными (с максимумом) изменениями концентрации атомов фтора. Причинами последнего эффекта являются увеличение скорости генерации атомов в объеме плазмы, инициируемое процессами вида $\text{CF}_x + \text{O} \rightarrow \text{CF}_{x-1}\text{O} + \text{F}$ (в плазме $\text{CF}_4 + \text{O}_2$), либо снижение частоты гибели атомов в реакциях $\text{CHF}_x + \text{F} \rightarrow \text{CF}_x + \text{HF}$ и $\text{C}_2\text{F}_4 + \text{F} \rightarrow \text{CF}_3 + \text{CF}_2$ (в плазме $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$, соответственно).

Показано, что доминирующим механизмом травления кремния является химическая реакция $\text{Si} + x\text{F} \rightarrow \text{SiF}_x$, скорость которой имеет максимум в области $\sim 20\%$ O_2 для плазмы $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ и $\sim 50\%$ O_2 для систем $\text{CHF}_3 + \text{O}_2$ и $\text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$. Такое изменение скорости травления не согласуется с поведением плотности потока атомов фтора, но обусловлено непостоянством эффективной вероятности взаимодействия при постоянной температуре обрабатываемой поверхности. По нашему мнению, причиной этого является конкуренция процессов снижения толщины фторуглеродной полимерной пленки (что интенсифицирует реакцию травления за счет облегчения доступа атомов фтора к поверхности кремния) и окисления поверхности атомами кислорода (что ингибирует реакцию травления из-за снижения доли доступных центров адсорбции для атомов фтора).

Работа поддержана Министерством высшего образования и науки Российской Федерации, проект FZZW-2023-0010.

Секция 3

**ПОРОШКИ, ПЛЕНКИ,
ПОКРЫТИЯ, МОДИФИКАЦИЯ И
СТРУКТУРИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТИ.
КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ В
ПЛАЗМЕ (ВКЛЮЧАЯ
НАНОТЕХНОЛОГИИ),
СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ.
ПЛАЗМЕННАЯ МЕДИЦИНА И
БИОЛОГИЯ**

Антипригарное микродуговое оксидирование

Non-stick microarc oxidation

Лелевкин В.М., Токарев А.В.

Lelevkin V.M., Tokarev A.V.

*Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызстан,
720000, г. Бишкек, ул. Киевская 44, lelevkin44@mail.ru*

Разработана технология создания керамикоподобного антипригарного покрытия на основе низкотемпературная пропитка алюминия углеродом и микродугового оксидирования [1]. Покрытия обладают уникальными свойствами: износостойкостью, не уступающей карбиду вольфрама, антикоррозионной стойкостью, теплостойкостью, идеальной прочностью сцепления с основой и химической инертностью к различным агрессивным средам, имеют электроизоляционные свойства, толщина до 200 мкм, рабочий температурный диапазон до 500°C, микротвердость по Виккерсу ~18 ГПа, коэффициент трения ~0,04÷0,1, экологическая безвредность в отличие от тефлоновых.

Оксидирование проводится при постоянной плотности тока $I \div 30 \text{ А/дм}^2$, напряжение и ток в цепи изменяются ступенями при подключении или отключении конденсаторов, состав водных электролитов - кислотный или щелочной. При определенной толщине пленки возникают искровые разряды (рис.1) с одновременным протеканием двух процессов: электрохимического окисления и разрыхления искрами формирующегося покрытия. При толщине пленки ~2 мкм искровой разряд переходит в микродуговой, увеличивается яркость, характер перемещения по поверхности и образуется керамоподобное покрытие (рис.2), состоящее из оксида алюминия Al_2O_3 в альфа- и гамма-фазах.



Этапы микродугового оксидирования: 1 - искровые разряды, 2 - микродуговые разряды, 3 - дуговое оксидирование

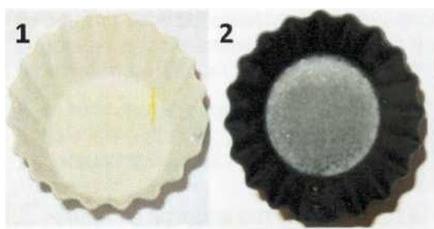


Рис. 2. Внешний вид изделия: 1 - до и 2 - после микродугового оксидирования, пропитки углеродом и обжига в печи.

Патент KG № 1963 “Способ изготовления композиционного покрытия”,

авторы: **Токарев А.В., Юданов В.А**

Возможное применение антипригарных изделий в пищевой промышленности и машиностроении: для производства сковороды, казана, форм для выпечки хлеба, для покрытия трущихся поверхностей, опор скольжения, подшипников и в других производственных деталях и бытовой посуде.

Библиографический список

1. Развитие нанотехнологий в КРСУ /под ред. В.М. Лелевкина. Бишкек: КРСУ, 2013. - 154 с.

Возможность исследования предбиологического синтеза в модельном эксперименте по микроволновому разряду в смесях имитатора лунной пыли LMS-1D и карбоната аммония

Possibility of studying prebiological synthesis in the model experiment on microwave discharge in mixtures of LMS-1D lunar dust simulant and ammonium carbonate

Борзосек В.Д.^{*,}, Гудкова В.В.^{*,**}, Зайцев М.А.^{***}, Морозова Т.И.^{***}, Соколов А.С.^{*},
Князев А.В.^{*}, Летунов А.А.^{*}, Скворцова Н.Н.^{*}, Резаева А.Д.^{*,**}, Малахов Д.В.^{*},
Титов В.А.^{****}, Степахин В.Д.^{*}**

*Borzosekov V.D., Gudkova V.V., Zaitsev M.A., Morozova T.I., Sokolov A.S., Knyazev A.V., Letunov A.A.,
Skvortsova N.N., Rezaeva A.D., Malakhov D.V., Titov V.A., Stepakhin V.D.*

**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, E-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru*

***Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6*

****Институт космических исследований РАН,
117997, Профсоюзная ул., дом 84/32*

*****Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН,
153045, г. Иваново, ул. Академическая, 4*

A new experimental approach to study prebiological synthesis was tested. Its main feature is formation of a plasma-dust cloud using a microwave discharge in the mixture of the target sample (lunar dust simulant) and ammonium carbonate. Such an approach models dusty plasma of a meteoroid tail in the conditions of supposed Earth's early atmosphere that is achieved by evaporation of the ammonium carbonate at the beginning stages of the microwave discharge.

Для экспериментального исследования предбиологического синтеза органических соединений в условиях атмосферы ранней Земли применяются разнообразные методы. В настоящей работе мы впервые предложили и опробовали подход, основанный на микроволновом разряде в смесях порошков [1], для моделирования отдельных этапов предбиологического синтеза. В таком подходе возможно получить плазменно-пылевое облако, которое будет являться лабораторной моделью пылевой плазмы хвостов метеороидов при их пролете в атмосфере ранней Земли.

В качестве мишени, которая в первом приближении может выступать заменой метеороидов, использовался имитатор лунной пыли LMS-1D (пироксен, базальт с содержанием стекла, анортозит, оливин, ильменит). Молекулы H_2O , NH_3 и CO_2 , присутствие которых предполагается в атмосфере ранней Земли, должны были попадать в реакционную зону при разложении под действием разряда карбоната аммония $(NH_4)_2CO_3$, добавленного к основной мишени.

Образцы подвергались воздействию микроволнового излучения гиротрона (частота 75 ГГц) в виде гауссова пучка диаметром 6 см и мощностью 400 кВт. Использовались как однократные импульсы длительностью 8 мс, так и последовательность из трех импульсов длительностью 2 мс с паузами между ними 8.5 мс. В часть образцов для облегчения микроволнового пробы добавлялся порошок железа (15% масс.). С помощью высокоскоростной камеры зарегистрирована динамика образования плазменно-пылевых облаков для всех образцов. С помощью спектрометрии излучения плазмы зарегистрированы молекулярные полосы OH ($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$), NH ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma$), CN ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$), C_2 ($d^3\Pi \rightarrow a^3\Pi$). Линии Fe I, Mg I, Ti I, Si I и Ca I в спектрах излучения указывают на разрушение петрогенных оксидов, входящих в состав основной мишени. По спектрам излучения также определялись температуры. Для образца без добавления порошка железа и в режиме облучения последовательностью импульсов была проведена оценка колебательной $T_v = 5000$ К и вращательной $T_r = 2500$ К температуры CN ($B^2\Sigma$) по сравнению экспериментальных и рассчитанных контуров.

Библиографический список

1. Батанов Г.М., Косый И.А. // *Физика плазмы* **2015**. Т. 41. С. 918.

Изменение физико-химических свойств и биосовместимости полиэтилентерефталата путем обработки в гибридной плазме

Changes of polyethylene terephthalate physicochemical properties and biocompatibility by processing in hybrid plasma

Васильева Т.М., Никольская Е.Д.*, Васильев М.Н., Моллаева М.Р.*, Чиркина М.В.*, Сокол М.Б.*, Яббаров Н.Г.*, Шикова Т.Г.**

Vasilieva T.M., Nikolskaya E.D., Vasiliev M.N., Mollaeva M.R., Chirkina M.V., Sokol M.B., Yabbarov N.G., Shikova T.G.

Объединенный институт высоких температур РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, E-mail: tmvasilieva@gmail.com

**Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН*

119, г. Москва, ул. Косыгина, 4, E-mail: elenanikolskaja@gmail.com

***Ивановский государственный химико-технологический университет*

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: shikova@isuct.ru

Modification of polyethylene terephthalate in low-temperature highly nonequilibrium hybrid plasma, which was excited by joint action of a continuous scanning electron beam and a capacity coupled RF-gas discharge are considered. After plasma-chemical modification, the polymer surface showed good wettability and biocompatibility with BJ-5ta human fibroblasts, as well as lower hemolytic activity than untreated polyethylene terephthalate.

Изучена возможность применения пучково-плазменных химических реакторов, генерирующих холодную гибридную плазму, для получения нецитотоксичных полимерных поверхностей, обладающих высокой гидрофильностью и хорошей биосовместимостью с культурой фибробластов человека и эритроцитами человека. Кислородная гибридная плазма возбуждалась совместным действием непрерывного сканирующего электронного пучка и емкостного ВЧ-газового разряда. Эксперименты показали, что обработка гибридной плазмой приводит к образованию полярных кислородсодержащих функциональных групп в поверхностном слое пленок полиэтилентерефталата. При этом в результате плазмохимической модификации не происходит термических или радиационных повреждений в образцах полимеров. Плазменно-модифицированные полимеры оказались нецитотоксичными и обладали хорошей биосовместимостью с фибробластами человека линии BJ-5ta, а также более низкой гемолитической активностью, чем необработанный полиэтилентерефталат. Эксперименты показали, что в гибридной плазме не возникают явления, вызванные электростатическим зарядом полимеров, поскольку компонент электронного пучка гибридной плазмы устраняет заряд материала при его обработке. Электронный пучок позволяет также эффективно управлять геометрией реакционного объема и потоками активных частиц плазмы, падающими на поверхность образца. Это открывает новые подходы к созданию резко структурированных паттернов или плавных градиентов функциональности на плоских и трехмерных полимерных изделиях сложной геометрии.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФ № 21-79-30062.

Многоискровой кольцевой высоковольтный импульсно-периодический разряд в среде вода-газ для решения биологических задач

Multispark high voltage ring pulse-periodic discharge in water-gas phase for biological tasks

Гудкова В.В.*, Зимина М.А.*, Моряков И.В., Артемьев К.В., Давыдов А.М.,
Кончекоев Е.М.*, Анпилов А.М., Борзосекоев В.Д.*

*Gudkova V.V., Zimina M.A., Moryakov I.V., Artemyev K.V., Davydov A.M.,
Konchekov E.M., Anpilov A.M., Borzosekov V.D.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, E-mail: gudkova-vi@fpl.gpi.ru

**Российский университет дружбы народов,*

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, E-mail: gudkova_vv@pfur.ru

The study of parameters of a multi-spark high-voltage discharge during treatment of deionized water has been carried out. The results on the concentrations of formed long-lived reactive oxygen and nitrogen species in the liquid were obtained for argon and air injection. The electrode system is made of duralumin alloy D16.

Известно, что при воздействии газовых разрядов на жидкости образуются активные формы кислорода и азота. Применение таких «плазменно-активированных» растворов востребовано во многих задачах современной биологии: от интенсификации роста растений и борьбы с фитопатогенами до таргетной противоопухолевой терапии.

В данной работе в качестве источника низкотемпературной плазмы используется многоискровой кольцевой разряд с инъекцией газа в межэлектродные промежутки [1]. Амплитуда напряжения, подаваемого на разрядник, составляла $U = 20$ кВ, амплитуда тока $I \leq 300$ А, а частота следования высоковольтных импульсов $f = 50$ Гц, длительность импульса 2 мкс. Поток газа (аргон, воздух) составил 4 л/мин. Разрядная система выполнена из дюралюминиевого сплава Д16.

Для определения параметров плазмы и ее качественного состава в условиях активной эрозии электродов были зарегистрированы спектры излучения (рис.1а). Концентрации активных форм кислорода и азота (рис.1б) в жидкости определялись спектрофотометрически. Концентрации нитрит- и нитрат- ионов при воздействии в течение 10 минут достигали значений 1000 ± 100 мкМ и 550 ± 25 мкМ соответственно.

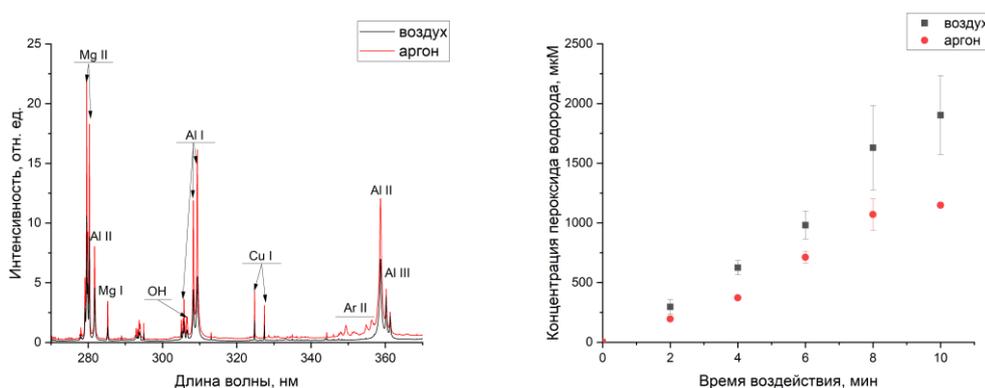


Рис. 1. а) спектры излучения разряда при инъекции воздуха и аргона, б) концентрации пероксида водорода в зависимости от времени воздействия многоискровым источником на деионизованную воду.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-29-00736.

Библиографический список

1. Гудкова В. В., Разволяева Д. А., Моряков И.В., Анпилов А.М. // *Физика плазмы* **2023**. Т. 49. С. 1160.

Получение аминосодержащих полимерных покрытий из циклопропиламина методом плазменной полимеризации

Preparation of amino-containing polymer coatings from cyclopropylamine by plasma polymerization

Демаков А.М., Пермякова Е.С., Штанский Д.В.

Demakov A.M., Permyakova E.S., Shtansky D.V.

Национальный университет науки и технологий МИСИ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, E-mail: amdemakov@misis.ru

На настоящий момент плазменная обработка широко используемый процесс модификации и активации поверхности полимеров за счет введения различных химических групп на поверхности, что улучшает адгезию и гидрофильность. Однако, при использовании метода плазменного травления поверхности аргоном или кислородом поверхности полимеров, нет возможности контролировать формирование функциональных групп, а также могут происходить изменения в структуре и морфологии материалов, что особенно важно для наноструктурированных поверхностей. Таким образом, в ряде применений, таких как медицина и биоинженерия, более предпочтительным является метод плазменной полимеризации, позволяющий контролировать толщину осаждаемого полимера и его химический состав. В медицине одной из наиболее востребованных групп является амино-группа (-NH₂), поскольку высокая плотность встраивания групп -NH₂ обеспечивает хорошую адгезию и пролиферацию остеобластов и других клеток. Поверхности с высоким содержанием амино групп обладают хорошей адгезией, нашли применение в биомедицине в качестве поддержки для иммобилизации биомолекул, биосенсоров, биосовместимых поверхностей для имплантатов, а также субстратов для клеточных культур.

Целью данной работы является оптимизация режима осаждения амино-содержащих слоев в процессе плазменной полимеризации циклопропиламина. Осаждение плазмополимеров проводили с использованием вакуумной системы ZP-COVANCE-RFPE-3MP, оснащенной масляным диффузионным насосом, обеспечивающим остаточное давление в вакуумной камере ниже 30 Па. Циклопропиламин (C₃H₅NH₂) (98%) подавали в реактор с использованием системы для подачи жидких прекурсоров в потоке аргона для осаждения тонких пленок на кремниевые пластины и поликапролактоновые волокна. Варьируемыми параметрами осаждения были мощность генерации плазмы и скорость подачи газов. Полученные на разных режимах плазменно-осажденные полимерные пленки исследовали методами СЭМ, ЭДРС, РФЭС, ИК-спектроскопии, проводили измерения краевого угла смачивания и изучали процесс набухания и разложения покрытий.

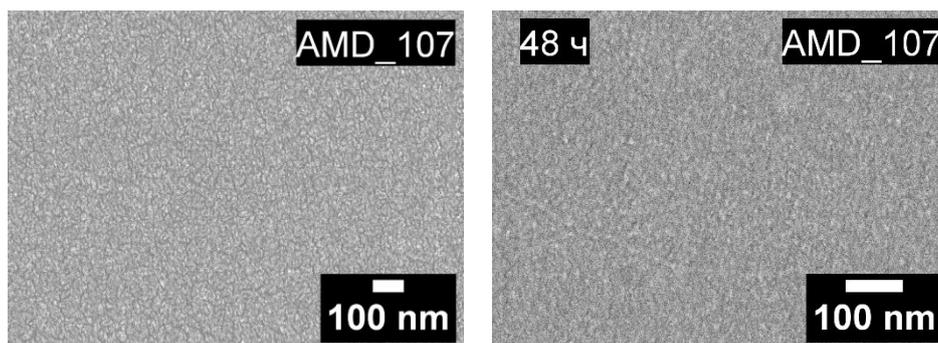


Рисунок 1 - СЭМ-микрофотографии полимера, осажденного в плазме C₃H₅NH₂/Ar и после выдержки в воде на 48 часов.

Оптимизированный режим был использован для обработки поликапролактоновых волокон с последующим изучением роста и пролиферации различных линий человеческих клеток.

Данная работа была поддержана Российским научным фондом (грант №20–19–00120–П).

Влияние разряда постоянного тока на свойства поверхности пленок полифениленоксида

The effect of DC discharge on the surface properties of polyphenylene oxide films

Зиновьев А.В.*, **Пискарев М.С.***, **Гильман А.Б.***, **Кузнецов А.А.***, **Скрылева Е. А.****,
Сенатулин Б. Р.**, **Гатин А. К.*****, **Сырцова Д. А.******, **Алентьев А. Ю.******

**Институт синтетических полимерных материалов им.Н.С. Ениколопова Российской академии наук, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70, E-mail: zinovev.97@inbox.ru*

***Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 4*

****Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4*

*****Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 29*

Polyphenylene oxide is widely used as a material for gas separation membranes, but their selectivity does not exceed 3–4. It should be noted that the surface of the polymer is hydrophobic and modification by low-temperature plasma can significantly improve its contact and gas separation properties. This work is devoted to study the effect of low-pressure direct current discharge on the properties and surface structure of poly(oxy-2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (PPO) films. PPO films of ~30 μm thick were modified by direct current discharge, filtered air served as the working gas, samples were placed at the cathode or anode (pressure p~15 Pa, discharge current I=50 mA, treatment time 10-70 s). The setup and methodology are described in [1]. A study of changes in the contact properties of PPO was carried out and data on surface energy, polar and dispersion components were obtained. Changes in the chemical structure of the samples were studied using X-ray photoelectron spectroscopy, and changes in the morphology of the film surface were studied using atomic force microscopy. Experiments showed that the selectivity for the CO₂/N₂ pair increased from 19 to 52, and for the O₂/N₂ pair from 4 to 5.2 and does not change for 30 days.

Полифениленоксид находит широкое применение как материал для газоразделительных мембран, однако их селективность не превышает 3–4. Следует отметить, что поверхность полимера является гидрофобной и модифицирование путем воздействия низкотемпературной плазмы позволяет значительно улучшить его контактные и газоразделительные свойства. Данная работа посвящена изучению воздействия разряда постоянного тока пониженного давления на свойства и структуру поверхности пленок поли(окси-2,6-диметил-1,4-фениленоксида) (ПФО). Пленки ПФО толщиной ~30 мкм модифицировали в разряде постоянного тока, рабочим газом служил фильтрованный воздух, образцы помещали на катод или аноде, давление p~15 Па, ток разряда I=50 мА, время обработки 10-70с. Установка и методика описаны в [1]. Было проведено изучение изменения контактных свойств ПФО и получены данные по поверхностной энергии, полярному и дисперсионному компонентам. Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии изучены изменения химической структуры образцов, а изменения морфологии поверхности пленок исследованы методом атомно-силовой микроскопии. Эксперименты показали, что селективность по паре CO₂/N₂ возростала от 19 до 52, а по паре O₂/N₂ от 4 до 5.2 и сохранялась в течение 30 суток.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, номер темы: FF5M-2024-0002.

Библиографический список

1. Demina T.S., Drozdova M.G., Yablokov M.Y., Gaidar A.I., Gilman A.B., Zaytseva-Zotova D.S., Markvicheva E.A., Akopova T.A., Zelenetskii A.N. // *Plasma Proc. Polym.* **2015.** V. 12. P. 710.

Улучшение газоразделительных свойств стеклообразных полимеров, модифицированных в низкотемпературной плазме

Improvement of Gas Separation Properties of Glassy Polymers by low-temperature plasma treatment

Сырцова Д.А.¹, Зиновьев А.В.², Никифоров Р.Ю.¹, Алентьев А.Ю.¹, Пискарев М.С.², Возняк А.И.¹, Бермешев М.В.¹, Кузнецов А.А.², Тепляков В.В.¹, Гильман А.Б.²

Syrtsova D.A., Zinoviev A.V., Nikiforov R.Yu., Alentyev A.Yu., Piskarev M.S., Voznyak A.I., Bermeshev M.V., Kuznetsov A.A., Teplyakov V.V., Gilman A.B.

¹ *Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН,
119991 Москва, Ленинский пр.. 29, E-mail: syrtsova@ips.ac.ru*

² *Институт синтетических полимерных материалов им. Н.Е. Ениколопова РАН, Москва*

The effect of one-sided surface treatment of glassy polymeric films (polyphenylene oxide, polyvinyltrimethylsilane, additive poly(5-ethylidene-2-norbornene) by low-temperature plasma on their gas separation properties has been studied. It was found that the modification leads to a significant increase in gas selectivity, particularly for O₂-N₂, He-CH₄, H₂-CH₄ pairs, as well as to an increase in the permeability-selectivity ratio, which expands the possibilities of using such polymers in membrane gas separation processes.

Расширение области применения мембран и возрастающие требования к их характеристикам приводят к тому, что все большее внимание уделяется различным физико-химическим методам модификации мембранных полимеров для улучшения их свойств, в том числе, газоразделительных. Преимущество имеют наиболее экологически безопасные подходы, основанные на безрастворных технологиях, в частности, модифицирование поверхности мембран в низкотемпературной плазме.

В работе исследовано влияние одностороннего поверхностного воздействия низкотемпературной плазмы на газотранспортные и газоразделительные свойства полимерных пленок из частично кристаллического полифениленоксида (ПФО), поливинилтриметилсилана (ПВТМС) и аддитивного полиэтиленнорборнена (PENB). Модификацию проводили в разряде постоянного тока пониженного давления, рабочим газом служил воздух (p~15 Па), ток разряда - 50 мА, время обработки - 10-60 с. Проницаемость O₂, N₂, CO₂, CH₄, He и H₂ через образцы исследовали дифференциальным методом с газохроматографическим окончанием при температуре мембранной ячейки 20-23°C. Установлено, что в результате модификации наблюдается существенное изменение потока газов вследствие изменения химической структуры поверхностного и приповерхностного слоев, а также изменения шероховатости и гидрофильных свойств поверхности. Исследование закономерностей влияния обработки в низкотемпературной плазме на газотранспортные параметры среднепроницаемых стеклообразных полимеров показало, что одним из важнейших параметров модификации является время модификации. Найдено, что существует оптимальный временной интервал, составляющий для всех исследованных в данной работе полимеров 20-40 с, превышение которого не приводит к дальнейшему улучшению показателей, а в ряде случаев заметно ухудшает газоразделительные и механические свойства образцов. Не менее важным фактором является структура модифицируемого полимера. Так, при максимальном возрастании селективности газов в оптимальном временном интервале, в частности, по парам O₂-N₂, CO₂-CH₄, He-CH₄ и H₂-CH₄, в случае ПВТМС и PENB наблюдается снижение проницаемости O₂, N₂, CO₂, CH₄ при сохранении уровня потока по He и H₂, а в случае ПФО - возрастание потока всех исследуемых газов относительно исходных значений. Исследование стабильности результатов модифицирования показало, что эффект сохраняется в течение длительного времени (1 - 9 мес.), причем, в большинстве случаев наблюдается дальнейшее увеличение селективности мембран.

Полученные результаты подтверждают результативность данного метода модификации для улучшения газоразделительных свойств стеклообразных полимеров различной структуры, что позволит повысить эффективность их применения в различных процессах газоразделения, например, для разделения компонентов воздуха и метансодержащих смесей.

Работа выполнена по Гос.заданию ИНХС РАН и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, номер темы: FFSM-2024-0002.

Функционализация поверхности трековых мембран в низкотемпературной плазме для расширения области применения

Functionalization of the track-etched membranes surface by low-temperature plasma to expand the range of application

Кравец Л.И., Гильман А.Б.*, Елинсон В.М.**

Kravets L.I., Gilman A.B., Elinson V.M.

Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, 141980, г. Дубна ул. Жолио-Кюри, 6 E-mail: kravets@jinr.ru

Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 70 E-mail: plasma@ispm.ru

***Московский авиационный институт, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4 E-mail: vm_e@mail.ru*

The results of studies of the effect of non-polymerizing and polymerizing gases by low-temperature plasma under discharge conditions on track-etched membranes made of poly(ethylene terephthalate) and polypropylene are presented. It is shown that the application of the plasma chemical modification method makes it possible to control of the membrane surface and structural properties, which, in turn, leads to the appearance of new functional properties in modified membranes. This significantly expands the application areas of track-etched membranes.

Для расширения сферы применения промышленно производимых мембран проводятся работы по функционализации их поверхности, в результате которой мембраны за счет изменения состава химических групп поверхностного слоя и морфологии поверхности приобретают новые свойства. Широкое распространение получил для этой цели метод обработки в низкотемпературной плазме, с помощью которого благодаря изменению состава функциональных групп на поверхности мембран можно улучшить целый ряд свойств, таких как адсорбционные, селективные, транспортные и др. Это позволяет существенно расширить области использования полимерных мембран. При таком воздействии основная масса матрицы мембраны не изменяется, что важно с точки зрения сохранения их механических и физико-химических свойств.

В данной работе приведены результаты исследований воздействия низкотемпературной плазмы неполимеризующихся и полимеризующихся газов на трековые мембраны из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полипропилена. Показано, что применение плазмохимического модифицирования позволяет управлять поверхностными и структурными свойствами мембран, что, в свою очередь, приводит к появлению у модифицированных мембран новых функциональных свойств. Так, гидрофилизация поверхности ПЭТФ трековых мембран в плазме воздуха приводит к повышению их биосовместимости. Это позволяет использовать такие мембраны в качестве эксплантодренажа при хирургическом лечении рефрактерной глаукомы. Особый интерес вызывает функционализация трековых мембран осаждением на их поверхности тонких полимерных покрытий, получаемых в процессе плазмохимической полимеризации органических соединений различной природы. Модифицированные таким образом композиционные мембраны можно использовать в микрофлюидике для управления потоком жидкости в микроканалах. Осаждение на поверхности трековых мембран гидрофобных покрытий приводит к созданию композиционных мембран, которые могут быть применены в процессах водоподготовки для получения питьевой воды методом мембранной дистилляции. При обработке мембран в плазме неполимеризующихся газов с последующей прививкой полимеров из газовой или жидкой фазы традиционными химическими методами могут быть получены “умные” мембраны, транспортные характеристики которых регулируются путем изменения внешних условий, например, температуры, состава и pH раствора, давления и т.п. Мембраны с подобными свойствами могут быть использованы для управляемой доставки лекарственных препаратов в организме человека и для создания химических и биохимических сенсоров.

Осаждение на поверхности трековых мембран гидрофобных полимерных покрытий из активной газовой фазы

Deposition on the track-etched membranes surface of hydrophobic polymer coatings from the active gas phase

Кравец Л.И., Яблоков М.Ю.*, Ярмоленко М.А.**

Kravets L.I., Yablokov M.Yu., Yarmolenko M.A.

*Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций
им. Г.Н. Флерова, 141980, г. Дубна ул. Жолио-Кюри, 6 E-mail: kravets@jinr.ru*

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, 117393,
г. Москва, ул. Профсоюзная, 70 E-mail: yabl1@yandex.ru*

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 246019, г. Гомель, ул. Советская,
104 E-mail: simmak79@mail.ru*

The aim of this study is to compare the surface properties and chemical structure of thin polymer coatings deposited on the poly(ethylene terephthalate) track-etched membranes surface by the plasma polymerization of 1,1,1,2-tetrafluoroethane and by the magnetron and electron-beam sputtering of polytetrafluoroethylene in vacuum. Also to determine the advantages of one of these methods in order to obtain a highly hydrophobic coating for the use of composite membranes of the developed type in membrane distillation processes for water desalination.

Одним из методов модифицирования мембран является осаждение на их поверхности тонких полимерных покрытий различной природы. Существует широкий круг физико-химических методов для этой цели. Наибольший интерес представляют методы формирования покрытий из активной газовой фазы. Эта группа методов включает осаждение покрытий в результате протекания реакций полимеризации адсорбированных на поверхности мембран низкомолекулярных органических соединений, активированных под воздействием электронов, ионов, УФ-излучения, или диспергированных в результате воздействия на полимер концентрированного потока энергии (электронов, ионов, лазерного излучения). Указанные методы являются высокотехнологичными, производительными и позволяют регулировать структуру и состав осаждаемых покрытий в широком диапазоне.

В данной работе проведено сравнительное исследование поверхностных свойств и химической структуры полимерных покрытий, осажденных на поверхности трековых мембран (ТМ) из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) путем плазмохимической полимеризации 1,1,1,2-тетрафторэтана (ТФЭ), а также методами магнетронного распыления и электронно-лучевого диспергирования политетрафторэтилена (ПТФЭ) в вакууме с целью получения композиционных мембран для опреснения воды. Показано, что применение данных методов модифицирования приводит к образованию композиционных мембран, состоящих из двух слоев, одним из которых является исходная ПЭТФ ТМ, характеризующаяся средним уровнем гидрофильности. Угол смачивания ее поверхности составляет 65°. Второй слой имеет гидрофобную природу. Угол смачивания этого слоя, в зависимости от его толщины и используемого метода модифицирования, изменяется от 92° до 160°. Установлено, что химическая структура покрытий, осажденных методом электронно-лучевого диспергирования ПТФЭ, в большей степени соответствует структуре исходного полимера по сравнению с покрытиями, полученными методами плазмохимической полимеризации ТФЭ и магнетронного распыления ПТФЭ. Показано, что композиционные мембраны разработанного образца могут быть применены для обессоливания водного раствора хлорида натрия методом мембранной дистилляции.

Плазменный разряд в жидкофазных средах под действием интенсивной ультразвуковой кавитации и его применение для синтеза наночастиц оксидов металлов

Plasma discharge in liquid-phase media under the effect of intensive ultrasonic cavitation and its application for the synthesis of nanoparticles of metal oxides

Булычев Н.А.

Bulychev N.A.

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, E-mail: nbulychev@mail.ru*

В данной работе при использовании плазмохимических процессов в жидкофазных средах получены наночастицы оксидов металлов с контролируемыми свойствами, характеристики которых определяются сочетанием воздействия на жидкую среду импульсных или стационарных электрических разрядов и ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме.

Создание наноматериалов на основе оксидов металлов при высокой локальной концентрации энергии в плазменном разряде с кавитацией позволяет использовать неравновесные условия для формирования сложных нанокристаллов.

В данном исследовании рассмотрены методы получения наночастиц оксидов металлов в плазменном разряде (мощностью 100-400 Вт) под воздействием ультразвуковой кавитации ($0,5-3 \text{ Вт/см}^3$) в жидкофазных средах (вода, углеводороды, кислородсодержащие органические соединения и их смеси). Образцы наночастиц оксидов металлов и металлических наночастиц были синтезированы в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации с использованием разрядных электродов из различных металлов: цинка, железа, меди, алюминия, кобальта, олова, хрома и других в различных сочетаниях, а также разрядных электродов из сплавов: латуни и бронзы, и таким образом были синтезированы наночастицы оксидов меди и цинка, а также оксидов меди и олова.

Ультразвуковое воздействие на жидкофазную среду в режиме развитой кавитации изменяет в процессе плазмохимических реакций условия электрического пробоя между разрядными электродами в реакционной камере за счет того, что кавитационные пузырьки в электрическом поле способны выстраиваться в цепочки, таким образом изменяя среду с жидкофазной на паро-жидкостную, при этом сам разряд имеет падающую вольт-амперную характеристику, схожую с вольт-амперной характеристикой аномального тлеющего разряда в газе.

Определены оптимальные параметры разряда (режим, ток, напряжение) и ультразвукового поля (частота, мощность). Синтезированные образцы наночастиц были охарактеризованы методами физико-химического анализа: динамического светорассеяния, рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. Получены данные о размере, химическом и фазовом составе наночастиц.

Измерение значений электрокинетического потенциала поверхности исходных наночастиц в водной дисперсионной среде позволило установить, что под воздействием ультразвука частицы оксидов металлов приобретают дополнительные активные центры адсорбции, способные к взаимодействию с функциональными группами полимерной матрицы.

Получение наночастиц оксидов металлов и металлических наночастиц с контролируемым (и переменным) составом, размером и формой имеет принципиальное значение, поскольку суспензии этих наночастиц будут использоваться в качестве основы для получения органо-неорганических гибридных дисперсных материалов, которые будут изучены и использованы для создания конструкционных и функциональных композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00540.

Плазмохимическое модифицирование хитозана для получения ранозаживляющих материалов

Plasma-chemical modification of chitosan to obtain wound-healing materials

Титов В.А.^а, Сироткин Н.А.^а, Наумова И.К.^б, Хижкина М.А.^с, Кичеева Т.Г.^с,
Агафонов А.В.^а

Titov V.A., Sirotkin N.A., Naumova I.K., Khizhkina M.A., Kicheeva T.G., Agafonov A.V.

^а *Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук
Россия 153045, Иваново, ул. Академическая, 1, E-mail: tva@isc-ras.ru*

^б *Ивановский государственный университет*

Россия 153000, Иваново, ул. Ермака, 39, E-mail: irinauma@mail.ru

^с *Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет
Россия, Иваново, ул. Советская, 45*

Polymer nanocomposites containing nanoparticles of silver, zinc oxide (ZnO) or copper oxide (Cu₂O) were synthesized using a discharge between metal rod electrodes immersed in a suspension of chitosan and polyvinyl alcohol (PVA) in distilled water. The obtained composites were characterized using XRD, FTIR and electronic absorption spectroscopy. The wound-healing properties of composites with silver and zinc oxide nanoparticles were studied.

С использованием разряда между металлическими стержневыми электродами, погруженными в суспензию хитозана и поливинилового спирта (ПВС) в дистиллированной воде, синтезированы полимерные нанокомпозиты, содержащие наночастицы серебра, оксида цинка (ZnO) или оксида меди (Cu₂O). Синтез выполняли в ячейке с объемом жидкости 100 мл при содержании 1 г хитозана и 1 г ПВС. Разряд возбуждали между стержнями из серебра, цинка или меди диаметром 1 мм при межэлектродном расстоянии 1,5 мм. Использовали источник постоянного напряжения ($U_{\text{max}}=5$ кВ) с балластным сопротивлением 0,5 кОм. Осциллограммы напряжения и тока получены с помощью многоканального цифрового осциллографа Hantek-4104B (Китай). Средний ток разряда составлял 0,25 А. Скорость эрозии электродов (0,012 – 0,014 г/мин) определяли, взвешивая электроды до и после эксперимента. Подробное схема установки и детали экспериментов описаны в [1]. После прекращения разряда раствор полимера с синтезированными наночастицами выливали в стеклянную чашку Петри и получали пленки испарением растворителя при 40°C. Для исследования ранозаживляющих свойств полученных композитов их наносили на стерильный медицинский бинт (ООО «Нью-Фарм», Россия) размером 10×10 см, помещая его на 1 час в жидкую композицию, полученную плазмохимической обработкой, с последующей сушкой при 30°C. Полученные таким образом повязки использовали в экспериментах с мышами, которым с соблюдением антисептики на кожу наносили раны длиной 5 мм. Эти эксперименты были выполнены в Институте ветеринарной медицины и биоинженерии Верхневолжского государственного агробиотехнологического университета. Результаты рентгенофазового анализа и ИК-спектры продемонстрировали взаимодействие между наночастицами металла или оксида и полимерами. В электронных спектрах поглощения образцов присутствовали полосы, характерные для поверхностного плазмонного резонанса в наночастицах. Закрепление композита на поверхности бинтов подтверждено данными растровой электронной микроскопии. Эксперименты показали, что бинты, покрытые композитами хитозан/ПВС с наночастицами Ag или ZnO, оказывают благотворное влияние на заживление ран. Если в контрольной группе животных полное заживление наблюдалось на 13-е сутки, то в группах с применением композитов с наночастицами серебра или оксида цинка раневые дефекты полностью закрывались на 7-е – 10-е сутки. При этом раневая поверхность была гладкой и имела розовый цвет. Положительные эффекты отмечены и при гистологическом исследовании препаратов кожи. Полученные результаты показывают целесообразность дальнейших исследований роли различных компонентов композитов в заживлении ран на разных стадиях.

Библиографический список

1. Sirotkin, N.; Khlyustova, A.; Costerin, D.; Naumova, I.; Titov, V.; Agafonov, A. Applications of plasma synthesized ZnO, TiO₂, and Zn/TiO_x nanoparticles for making antimicrobial wound-healing viscose patches // *Plasma Process Polym.* **2022.** *V. 19.* P. 2100093.

Опыт применения барьерного разряда для влияния на морфогенез и продуктивность некоторых сельскохозяйственных культур

Experience of using barrier discharge to influence the morphogenesis and productivity of some agricultural crops

Кудряшов С.В., Рябов А.Ю., Очередько А.Н.*, Минич А.С.**

Kudryashov S.V., Ryabov A.Yu., Ochered'ko A.N., Minich A.S.

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук*

634055, г. Томск, пр. Академический, 4, E-mail: ks@ipc.tsc.ru

***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный педагогический университет"*

634061 г. Томск, ул. Киевская, 60, E-mail: minich@tspu.edu.ru

The experience of using barrier discharge to influence the morphogenesis and productivity of some agricultural crops is discussed. The ways of technology development are proposed.

В последние десятилетие активно изучается влияние обработки семян плазмой электрических разрядов и активированной плазмой водой на изменение их посевных качеств и морфогенез растений, выращенных из них [1-2]. Показано, что предпосевная обработка семян плазмой электрических разрядов может улучшать их всхожесть, активировать рост и повышать продуктивность растений. При этом основными объектами исследований являются сельскохозяйственные культуры открытого грунта, культуры, выращиваемые в условия тепличных хозяйств, практически не упоминаются.

В сообщении будет обобщен опыт применения барьерного разряда, а также активированной им в различных газовых средах воды, на морфогенез и продуктивность некоторых сельскохозяйственных культур закрытого грунта, например, *Lactuca sativa*, *Ocimum basilicum*. Обсуждены дальнейшие пути развития исследований в этом направлении.

Библиографический список

1. Brandenburg, Ronny, Annemie Bogaerts, Waldo Bongers, Alexander Fridman, Gregory Fridman, Bruce R. Locke, Vandana Miller et al // *Plasma Processes and Polymers*, **2018**, V.16. No.1. P. 1–18.
2. Thirumdas Rohit, Anjinelyulu Kothakota, Uday Annapure, Kaliramesh Siliveru, Renald Blundell, Ruben Gatt, Vasilis P. Valdramidis // *Trends in Food Science and Technology*. **2018**. V. 77, P. 21–31.

Воздействие низкотемпературной плазмы на смачиваемость и электретные свойства полимерных материалов

The impact of low-temperature plasma on the wettability and electret properties of polymer materials

Яблоков М.Ю., Кузнецов А.А.

Yablokov, M.Yu., Kuznetsov A.A.

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,
117393, г.Москва, Профсоюзная, 70, E-mail: yabl1@yandex.ru*

The mechanism for increasing of the wettability of polymers treated in low-temperature plasma as a result of the accumulation of electrical charges in the surface layer is presented. The appearance of electret charges in surface layer of polymer film during plasma treatment may be associated with the formation of free radicals with high electron affinity and attachment of electrons deposited from plasma. The decay of electret charges leads to hydrophobic recovery of plasma-treated polymers.

Воздействие низкотемпературной плазмы на полимерные материалы приводит к гидрофилизации их поверхности. Однако, это воздействие не обеспечивает сохранение низких значений угла смачивания; с течением времени наблюдается эффект восстановления гидрофобности и ухудшение адгезионных свойств полимеров, обработанных в плазме [1]. Причиной увеличения гидрофильности, как указывается в большинстве публикаций, является изменение химического состава поверхности, и, в частности, увеличение количества полярных кислородсодержащих групп в поверхностном слое полимера. В то же время, как было установлено с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для ряда полимеров, концентрация полярных групп в поверхностном слое полимеров, обработанных в низкотемпературной плазме, мало изменяется при хранении образцов в течение длительного времени. Это свидетельствует о том, что основной причиной восстановления гидрофобности не является изменение концентрации полярных групп в поверхностном слое. Предполагается, что этой причиной является релаксация электретного заряда, локализованного в приповерхностном слое полимеров в процессе плазменной обработки [2].

В данной работе проведено исследование взаимосвязи смачиваемости и электретного заряда пленок политетрафторэтилена, обработанных в тлеющем разряде постоянного тока. Было изучено изменение угла смачивания водой и поверхностной плотности электретного заряда от времени хранения обработанных в низкотемпературной плазме полимерных пленок в воздушной среде с различной относительной влажностью. Было показано, что поверхностная плотность электретного заряда снижается, а угол смачивания растет, и тем быстрее, чем выше относительная влажность воздуха при хранении полимерных пленок. В данной работе приводятся расчеты относительного вклада межмолекулярного взаимодействия молекул воды и зарядов, а также молекул воды и полярных групп, образовавшихся на поверхности ПТФЭ в процессе плазменной обработки. Расчеты показывают, что заряд-дипольное взаимодействие более чем на порядок превосходит диполь-дипольное взаимодействие.

Таким образом, наблюдаемая корреляция между смачиваемостью и эффективной плотностью поверхностного заряда пленок ПТФЭ, обработанных в плазме, а также проведенные модельные расчеты позволяют предполагать, что поверхностный заряд играет важную роль в смачивании полимеров, обработанных в плазме.

Библиографический список

1. Primc G., Mozetič, M. // *Polymers*. **2022**. V.14. P. 2496.

Yablokov M., Piskarev M., Gilman A., Kechek'yan A., Kuznetsov A. // *J. Physics: Conf. Series*. **2018**. 12012.

Синтез многокомпонентных и композиционных материалов в высокоскоростной струе плазмы дугового разряда

Synthesis of multicomponent and composite materials in a high-speed arc discharge plasma jet

Никитин Д.С.*, Шаненков И.И., Насырбаев А., Сивков А.А.
Nikitin D.S., Shanenkov I.I., Nassyrbayev A., Sivkov A.A.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, E-mail: nikitindmsr@yandex.ru*

Multicomponent and composite powders were obtained using high-speed arc discharge plasma. The method makes it possible to synthesize medium- (Hf-Ta-C) and high-entropy carbides (TiZrNbHfTaC₅), as well as metal matrix materials reinforced with superhard carbides.

Высокий интерес к многокомпонентным и композиционным материалам обусловлен возможностью достижения улучшенных физических свойств в сравнении с однокомпонентными составами. Более всего выделяются две области исследований: получение металломатричных композитов с керамическими армирующими компонентами [1] и создание средне- и высокоэнтروпийных материалов, в том числе карбидов [2].

В основе плазмодинамического синтеза лежит использование уникального устройства – коаксиального магнитоплазменного ускорителя, который обеспечивает генерацию, ускорение и распыление плазмы с последующей кристаллизацией наночастиц в едином рабочем процессе длительностью менее 1 мс. За счет достижения высоких скоростей (более 1 км/с) и температуры (более 10⁵ К) в плазменном потоке в экспериментальной системе удается достигать высоких скоростей охлаждения (более 10⁸ К/с) материала из жидкофазного состояния. Это является основным условием получения многокомпонентных и высокоэнтропийных, карбидов в нанодисперсном состоянии. Так, при использовании графитовой электродной системы продемонстрирована возможность синтеза среднеэнтропийных композиций Hf-Ta-C и высокоэнтропийных карбидов TiZrNbHfTaC₅. Кроме того, за счет использования свободного углерода и графитовой электродной системы ускорителя возможно получать сложные морфологические нанокompозиты типа «ядро-оболочка», которые обладают преимуществами для применения в электрокаталитических процессах.

При использовании металлических электродных систем возможно создавать новые композиционные материалы, в том числе с алюминиевой и медной матрицами, армированные сверхтвердыми керамическими компонентами (SiC, B₄C, WC, TiC). В этом случае осуществляется подход *in-situ*, когда формирование компонентов композита происходит при одновременном получении дисперсного материала, который может является шихтой для последующего изготовления готовых объемных изделий (например, путем спекания).

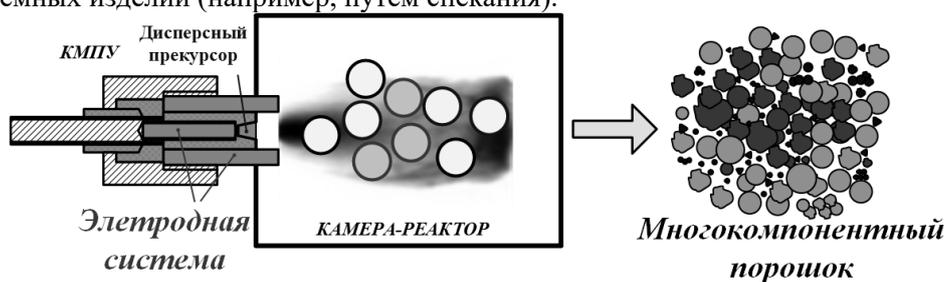


Рисунок 1 – Принципиальная схема плазмодинамического синтеза дисперсных многокомпонентных и композиционных материалов

Библиографический список

1. Akrami S., Edalati P., Fuji M., Edalati K. // *Materials Science and Engineering: R: Reports* **2021**. V. 146. P. 100644
2. Kareem S.A., Anaele J.U., Aikulola E.O. Adewole T.A., Bodunrin M.O., Alaneme K.K. // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* **2024**. V. 5. P. 100057.

Создание облаков левитирующих частиц, имитирующих космическую или лунную пыль в лабораторных условиях

Creating clouds of levitating particles that simulate cosmic or lunar dust in the laboratory

Скворцова Н.Н.¹, Степахин В.Д.¹, Борзосекоев В.Д.¹, Малахов Д.В.¹, Соколов А.С.¹,
Ахмадуллина Н.С.^{1,3}, Резаева А.Д.¹, Сорокин А.А.³, Образцова Е.А.^{1,5},
Шишилов О.Н.⁴, Гусейн-заде Н.Г.¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
E-mail: mikudori@mail.ru

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия

³ Институт прикладной физики РАН, г. Н. Новгород, Россия

⁴ Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, Россия

⁵ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

Основным источником плазменно-пылевых облаков, левитирующих над поверхностью Луны является реголит, покрывающий ее поверхность слоем толщиной от нескольких сантиметров, до нескольких метров в районах лунных морей [1]. Похожие плазменно-пылевые ансамбли заряженных микрочастиц возникают при взаимодействии импульсного излучения гиротрона (75ГГц, 2-8 мс, 150-400кВт) с порошковыми смесями диэлектриков и металлов со свободной границей [2].

Для имитации лунной пыли использовались смеси порошков, повторяющие разные пробы настоящего лунного реголита материков и морей. Часть смесей повторяла химический состав лунного реголита (смесь порошков оксидов), а часть, используя земные минералы, детально повторяла минералогический состав. Для имитации космической пыли было использовано вещество метеорита Царев (обыкновенный хондрит L5) из-за близости состава астероидов и метеороидов Солнечной системы и космической пыли. Используемые в экспериментах порошки ильменитового концентрата — являлись удобным «первым приближением», поскольку ильменит содержится как в лунном реголите, так и метеороидах. При энергии микроволнового импульса гиротрона 1-3 кДж и длительности импульса 2-8 мс регистрируется процесс выброса заряженных частиц с поверхности смеси порошков и образование плазменно-пылевого облака в условиях, протекающих в объеме реактора плазмохимических процессов.

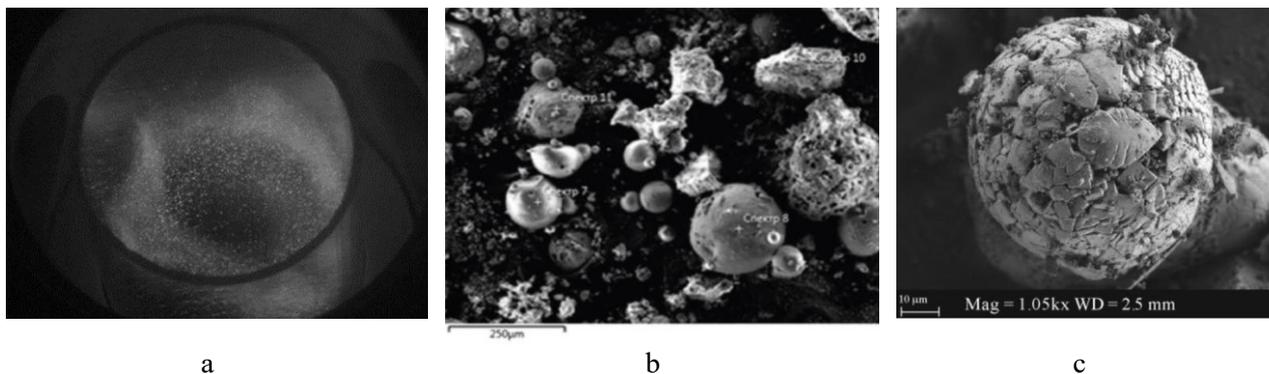


Рис. 1. а) Левитирующие частицы ильменита над порошком через 22 мс после выключения гиротрона (виден край кварцевого цилиндра, помещенный в плазмохимический реактор); б) Осажденные частицы метеорита Царев; в) Оплавленная частица сферической формы, созданная из смеси оксидов.

Осажденные на стенках кварцевого цилиндра частицы и основная масса образца на дне цилиндра после эксперимента исследовались с помощью растровой электронной микроскопии. Было обнаружено, что образуются частицы, размерами больше, чем в исходной смеси, а форма частиц становится сферической. При этом существенного изменения элементного состава не происходит.

Библиографический список

1. Rennilson J.J., Criswell D.R. // Moon. **1974**. No 10, P. 121.
2. Скворцова Н.Н., Малахов Д.В., Степахин В.Д., и др. // Письма в ЖЭТФ. **2017**. Т.106. С. 240.

Получение тонких пленок IGZO плазмохимическим осаждением из газовой фазы

PECVD preparation of IGZO thin films

Мочалов Л.А., Телегин С.В., Слаповская Е.А., Сафронова С.С.

Mochalov L.A., Telegin S.V., Slapovskaya E.A., Safronova S.S.

Университет Лобачевского

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, E-mail: mochalov@chem.unn.ru

For the first time complex oxide inorganic system In-Ga-Zn-O (IGZO) was synthesized by PECVD approach. High-pure elements – In, Ga, and zinc were the sources of macrocomponents and the argon-oxygen mixture was chosen as the plasma-feed gas. Both - the plasma chemical process and the final IGZO thin films were studied by different analytical techniques.

Оксид индия-галлия-цинка (IGZO) – один из наиболее перспективных многоэлементных полупроводниковых материалов, который может стать заменой привычному аморфному кремнию. Он обладает прозрачностью в диапазоне видимого света, высокой термической и химической стабильностью и могут применяться для изготовления полевых транзисторов, диодов Шоттки, рабочих электродов для солнечных элементов, газовых сенсоров, фото- и рентгеновских детекторов, запоминающих устройств, биосенсоров, элементов гибкой электроники и дисплеев [1, 2]. Основной метод получения – магнетронное ВЧ распыление мишеней состава In:Ga:Zn:O 1:1:1:4 [3].

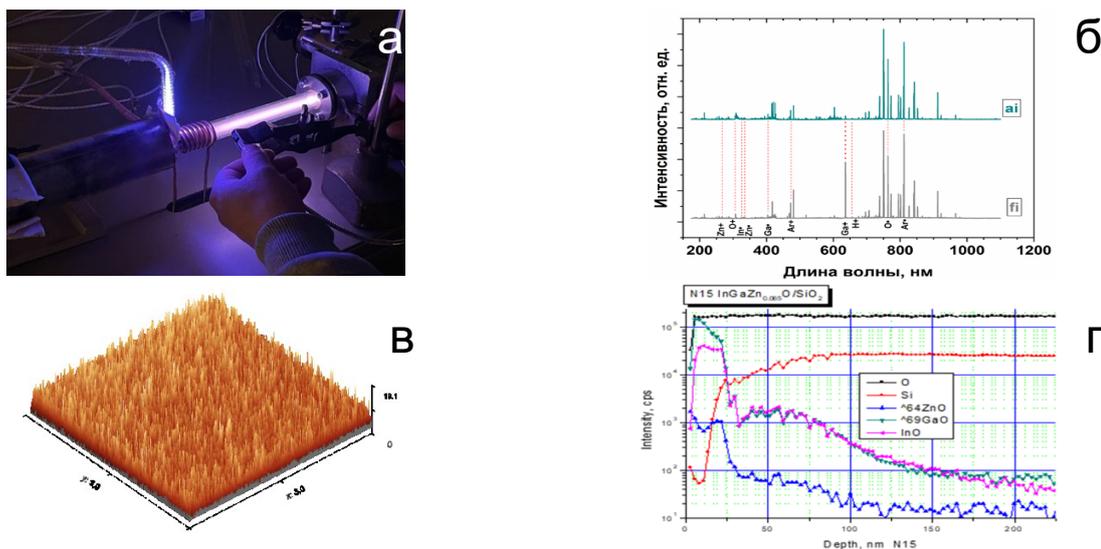


Рис. 1 – Снимок процесса (а), оптический эмиссионный спектр (б), результаты АСМ (в) и ВИМС (г)

В данной работе, впервые, система IGZO была синтезирована методом PECVD (рис. 1 (а)). Источниками макрокомпонентов были высокочистые элементы – In, Ga и цинк, а в качестве плазмообразующего газа была выбрана Ar-O₂ смесь. И плазмохимический процесс был исследован методом оптической эмиссионной диагностики (рис. 1(б)), конечные тонкие пленки IGZO были изучены различными методами аналитическими методами – АСМ (рис. 1(в)), СЭМ, ВИМС (рис.1 (г)) и РФА высокого разрешения.

Исследования выполнены при поддержке РНФ, грант № 22-13-00053.

Библиографический список

1. Murat A., Adler A.U., Mason T.O., Medvedeva J.E. // J. Am Chem Soc. **2013**. V. 135(15). P. 5685-92
2. Lee C.H., Kim T. H., Lee S.M., Bae J.W., Kim K.N., Yeom G.Y. // Sc. of Adv. Mat. **2017**. V. 7(9). P. 118-1192
3. Sanal K.C., Majeesh M., Jayaraj M.K. // Proc. SPIE 8818, Nanostructured Thin Films VI, **2013** P. 881814

Получение тонких пленок CdS и CdTe методом PECVD

Deposition of CdS and CdTe thin films by PECVD

Сафронова С.С., Телегин С.В., Мочалов Л.А., Слаповская Е.А.
Safronova S.S., Telegin S.V., Mochalov L.A., Slapovskaya E.A.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского*

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, E-mail: Ssafnn@mail.ru

Cadmium telluride (CdTe) is a suitable material for use as an absorber for solar cells, and cadmium sulfide (CdS) is a suitable n-type component for CdTe solar cells. The purpose of this work was to obtain thin films of cadmium sulfide and telluride using plasma chemical vapor deposition (PECVD) and study their properties. Thin films were deposited on high-purity glass substrates. Elementary Cd, S, and Te of high purity were used as starting reagents.

Теллурид кадмия (CdTe) - подходящий материал для использования его в качестве поглотителя для солнечных элементов, так как он имеет запрещенную зону 1,45 эВ, что оптимально для преобразования фотоэлектрической энергии [1]. Сульфид кадмия (CdS) является подходящим компонентом n-типа для солнечных элементов на основе CdTe благодаря его оптической запрещенной зоне 2,4 эВ и высокой прозрачности (>80%) [2].

Целью данной работы было получить тонкие пленки сульфида и теллурида кадмия методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) и изучить их морфологические, структурные и оптические свойства. В случае данного метода скорость роста можно варьировать, регулируя температуру прекурсоров, скорость потока газа-носителя и мощность плазменного разряда, что полезно для получения тонких или толстых слоев. Данный метод предполагает эффективное использование веществ, получение чистых материалов с широким диапазоном составов (фазы, стехиометрии), а также использование более низкой температуры процесса по сравнению с традиционными CVD-процессами.

Осаждение тонких плёнок происходило на подложки из высокочистого стекла. В качестве исходных реагентов использовались высокочистые элементарные Cd, S, Te. В качестве плазмообразующего газа и газа носителя использовался высокочистый Ar, инициатором химических превращений выступала низкотемпературная неравновесная плазма ВЧ-разряда (40,68 МГц). Кадмий испаряли при 225, серу при 90, теллур при 340 градусах. Процесс осаждения проводили при давлении 0,1 Торр в течении 30 минут при разной мощности плазмы: 25, 50, 75 Вт.

Опираясь на экспериментальные данные, можно сделать вывод, что при увеличении мощности плазменного разряда толщина получаемых пленок возрастает. Это приводит к ухудшению оптической пропускной способности пленок.

Таблица. 1. Зависимость свойств полученных пленок от мощности плазмы.

Мощность плазмы, Вт	Материал пленки	Толщина пленки, нм	Пропускание при 500 нм, %
25	CdS	132±8	57,7
50		340±17	51,2
75		361±18	36,4

Библиографический список

1. Matteo Bertonecello, Fabio Casulli, Marco Barbato, Elisa Artegiani, Alessandro Romeo, Nicola Trivellin, Enrico Zanoni, Matteo Meneghini, Gaudenzio Meneghesso. // Influence of CdTe solar cell properties on stability at high temperatures. *Microelectronics Reliability*. 2020. V. 114. 113847.
2. Maticiuc N., Spalatu N., Mikli V., Hiie J. //Impact of CdS annealing atmosphere on the performance of CdS–CdTe solar cell. *Applied Surface Science*. 2015. V. 350. P. 14-18.

Плазменно-жидкостный синтез как новый метод получения MXenes

Plasma-liquid synthesis as a new method for the production of MXenes

Сироткин Н.А., Ларионов А.И.*, Хлюстова А.В., Агафонов А.В.

*Sirotkin N.A., Larionov A.I. *, Khlyustova A.V., Agafonov A.V.*

Институт химии растворов РАН,

153045, г. Иваново, ул. Академическая, 1, E-mail: alexsad8@yandex.ru.

**Ивановский государственный химико-технологический университет*

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7

In this work, the successful synthesis of nanostructures based on MXenes by initiating a pulse discharge between titanium wires immersed in carbon tetrachloride is presented. The results suggest the potential of this plasma-liquid method for the synthesis of high-purity MXenes without impurities commonly found in conventionally prepared samples.

MXenes представляют собой класс двумерных неорганических соединений, которые состоят из атомарно тонких слоев карбидов, нитридов или карбонитридов переходных металлов и имеют различные гидрофильные группы [1]. Синтезированные MXenes имеют морфологию «гармошки». MXenes могут иметь на своей поверхности функциональные группы, поэтому общая формула MXenes: $M_{n+1}X_nT_x$, где T — функциональная группа (например, O, F, OH, Cl), M — переходный металл (Ti, Mo, Cr и др.), X — атом углерода или азот. Благодаря своей структуре MXenes обладают уникальными электрическими, магнитными, оптическими и биологическими свойствами. Производство MXenes включает в себя многостадийные, чрезвычайно опасные, экологически вредные высокотемпературные процессы химического травления прекурсоров, требующие дальнейшей утилизации побочных продуктов реакции. Сами прекурсоры имеют достаточно высокую стоимость.

В данной работе впервые исследованы свойства импульсного разряда между титановыми электродами, горящего в четыреххлористом углероде. Установлено, что пиковый ток разряда может достигать 1.5 А. Определены электронная температура и концентрация электронов. Используя импульсный разряд, инициируемый между титановыми электродами в CCl_4 , мы успешно синтезировали наноструктуры на основе MXenes состава TiC_nCl_x . Исследование структуры полученных материалов проводилась с использованием различных методов, включая сканирующую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ, ЭДС, Рамановскую и FTIR-спектроскопию. Результаты подтвердили успешное образование MXenes с анионом Cl^- , занимающим межслоевое пространство. Таким образом, впервые методом плазмохимического синтеза были получены структуры типа MXenes. Это относительно простой метод, не требующий использования опасных исходных реагентов, утилизации побочных продуктов и высокотемпературных процессов. При этом полученные MXenes не содержат оксидных примесей. Можно предположить, что, изменив среду горения разряда с четыреххлористого углерода на ацетонитрил, можно получить MXenes на основе нитридов металлов. Основное преимущество этого метода состоит в том, что состав получаемых структур можно легко варьировать; путем замены материала электрода другим металлом, например молибдена можно будет синтезировать двойные MXenes типа Mo_2TiC_2 . Использование двойного импульсного разряда, уже продемонстрированного при синтезе оксидных структур в воде, позволит точно контролировать состав получаемых MXenes и тем самым достигать лучших целевых свойств.

Результаты свидетельствуют о потенциале этого плазменно-жидкостного метода для синтеза MXenes высокой чистоты без примесей, обычно встречающихся в традиционно приготовленных образцах.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 24-23-00146.

Библиографический список

1. Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu J., Heon M.// *Advanced Materials*, **2011**. V. 23. P. 4248.

Микроволновые имитационные эксперименты по воздействию частиц лунного реголита LMS-1D на солнечные батареи

Microwave simulation experiments on the effects of LMS-1D lunar regolith particles on solar panels

Соколов А.С.¹, Степахин В.Д.¹, Скворцова Н.Н.¹, Борзосек В.Д.¹, Гаянова Т.Э.¹,
Козак А.К.¹, Вагапова Н.Т.², Бадурин И.В.², Логинова Е.С.², Образцова Е.А.^{1,3},
Колик Л.В.¹, Конькова А.С.¹, Кончечков Е.М.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия
E-mail: dmc63@yandex.ru

² АО «НПП «Квант», г. Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

В докладе описаны имитационные эксперименты по взаимодействию лунной пыли (левитирующего облака заряженных частиц реголита LMS-1D) и низкотемпературной плазмы с поверхностью солнечных панелей на основе кремния и арсенида галлия (см. рис. 1). Имитационные эксперименты основаны на сходстве процессов, возникающих при воздействии излучения мощного импульсного гиротрона («Борец 75/08», НПП «Гиком», г. Нижний Новгород, Россия) на порошковые смеси [1], с процессами (разлет реголита и создание плазмы), которые происходят на Луне во время ее бомбардировки микрометеоритами.

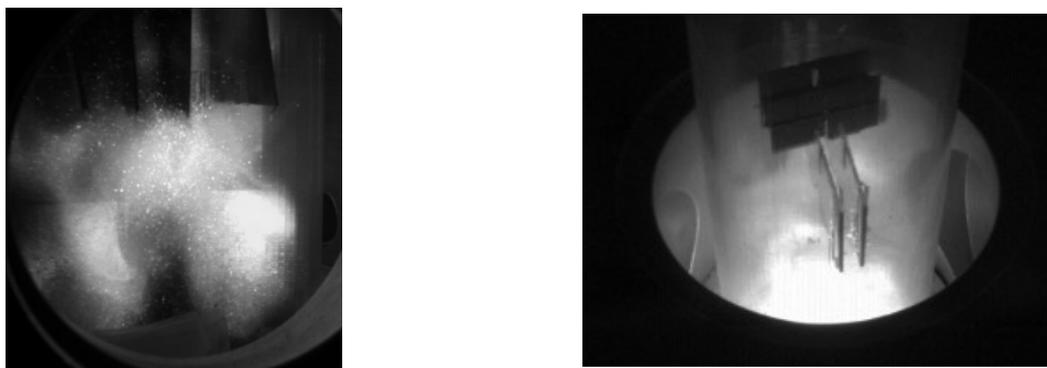


Рис.1 фотографии вертикально установленных солнечных панелей и воздействующего на них левитирующего облака «лунного» реголита

В таблице приведены значения КПД солнечных панелей в процентах до и после воздействия на них «лунного» реголита.

Номер солнечной панели на основе кремния	КПД (%) до воздействия	КПД (%) после воздействия	КПД (%) Отн. разница
3107	10,9	8,22	24,58
3008	13,29	11,02	17,08
3109	13,26	12,04	9,2
Среднее	12,4725	10,8375	13,45
Номер солнечной панели на основе арсенида галлия	КПД (%) до воздействия	КПД (%) после воздействия	КПД (%) Отн. разница
2609	29,3	27,02	7,78
322	28,51	21,63	24,13
315	28,62	26,58	7,12
Среднее	28,81	25,08	13,01

Данная работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-01078.

Библиографический список

1. А. С. Соколов, Н. С. Ахмадуллина, В. Д. Борзосек [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. **2022**. Т. 65, № 11. С. 927.

Микроволновые эксперименты по осаждению частиц лунного реголита на нержавеющую сталь, тантал, молибден

Степахин В.Д.¹, Скворцова Н.Н.¹, Борзосек В.Д.¹, Малахов Д.В.¹, Соколов А.С.¹,
Ахмадуллина Н.С.², Колик Л.В.¹, Кончиков Е.М.¹, Петров А.Е.¹, Сорокин А.А.³,
Шишилов О.Н.⁴, Гусейн-заде Н.Г.¹

¹ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия*
E-mail: scooter11@mail.ru

² *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия*

³ *Институт прикладной физики РАН, г. Н. Новгород, Россия*

⁴ *Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, Россия*

В микроволновых экспериментах на плазмохимическом стенде ИОФ РАН было обнаружено возникновение плазменно-пылевых ансамблей заряженных частиц схожих с теми, которые происходят на Луне во время ее бомбардировки микрометеоритами [1]. Химический состав и гранулометрический состав смеси, взаимодействующей с микроволновым излучением гиротрона (75ГГц) соответствует составу реголита на поверхности Луны.

В данном докладе представлены результаты экспериментов по осаждению заряженных частиц, которые имитируют плазменно-пылевые ансамбли после ударов микрометеоритов на Луне, на конструкционные материалы космических аппаратов, а именно на металлические пластины из нержавеющей стали, тантала, молибдена. Энергия СВЧ-излучения гиротрона, необходимая для развития плазмохимических процессов в реакторе и создания левитирующих ансамблей частиц составляла 4 кДж (длительность импульса гиротрона 10 мс, мощность СВЧ-излучения 400 кВт). Инициация процессов в реакторе над порошком реголита происходила на 4-6 мс после переднего фронта СВЧ-импульса гиротрона. Длительность свечения поверхности порошка и плазменно-газовой смеси над порошком достигала 40-80 мс. Разлет частиц наблюдался видеокамерой в течение 300-500 мс.

Над образцом лабораторного реголита в плазмохимическом реакторе устанавливались по две пластинки из нержавеющей стали, тантала или молибдена: Пластины извлекались из реактора после 10 повторов с образованием плазменно-пылевых ансамблей, инициированных импульсами гиротрона с интервалом между импульсами 20 с. Из рисунка 1 видно, что на поверхности металлических пластин осаждаются частицы реголита в форме сфероидов разного размера.

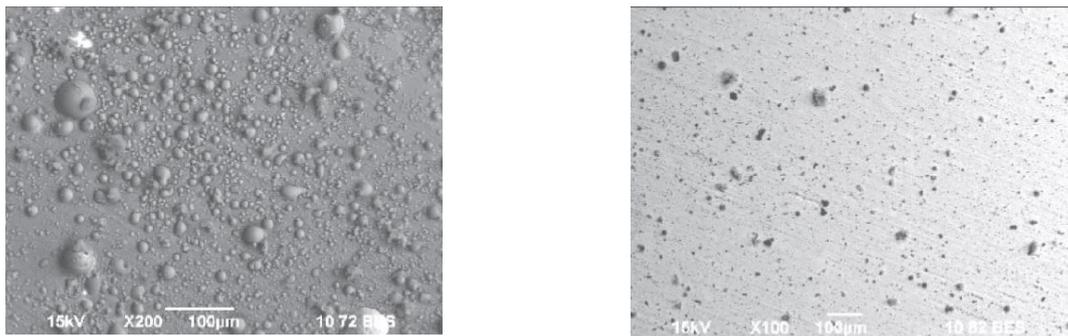


Рис. 1. Осаждение частиц реголита на пластины нержавеющей стали: (1) необработанный образец; (2) обработанный пьезоразрядом образец

Для проверки способов защиты от напыления на пластины, была проведена предварительная обработка поверхности части пластин прямым пьезоразрядом. Оказалось, что количество осажденных частиц заметно меньше для пластин нержавеющей стали с предварительной обработкой разрядом.

Библиографический список

1. Skvortsova N. N., Stepakhin V. D., Borzosekov V. D., et al. // Plasma Physics Reports. **2023**. Vol. 49, No. 1, P. 120.

Создание фото- и электрохромных материалов на основе TiO_2 с использованием подводного диафрагменного разряда

Creation of photo- and electrochromic materials based on TiO_2 using underwater diaphragm discharge

Хлюстова А.В., Евдокимова А.В., Сироткин Н.А., Шibaева В.Д.

Khlyustova A.V., Evdokimova A.V., Sirotkin N.A., Shibaeva V.D.

Институт химии растворов РАН,

153045, г. Иваново, ул. Академическая, 4, E-mail: kav@isc-ras.ru

The process of doping titanium dioxide using an underwater diaphragm discharge with the aim of creating composite materials with photo- and electrochromic properties is considered. It has been established that doping increases the intensity of photocoloring and improves the electrochromic characteristics of the composite.

Оксиды переходных металлов, такие как WO_3 , MoO_3 , V_2O_5 , TiO_2 , обладают фото- и электрохромными свойствами. Создание композитов на основе полимеров и неорганических наполнителей, обладающих фото- и электрохромными характеристиками имеет ряд преимуществ, среди которых низкая стоимость и простота получения. Метод получения неорганических наполнителей играет важную роль в свойствах получаемого продукта (фазовый состав, состояние поверхности и т.д.). Известно, что в случае диоксида титана для получения конечного продукта с заданными свойствами, например, улучшение фотокаталитической активности в видимом диапазоне света, проводят процесс допирования.

TiO_2 получали с использованием золь-гель метода. Далее раствор золя подвергался плазменной обработке с использованием подводного диафрагменного разряда переменного тока. Материал распыленных электродов, в процессе горения разряда, использовался в качестве допанта. Золи без и после плазменной обработки смешивались с растворами полимеров. Пленки высушивались при 40°C до постоянной массы. Фотохромизм изучался путем облучения композитов УФ лампой ($\lambda=366$ нм) с последующей регистрацией электронных спектров поглощения в диапазоне 400-1100 нм. Электрохромные свойства изучались с использованием электрохромной ячейки.

Действие подводного диафрагменного разряда на золь TiO_2 улучшает фотохромные характеристики полимерных композитов, усиливая интенсивность фотоокрашивания (рис. а) и увеличивая скорость обесцвечивания. Плазменная обработка также влияет на вид циклических вольтамперограмм, приводя к росту плотности тока (рис. б). Это характерно для композитов, использующих проводящие полимеры [1].

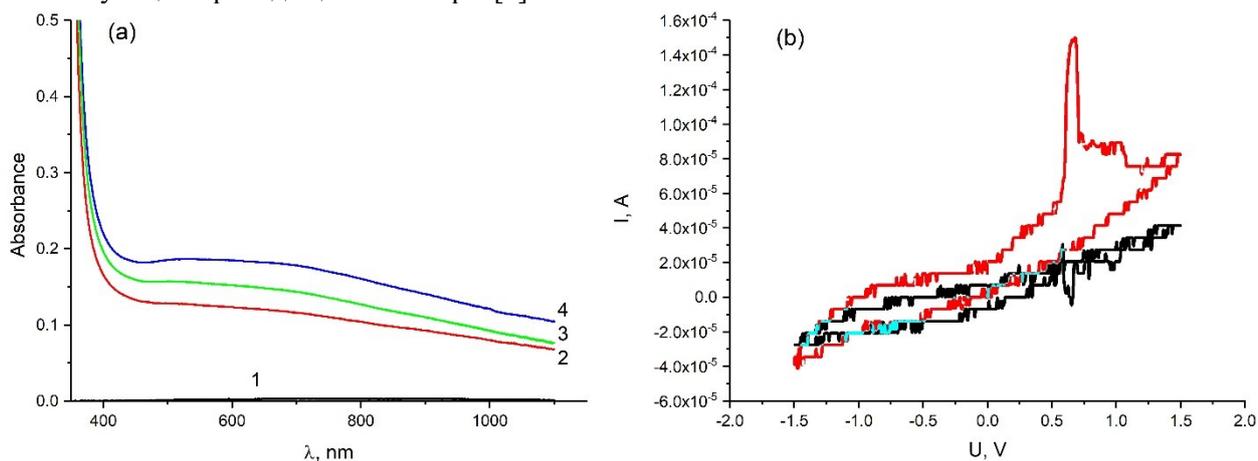


Рисунок. (а) ЭСП облученных пленок микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) (1), МКЦ+ TiO_2 (2), МКЦ+W/ TiO_2 (3), МКЦ+Mo/ TiO_2 (4); (б) Циклические вольтамперограммы композитов на основе МКЦ+ TiO_2 (черный) и МКЦ+W/ TiO_2 (красный)

Библиографический список

1. Almarri A. H. // *Ionics* **2022**. V. 28. P. 4435.

Плазмодинамический синтез полифункциональных катализаторов в среде углекислого газа для СВЧ-пиролиза органического сырья

Plasma dynamic synthesis of polyfunctional catalysts in carbon dioxide medium for microwave pyrolysis of organic raw materials

Шаненков И.И., Табакаев Р.Б.*

Shanenkov I.I., Tabakaev R.B.

Тюменский государственный университет

625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, E-mail: i.i.shanenkov@utmn.ru

** E-mail: r.b.tabakaev@utmn.ru*

The features of obtaining catalytically active materials for microwave pyrolysis in pulsed arc discharge plasma by plasma dynamic method were investigated. The key advantage of the proposed approach is the production of dispersed oxide materials in CO₂ medium by sputtering electroerosive iron-containing plasma. The possibility of applying the synthesized fine powders as polyfunctional catalysts for microwave pyrolysis of organic raw materials was experimentally studied.

Интенсивное накопление различного вида органических отходов, образующихся в различных отраслях человеческой деятельности, требует разработки эффективных способов их утилизации, чтобы минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и полезно использовать данные ресурсы во вторичных процессах. Одним из таких активно развивающихся способов является СВЧ-пиролиз, несомненными преимуществами которого перед традиционными видами термической обработки являются быстроедействие, низкий выход углекислого газа и большое содержание водорода в составе пиролизного газа, что делает его потенциально применимым для использования в генераторных установках [1].

В основе СВЧ-пиролиза лежит взаимодействие микроволнового излучения с компонентами органического сырья, что приводит к их интенсивному разогреву во всем объеме образца и, соответственно, влияет на ускорение процессов термической деструкции. Тем не менее, некоторые виды органического сырья (опилки, отруби, торф и др.) характеризуются низкими значениями диэлектрической проницаемости в диапазоне СВЧ-частот, что снижает эффективность процесса их термической переработки указанным способом. Повысить общее КПД СВЧ-пиролиза таких видов сырья возможно путем введения дисперсных катализаторов.

В качестве каталитически активных материалов может рассматриваться железо и его высокомагнитные оксидные фазы, например, магнетит Fe₃O₄. Однако методы их синтеза зачастую характеризуются использованием дорогих прекурсоров, многоступенчатостью и высокими энергозатратами, что, в конечном итоге, из-за большого расхода первичных углеводородных энергоресурсов нивелирует преимущество СВЧ-пиролиза, выраженное в снижении выбросов климатически активных горючих газов за счет их возможного дожигания.

В данной работе получения высокоактивных полифункциональных катализаторов на основе железа и его оксидов предлагается реализовать плазмодинамическим методом при распылении высокоскоростной импульсной струи железосодержащей плазмы в среде углекислого газа. Такое высокоэнергетическое воздействие приводит к частичной конверсии CO₂, высвобождению кислорода и последующему окислению распыляемых жидкофазных микрокапель железа. Низкие энергозатраты на реализацию единичного рабочего цикла и частичная утилизация CO₂ позволяют минимизировать негативное воздействие на окружающую среду в процессе получения таких катализаторов СВЧ-пиролиза и повысить общую эффективность рассматриваемого подхода.

Исследование выполнено при поддержке Государственного задания № FEWZ -2024-0013.

Библиографический список

2. Ibraeva K., Astafev A., Dimitryuk I., Tabakaev R., Kalinich I., Shanenkov I. // *Energy Conversion and Management* **2024**. Т. 301. С. 118067.

Оксиды меди, полученные в плазме импульсного высоковольтного разряда и с последующим перемалыванием

Copper oxides obtained in High-voltage pulse discharge plasma with subsequent milling

Курявый В.Г., Зверев Г.А., Васильева М.С., Опра Д.П., Ткаченко И.А., Харченко У.В., Пикалов Д.О.

Kuryavii V. G., Zverev G. A., Vasilieva M. S., Opra D. P., Tkachenko I. A., Kharchenko U. V., Pikalov D. O.
Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия. E-mail: kvg@ich.dvo.ru

The Granulated samples containing ~ 94% Cu₂O and ~ 6 % CuO were obtained by oxidation of copper wire electrodes in HVPD plasma. These samples were milled in an agate mortar followed by a ball mill under argon atmosphere with products of each stage investigated. Photoelectrical, bactericidal, thermoelectrical, catalytic, electrochemical and magnetic properties of samples were investigated. Effect of calcination in air on magnetic properties and composition was studied. In granulated samples thermoelectrical properties were measured. The method has potential in obtaining copper oxides with valuable functional properties.

Разновалентные оксиды меди известны своими фотоэлектрическими, термоэлектрическими, бактерицидными свойствами, могут найти применение в химических источниках тока. Известно, что для материалов, которые получают в плазме, характерно наличие в них различных активных центров, которые могут значительно повлиять на проявляемые образцами свойства. В данной работе, путем окисления медных проволочных электродов в плазме импульсного высоковольтного разряда, получены гранулированные образцы, содержащие ~ 94% Cu₂O и ~ 6 % CuO. Гранулы перемалывались пестиком в агатовой ступке и далее в шаровой мельнице в атмосфере аргона, Полученные образцы исследовались, в двух этих вариантах, различными физическими методами. Изучались фотокаталитические, бактерицидные, каталитические, электрохимические и магнитные свойства.

Данные по фотокаталитической активности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Фотокаталитическая активность образца для водного раствора индигокармина (10 мг/л). Время облучения 120 мин. Объём раствора – 50 мл, масса порошка – 50 мг.

Образец	Степень конверсии в видимой области, %	Степень конверсии в УФ области, %
Cu ₂ O, гранулы растёрты в агатовой ступке	65	64
Cu ₂ O, порошок растёрт в шаровой мельнице	97	100
Cu ₂ O коммерческий	50	34

Фотокаталитическая активность полученных в плазме образцов выше, чем у коммерческих. При этом, активность полученных в плазме образцов практически одинакова в видимом и в УФ диапазоне. Для коммерческого образца активность в УФ диапазоне в 1.5 меньше, чем в видимом.

На основе гранулы, диаметр которой 1 мм, был собран термоэлемент, при его нагреве газовой горелкой достигнута э.д.с. 100 mV при токе в цепи 10 mA, т.е. мощность 1 мВт.

Биоцидная активность образца Cu₂O в 1.2-3.5 раза превосходит активность коммерческого образца в отношении *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus* и *B.subtilis*. По отношению к грибам *C. albicans* коммерческий образец был более активен, чем экспериментальный образец. В отношении консорциума морских бактерий биоцидная активность обоих образцов была одинакова.

Путем прокаливания образцов на воздухе можно получить композиты с любым содержанием Cu₂O / CuO.

В полученных образцах, существует ферромагнитная фаза, магнитоэлектрическая фаза, суперпарамагнитная или спин-стекольная фаза. Для образца, прокаленного при 673 К, обнаружен дополнительный пик на зависимости M(T), который может отвечать магнитному фазовому переходу.

Примененный метод перспективен для получения оксидов меди с улучшенными полезными функциональными свойствами

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № 0205-2022-0003.

Математическое моделирование ВЧ-плазменной модификации титано-гафниевых нитридных покрытий

Simulation of RF plasma modification titanium-hafnium nitride coatings

Гребенщикова М.М., Желтухин В.С.
Grebenshchikova M.M., Zheltukhin V.S.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, E-mail: vzheltukhin@gmail.com*

A molecular dynamics model of a low-energy ion bombardment of a titanium-hafnium nitride coating is developed. The formation of TiHfN₂ nanoparticles on the coating surface is shown.

Для снижения числа осложнений при установке имплантатов суставов в травматологии перспективно применение титано-гафниевых нитридных покрытий металлических конструкций [1]. Покрытие наносится методом конденсации из металлической плазмы электродугового разряда в среде азота. Эксперименты показали, что бактерицидность покрытия проявляется после дополнительной обработки его в высокочастотном емкостном (ВЧЕ) разряде при пониженном давлении (13.3–133 Па).

Для определения механизма воздействия ВЧЕ разряда разработана молекулярно-динамическая модель взаимодействия низкоэнергетичного ионного потока с титано-гафниевым нитридным покрытием. Результаты расчетов показали образование наночастиц TiHfN₂ на поверхности покрытия, которые оказывают токсическое воздействие на микрофлору.

Библиографический список

1. Гребенщикова М.М., Миронов М.М., Стародумова Е.В. // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 16, № 17. С. 49.

Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела

A mathematical model of a jet RF discharge of intermediate pressure taking into account a layer of positive charge at the surface of a solid

Шемахин А.Ю.
Shemakhin A.Yu.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: ashemakhin@yandex.ru*

A unified mathematical model, numerical method and program has been developed to study the parameters of a intermediate-pressure RF plasma jet.

Высокочастотная (ВЧ) плазма пониженного давления (13.3-133 Па) применяется для модификации материалов различной физической природы: диэлектриков, проводящих, полупроводниковых [1]. Образованная данным видом разряда плазма, характеризуется следующими параметрами: концентрация электронов 10^{15} – 10^{18} м⁻³, степень ионизации 10^{-6} - 10^{-3} , электронная температура 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке 3000-4000 К, в струе 320-1000 К.

Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана единая математическая модель, которая включает в себя уравнения Больцмана для несущего газа и ФРЭЭ, сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-электромагнитного поля. Разработан численный метод и программа для вычисления основных характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления.

Библиографический список

- Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. *Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения.* – , 2000. Казань: Изд-во Казан. Ун-та

Плазмохимические аспекты при формировании нанокпозиционных покрытий нитридов гафния и титана в ионно-плазменном процессе

Plasma chemical aspects in the formation of nanocomposite coatings of hafnium and titanium nitrides in an ion-plasma process

Гребенщикова М.М., Желтухин В.С., Миронов М.М.

Grebenshchikova M.M., Zheltukhin V.S., Mironov M.M.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань, ул.К.Маркса, 68*

E-mail: grebenshchikova.marina@yandex.ru

The main features of the plasma-chemical process of forming coatings with a nanostructure based on titanium and hafnium nitrides obtained using the ion-plasma method are presented.

Особенностью конденсации покрытий из нитрида гафния, имеющего высокую температуру испарения в 5400 °С, является низкая эффективность процессов ионного травления подложки и покрытия, связанная с большой молекулярной массой гафния в 178 у.е. и низкой кинетической энергией ионов.

Конденсация покрытий из нитридов гафния эффективно происходит совместно с конденсацией нитрида титана в одном процессе, когда для ионного травления подложки используют дуговой испаритель с титановым катодом, а для формирования покрытия используют ионы титана и ионы гафния из испарителя с гафниевым катодом. При перемещении подложки между испарителями в среде азота формируется многослойное комбинированное титаногафниевое нитридное покрытие. Свойства многослойного нанокпозиционированного материала с микротвердостью более 40 ГПа превосходят свойства однослойных покрытий из нитридов титана с микротвердостью до 25 ГПа и нитридов гафния с микротвердостью до 18 ГПа по устойчивости к химическим окислителям, стойкости к агрессивным средам живого организма при продолжительном взаимодействии.

Технология нанесения покрытия [1] позволяет получать многослойные наноструктурированные покрытия с нанокпозиционной фазой нитрида гафния на поверхности, что придает нитридному титаногафниевому покрытию активные микробиологические свойства. Покрытия угнетают рост болезнетворной микрофлоры, например, *St. aureus*, *E.coli*, и другой микрофлоры и не обнаруживают токсических свойств по отношению к организму «хозяину» [2].

В механизм образования химических связей в покрытии и структуре многослойного покрытия определен вклад открытая термодинамическая система синтеза нитрида гафния. Это связано с большой инерцией ионов тяжелого элемента и заниженной в сравнении с титаном скоростью протекания химической реакции по образованию нитрида, достроения кристаллической наноструктуры до равновесного атомного соотношения 50/50. Плазмохимические реакции в условиях открытой термодинамической системы подпитываются энергией электрического поля отрицательного потенциала смещения подложки, который повышает энтальпию реагирующей системы. Это приводит к изменению кинетики химических реакций и ускорению завершения таких реакций. Для определения механизма воздействия низкоэнергетического ионного потока в диапазоне энергий 10-100 эВ на титаногафниевое нитридное покрытие разработана молекулярно-динамическая модель на основе уравнений классической молекулярной механики с потенциалом Леннарда-Джонса (LJ) для бомбардирующего иона и многочастичного оптимизированного по заряду потенциала (COMB) для системы TiN+HfN.

Библиографический список

1. Патент № 2801170 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/14, С23С 14/24, А61L 27/28. Бактерицидное покрытие : № 2023110144 : заявл. 20.04.2023 : опубл. 02.08.2023 / М. М. Гребенщикова, М. М. Миронов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет".
2. Grebenshchikova M. M. Synthesis of Multilayer Nanostructures Hf-Ti-N from the Plasma Phase / M. M. Grebenshchikova, M. M. Mironov // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86, No. 10. – P. 2339-2343. – DOI 10.1134/S1063778823100198.

Электролитно-плазменная обработка со струйным течением электролита

Electrolyte-plasma treatment with a jet flow of electrolyte

Каюмов Р.Р., Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш.*

Kayumov R.R., Gaisin A.F., Abdullin I.S.

Казанский национальный исследовательский технический университет

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10: rushan_250189033@mail.ru

**ООО "Плазма-ВСТ"*

420081, г. Казань, ул. Курская, д. 27, офис 1000

This work describes experimental studies of an electrical discharge between liquid electrodes at atmospheric pressure, using an experimental setup at constant current.

Исследование электрических разрядов с электролитическими электродами представляет значительный интерес в современной науке и технологии. Этот тип разряда характеризуется уникальными свойствами и потенциалом. Важной частью изучения таких разрядов является анализ их формирования, свойств и применений. Электролитические электроды, как один из видов электродов, могут обладать особыми химическими и физическими свойствами, что делает их привлекательными для использования. Исследования показывают, что электролитические электроды могут способствовать стабильности разряда, увеличению эффективности процессов и улучшению характеристик плазмы [1].

Применение электролитно-плазменной обработки находит свое применение в различных областях, включая плазменную обработку материалов, синтез наноматериалов и другие. Этот вид разрядов открывает новые возможности для управления составом и структурой плазмы, что имеет важное значение для оптимизации процессов в различных областях науки и технологии [2].

Данный вид разряда с жидкими электродами позволяет обрабатывать в водных растворах солей изделия из различных металлов и сплавов. Обработка поверхности электрическим разрядом в жидкости основана на действии электрических разрядов, которые происходят на границе раздела струя и электролит. Обрабатываемое изделие погружается в электролит и на него воздействует струйный катод, а к рабочей ванночке подается отрицательный потенциал, который является анодом. Обработка металла происходит в области напряжения $U=0.2-1.5$ кВ, ток разряда $I=0.01-1.8$ А, расход электролита $G=0.5-6$ г/с, диаметр струи 1-3мм, длина струи варьируется $l=1-60$ мм для растворов $NaCl$ в технической воде.

На фотографии 1а представлена обработка медной пластины марки М1 электрическим разрядом между струйным катодом и электролитическим анодом при концентрации $NaCl-25\%$, $G=1.5$ мл/с, $l=10$ мм, $d=1$ мм. фотографии б и в медная пластина соответственно до обработки и после обработки электролитно-плазменным методом.

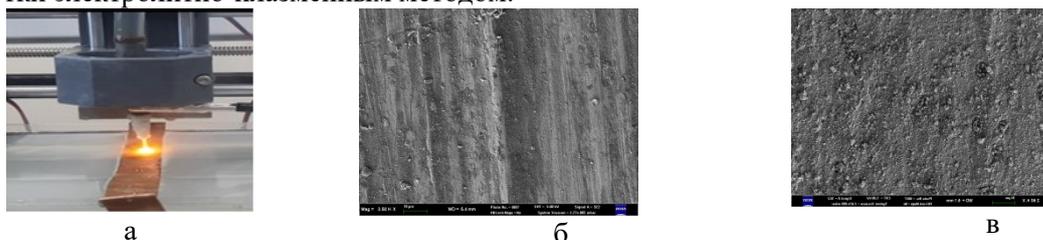


Рис. 1. Обработка медного изделия марки М1 электрическим разрядом со струйным электролитическим катодом и жидким электролитическим анодом, а- процесс обработки, б-медная пластина до обработки, в- медная пластина после обработки.

На основании полученных результатов можно заключить следующее. Происходит сглаживание неровностей, снижение шероховатости поверхности образца.

Библиографический список

1. Электрофизические и тепловые процессы в условиях горения разряда с жидким (неметаллическим) катодом / А. Ф. Гайсин, Ф. М. Гайсин, Р. Ш. Басыров [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. – 2023. – Т. 61, № 4. – С. 484-491.
2. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D печати / А. Ф. Гайсин, Р. Р. Каюмов, А. И. Купутдинова, Р. Р. Марданов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2023. – № 1. – С. 37-44.

Синтез композитных нанопорошков на основе вольфрама в термической плазме электродугового разряда и их перспективное использование для технологий аддитивного производства

Synthesis of tungsten-based composite nanopowders in DC thermal plasma and their promising use for additive manufacturing technologies

Фадеев А.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Дорوفеев А.А.

Fadeev A.A., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Sinayskiy M.A., Dorofeev A.A.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской Академии Наук
119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49, E-mail: fadeev@imet.ac.ru*

The results of a study of the process of plasma-chemical synthesis of W-Ni-Fe and W-Cu composite nanopowders are presented. The possibility of obtaining micro powders with spherical particles of these systems as a result of plasma treatment of nanopowder microgranules has been demonstrated. The resulting powders can be used in additive manufacturing technologies.

Известно, что переход к наноразмерной или ультрамелкозернистой структуре в сплавах на основе вольфрама обуславливает значительное повышение физико-механических свойств изделий на их основе [1]. Формирование таких структур может быть осуществлено технологиями аддитивного производства, в частности, при использовании в качестве прекурсоров композитных микропорошков со сферической формой частиц с ультрамелкозернистой внутренней структурой. Термическая плазма электродугового разряда является эффективным средством получения не только нанопорошков элементов, их неорганических соединений и композиций, но и микропорошков со сферической формой частиц [2]. В работе представлены результаты исследования процесса плазмохимического синтеза композитных нанопорошков на основе вольфрама состава W–7масс.%Ni–3масс.%Fe и W–20масс.%Cu при восстановлении порошковых смесей: $WO_3+NiO(Ni)+Fe_2O_3(Fe)$; $WO_3+CuO(Cu)$ в потоке водородсодержащей плазмы в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением. Определены конструктивно-технологические параметры процесса плазмохимического синтеза (тип плазмохимического реактора; тип и мощность электродугового плазмотрона, энтальпия плазменного потока, расход исходного сырья), влияющие на свойства конечного продукта (удельная поверхность, выход продукта). По результатам электронной микроскопии конечный продукт состоит из наночастиц преимущественно сферической формы со структурой «ядро-оболочка» с размером в диапазоне от 10 до 300 нм. Показана возможность использования полученных композитных нанопорошков в процессе плазменной сфероидизации нанопорошковых микрогранул, полученных методом распылительной сушки. В результате процесса плазменной сфероидизации нанопорошковых микрогранул были получены плотные, беспористые микрочастицы в диапазоне размеров от 10 до 125 мкм сферической формы с субмикронной внутренней структурой с размером зерна в диапазоне от 0,5 до 2 мкм. Полученный продукт обладает высокими технологическими свойствами (W-Ni-Fe: текучесть $6\div 10$ с/50г, насыпная плотность $8\div 9,4$ г/см³; W-Cu: текучесть $10\div 15$ с/50г, насыпная плотность $4\div 7$ г/см³), что делает его перспективным для использования в технологиях аддитивного производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 22-19-00112.

Библиографический список

1. Magness, L.S. Refractory metals for ordnance application / Proc. of the Fourth Intern. Conf. on Tungsten and Refractory metals and alloys: Processing, Properties and Applications // Eds. Bose A., Dowding R.J. /// Princeton. 1997. P.41-57.
2. Gryaznov, M.; Samokhin, A.; Chuvildeev, V.; Fadeev, A.; Alekseev, N.; Shotin, S.; Dorofeev, A.; Zavertyaev, I. Method of W-Ni-Fe Composite Spherical Powder Production and the Possibility of Its Application in Selective Laser Melting Technology. Metals 2022, 12, 1715.

Магнетронное напыление диоксида титана на ткань из химических волокон: структура покрытия и свойства ткани

Magnetron sputtering of titanium dioxide on a fabric made of chemical fibers: coating structure and fabric properties

Пророкова Н.П.*, Кумеева Т.Ю.*, Горберг Б.Л.

Prorokova N.P., Kumeeva T.Yu., Gorberg B.L.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: gorberg@isuct.ru*

**Институт химии растворов РАН,
153045, г. Иваново, ул. Академическая, 1, E-mail: npp@isc-ras.ru*

Полиэфирные волокнистые материалы с фотоактивными свойствами широко востребованы как в быту (одежда, обивочные и портьерные ткани, столовое белье со свойствами самоочищения), так и в технике (специальные салфетки, фильтры с антимикробными свойствами). Такие материалы под действием солнечного света обеспечивают деструкцию адсорбированных органических загрязнений и инактивацию контактирующих с ними бактерий. Простым методом придания волокнам и тканям фотохимической активности является формирование на их поверхности устойчивых покрытий на основе фотокатализаторов. Действие фотокатализаторов основано на образовании активных форм кислорода, которые обеспечивают разложение широкого спектра органических соединений до углекислого газа и воды. В качестве фотокатализаторов, пригодных для формирования покрытий на волокнистом материале, большинство исследователей рассматривают наноразмерные кристаллические диоксид титана (TiO_2) и оксид цинка (ZnO), причем TiO_2 изучен наиболее полно.

Перспективным в плане нанесения металлсодержащих покрытий считается способ реактивного магнетронного распыления, представляющий собой один из методов плазмохимической обработки материалов. Магнетронное распыление является экологически чистым процессом и обеспечивает формирование покрытия с высокой равномерностью. Таким способом можно сформировать покрытие на основе TiO_2 . В настоящей работе покрытия на основе TiO_2 формировали с использованием лабораторной магнетронной установки планарного типа.

В работе проводилась оценка комплекса свойств ткани из полиэтилентерефталатных и углеродных волокон с покрытиями на основе чистого диоксида титана, а также диоксида титана и серебра, полученных методом магнетронного распыления. Сопоставлены характеристики покрытий, сформированных магнетронным распылением и ранее разработанным способом - осаждением диоксида титана, полученного золь-гель синтезом [1-3]. С помощью колористического метода проведена оценка фотокаталитических свойств полиэфирной и углеродной тканей с покрытиями, изучена устойчивость покрытий к истирающим воздействиям. С использованием счетного метода оценены антимикробные свойства ткани с покрытиями. Изучена структура покрытий различной толщины, сформированных методом магнетронного распыления.

Библиографический список

1. Пророкова Н.П., Кумеева Т.Ю., Агафонов А.В., Иванов В.К. // *Перспективные материалы*. 2017. № 1. С. 19.
2. Prorokova N.P., Kumeeva T.Yu., Gerasimova T.V., Agafonov A.V. // *Inorganic Materials*. 2017. V. 53. P. 1336.
3. Prorokova N., Kumeeva T., Kholodkov I. // *Coatings*. 2020. V. 10. 82.

Поляризация пленок ПВДФ в коронном разряде

Polarization of PVDF films in the corona discharge

Холодков И.В.¹, Шикова Т.Г.¹, Смирнов С.А.¹, Горберг Б.Л.¹, Makeev M.O.²,
Михалев П.А.², Осипков А.С.²

Kholodkov I.V., Shikova T.G., Smirnov S.A., Gorberg B. L., Makeev M. O., Mikhalev P. A., Osipkov A. S.

¹*Ивановский государственный химико-технологический университет*

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: kholodkov@isuct.ru

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

A polarized and unpolarized polyvinylidene fluoride film from PolyK (USA) was studied by infrared spectroscopy and X-ray phase analysis. The polarization of the film in a pulsed corona discharge was successfully carried out.

ПВДФ – фторполимер, обладающий пьезоэлектрическими свойствами. Это делает возможным его применение в качестве различных датчиков, аудио преобразователей, сенсоров. ПВДФ — полиморфный полимер, он кристаллизуется с образованием ряда полиморфных модификаций, главным образом, в неполярной α -форме и полярной β -форме. Его пьезосвойства связаны с возможностью формирования в его кристаллической структуре значительной доли кристаллитов пьезоактивной β -модификации. Основным способом поляризации пленок является термополяризация, которая состоит в приложении к пленке постоянного электрического поля высокой напряженности при повышенной температуре. Целью данной работы было исследование возможности поляризации пленок ПВДФ в коронном разряде.

В работе использовали пленку Unpoled PVDF (неполяризованная) фирмы PolyK, США, толщиной 28 мкм. Для оценки эффективности поляризации в коронном разряде для сравнения использовали Piezo PVDF (поляризованная) пленку ПВДФ того же производителя. Анализ исходных пленок методом ИК спектроскопии НПВО показал, что в обоих случаях в полимере присутствует кристаллическая фаза в α - и β -форме (полосы поглощения с максимумами на 766 и 840 см⁻¹ соответственно). Оценка доли пьезоактивной β фазы, выполненная по методике, приведенной в работе [1], дала следующие результаты: у неполяризованной пленки - 0,78, у поляризованной – 0,88. Данные рентгенофазового анализа подтверждают наличие двух кристаллических фаз в обеих пленках и более высокое содержание β фазы в поляризованной пленке ПВДФ. У поляризованной пленки наблюдается рентгеновский рефлекс высокой интенсивности на угле 2θ 20,7° (β фаза), у неполяризованной пленки присутствует более широкий рефлекс с меньшей интенсивностью на угле 20,4° с плечом на 18,1° (α фаза). Величина относительной диэлектрической проницаемости неполяризованной пленки изменяется от 2,29 до 2,20 с ростом частоты от 1 до 1000 кГц, а для поляризованной пленки. от 2,15 до 2,06.

Поляризацию пленок проводили в импульсном коронном разряде (напряжение на отрицательном ионизирующем электроде 30 кВ, импульсный ионный ток 15 мкА, скважность 10). Образец размером 50×30 мм размещался на подогреваемом заземленном электроде на расстоянии 15 мм от ионизирующего лезвия. Обработка проводилась в течение 45 минут при температуре 80 °С и 15 минут в условиях естественного охлаждения до комнатной температуры.

Эффективность проведенной поляризации оценивали методом обратного пьезоэффекта по величине акустического отклика от образцов с нанесенными тонкопленочными металлическими электродами при подаче на них синусоидального напряжения амплитудой 30 В и частотой 5кГц. Для измерений использовался измеритель шума ВШВ-003. Величина измеренного звукового давления для неполяризованного образца находилась в пределах 22-24 дБ. После поляризации данная характеристика увеличилась до значений 69-72 дБ, что практически соответствует значениям 74-76 дБ, полученным для образца сравнения, изготовленного на основе готовой поляризованной пленки, имеющей значение коэффициента $d_{33} > 23$.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-671

Библиографический список

1. Sencadas, V. // Materials Science Forum. – 2006. – V. 514/516. – P. 872–876.

Морфология поверхности полипропиленовой пленки после обработки в плазме тетрафторида углерода

Morphology of the polypropylene film surface after treatment in carbon tetrafluoride plasma

Холодков И.В., Холодкова Н.В., Смирнова И.М.
Kholodkov I.V., Kholodkov N.V., Smirnova I.M.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
 153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: kholodkov@isuct.ru*

The effect of plasma CF₄ on the surface morphology of polypropylene films was investigated. It is shown that as a result of processing, there is a slight decrease in surface roughness.

Практическое применение полимерных материалов во многом определяется микрорельефом и химической структурой поверхности, которая оказывает существенное влияние на протекание многих процессов на границе раздела: адсорбции из газовой фазы и жидкости, химических реакций, конденсации жидкости в микропорах, смачивание и растекание жидкости по твердой поверхности. Широкие возможности для получения материалов с заданными свойствами поверхности предоставляет метод модификации в тлеющем разряде. В данной работе было проведено исследование структурных изменений поверхности полимерной пленки, обработанной в тлеющем разряде постоянного тока в чистом CF₄. В качестве образцов использовались пленки полипропилена толщиной 50 мкм. Условия эксперимента были следующие: ток разряда 20 мА, давление 70 Па, объемный расход плазмообразующего газа 15 см³/с время обработки 20 мин. Образцы размером 4×6 см располагались на удалении 5 см от оси разряда вблизи анода.

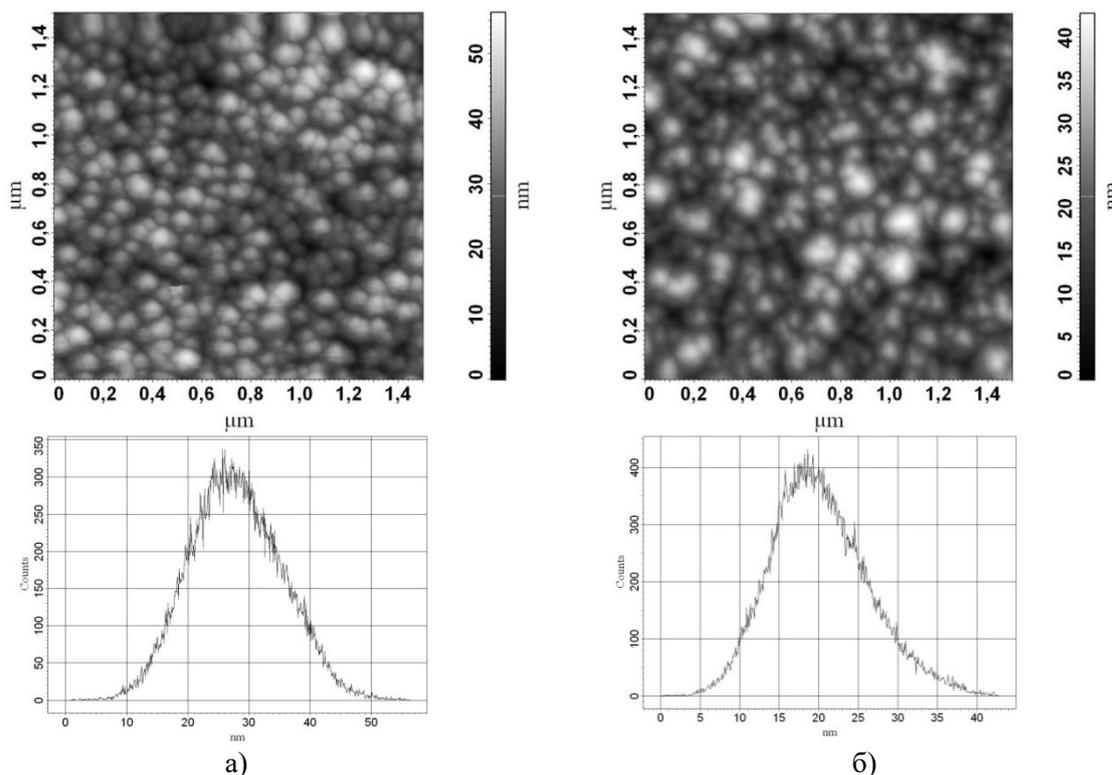


Рисунок. Поверхность полипропиленовой пленки и гистограмма распределения участков поверхности по высоте до (а) и после обработки (б)

В результате обработки наблюдается незначительное снижение шероховатости поверхности образцов с 6,1 до 4,9 нм. Реализованная конфигурация плазмохимического реактора была оптимизирована с целью снижения воздействия на поверхность потоков заряженных и возбужденных частиц. В таких условиях на поверхность образцов преимущественно попадают радикалы и метастабильные частицы, которые благодаря иницирующему действию УФ излучения плазмы могут способствовать формированию ультратонкой фторосодержащей пленки.

Особенности гидрофобизации поверхности полимеров в тлеющем разряде постоянного тока в CF_4

Features of polymer surface hydrophobization in a DC glow discharge in CF_4

Холодкова Н.В., Холодков И.В., Кудрякова В.П.

Kholodkova N.V., Kholodkov I.V., Kudryakova V. P.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: kholodkova@isuct.ru*

The influence of the design features of a plasma-chemical reactor on the contact angle of polypropylene films has been studied. The most optimal processing parameters have been proposed to ensure a significant increase in the hydrophobic characteristics of the surface.

Воздействие плазмы на поверхность полимера позволяет изменять, в основном, его контактные свойства (смачивание, адгезию к тонким слоям металла, наносимого как с помощью вакуумного распыления, так и другими методами, способность к склеиванию и т.п.). Используя метод полимеризации в плазме для органических и элементарорганических соединений, можно осаждать на поверхности полимерных материалов тонкие пленки различной химической природы (гидрофильные, гидрофобные). Это позволяет в очень широких пределах изменять поверхностные свойства исходного полимера.

Целью данной работы было исследование влияние взаимосвязи гидрофобных свойств поверхности полимерных образцов в зависимости от их расположения относительно областей тлеющего разряда. В качестве образцов использовались пленки полипропилена толщиной 50 мкм. Обработка пленок проводилась в тлеющем разряде постоянного тока в чистом CF_4 при токе разряда 20 мА и давлении 70 Па. Объемный расход плазмообразующего газа составлял $15 \text{ см}^3/\text{с}$. Образцы шириной 2 см и протяженностью 7 см располагались в одном случае продольно между катодом (диаметром 9 см) и анодом (диаметром 3 см) на удалении 5 см от оси разряда и в другом случае поперек на расстоянии 1 см от анода. Расстояние между электродами составляло 10,5 см. Ввод газа осуществлялся между зоной разряда и поверхностью образца. Гидрофобные свойства поверхности определялись методом измерения краевого угла смачивания с использованием дистиллированной воды (рисунок).

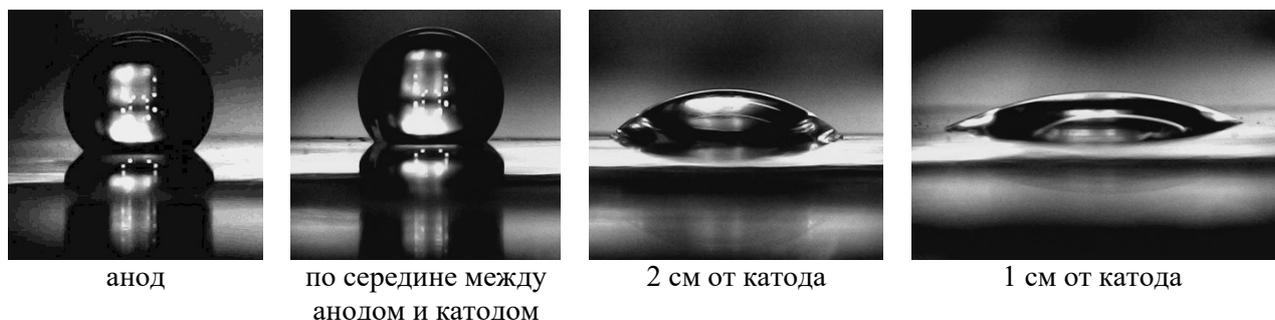


Рисунок. Фотографии, иллюстрирующие изменение гидрофобных свойств поверхности полипропилена

Наибольшая гидрофобность поверхности полипропилена была достигнута на образцах, расположенных вблизи анода. В этом случае величина краевого угла смачивания возрастает на 45 % по сравнению с исходным значением для необработанного образца. Важно отметить, что при реализованных условиях проведения эксперимента область положительного столба разряда не достигает поверхности образцов, и они фактически располагаются в области послесвечения. Для участков, расположенных вблизи катода, существенное влияние на результат обработки оказывают потоки заряженных частиц и увеличение роли электретных состояний [1].

Библиографический список

1. Яблоков М.Ю., Кузнецов А.А. Роль электретного состояния в модифицировании фторполимеров в низкотемпературной плазме // Научно-практическая конференция «Фторидные материалы и технологии» 15 – 19 апреля 2024. С. 35-36.

Спектральный контроль содержания металлов в составе биологических структур

Spectral monitoring of metal content in biological structures

Блинов Д.И., Ситанов Д.В.*

*Blinov D.I., Sitanov D.V.**

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: daniil.blinov.2002@mail.ru;
sitanov@isuct.ru**

The work proposes an original method for monitoring the content of harmful substances in biological structures. It is argued that a sharp deviation in the quantity of any chemical elements in the composition of plant cells indicates the presence of risk factors. Control of the accumulation of pathogens can be realized using a barrier discharge and analysis of the resulting spectral data.

Развитие технологий и средств автоматизации в сельском хозяйстве требует использования не только классического набора удобрений, но и препаратов, содержащих микроэлементы в больших концентрациях [1]. Подобная практика может привести к дисбалансу состава микроэлементов в растительных культурах. С другой стороны, возможны случаи, когда утечка вредных веществ может стать причиной накопления патогенов в растениях. В связи с этим периодический контроль состава биологических структур на местности может стать отличной практикой мониторинга состояния окружающей среды. При этом лабораторные методы исследования достаточно точны, но требуют для своей реализации много времени. В связи с этим в рамках данного исследования предлагается простой в реализации, но достаточно информативный метод контроля содержания не свойственных для растений элементов при обычных ситуациях. Суть метода состоит в том, что, используя специально спроектированный зонд оригинальной конструкции, можно возбудить в непосредственной близости от листовых пластин газовый разряд. Обычно используют диэлектрический барьерный разряд (ДБР). Анализируя эмиссионный спектр, можно без труда зафиксировать наличие в клетках растений металлы с повышенной концентрацией. Настройка системы производилась таким образом, чтобы сигнал от естественного содержания металлов в спектре (при обычных условиях) находился на уровне фонового значения. В работе так же был обоснован принцип реализации данной методики. Так, в клетках растений присутствуют устьица, которые образовались из-за двух замыкающихся клеток, через которое происходит испарение воды и осуществляется газообмен с окружающей средой. Если к образцу подводить ток, то он будет замыкаться через устьица и существенную роль в проведении тока должна играть жидкость, которая содержится в клетке. Известно, что электропроводность листьев растений обусловлена наличием ионов в жидкости, содержащейся внутри их и часть тока будет замыкаться через устьица, а часть через кромки листьев. А это значит, что через устьица под действием поля разряда может инициироваться массообмен клетки с внешней средой [2]. При этом реализуемые в клетках напряженности поля за счет неоднородности объекта оказываются соизмеримыми с пороговыми значениями энергий ионов, при которых происходит распыление материалов [3]. Кроме того, в клетках живого организма под действием плазмы образуются колебания с различными частотами, а под действием электромагнитных волн образуются волновые структуры. При этом можно предположить, что в биологических структурах металлы будут находиться в ионизованном состоянии, то есть могут быть подвержены перемещению под действием электромагнитных полей. Другими словами, можно ожидать эмиссию зараженных частиц в объем плазмы с последующим их возбуждением и получением характеристического спектра. С помощью такой методики можно контролировать элементарный состав клеточных структур.

Библиографический список

1. Виноградов Д.В., Наумцева К.В., Лупова Е.И., Соколов А.А., Антошина О.А. // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. **2019**. № 4 (44). С. 126-131.
2. Климовский, И. И. // *Энергия*. **1986**. № 6. С. 78-87.
3. Сироткин Н.А., Титов В.А. // *Прикладная физика*. **2016**. № 6. С. 25-31.

Влияние плазмохимической обработки хитозана на всхожесть и развитие проростков черных бобов (*Vicia faba*)

The effect of plasma-chemical treatment of chitosan on the germination and development of black bean (*Vicia faba*) seedlings

Доброва Ю.С.^a, Наумова И.К.^a, Титов В.А.^b

Dobrova Yu.S., Naumova I.K., Titov V.A.

^a *Ивановский государственный университет*

Россия 153000, Иваново, ул. Ермака, 39, E-mail: irinauma@mail.ru

^b *Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук*

Россия 153045, Иваново, ул. Академическая, 1, E-mail: tva@isc-ras.ru

Water-soluble low molecular weight derivatives of chitosan were obtained by plasma treatment of chitosan solutions in dilute acetic acid. It is shown that the use of chitosan degradation and modification products accelerates the early development of black bean seedlings and enhances the production of phytopigments in plant leaves.

Одно из перспективных направлений плазмохимии связано с применением плазмы для повышения эффективности растениеводства [1]. Было показано, что обработка воды, водных растворов или суспензий хитозана плазмой атмосферного давления позволяет с использованием минимального количества реагентов получать стимуляторы, которые улучшают всхожесть семян и ускоряют рост растений. Цель данной работы – выяснить влияние водорастворимых продуктов деструкции и модификации хитозана, полученных плазменной обработкой его уксуснокислых растворов, на развитие проростков черных бобов и на выработку в растениях фотосинтетических пигментов. В экспериментах использовали 0,1% (мас./об.) водный раствор низкомолекулярного хитозана ($M_w \sim (1 - 10)$ кДа), который был получен с использованием плазмы подводного (торцевого) разряда. Процедуры плазмохимической обработки и выделения водорастворимых продуктов модификации хитозана описаны ранее [2]. Выделенные продукты использовали для проращивания семян и последующего полива в грунте. Динамику всхожести и прорастания в грунте контролировали по стандартным методикам, для контроля использовали водопроводную воду. Эксперименты показали, что средняя длина проростков из семян, замоченных в растворе модифицированного хитозана, на 56% больше, чем в контрольной партии (13,6 и 8,7 мм соответственно). На 26% увеличилась средняя длина корешков по сравнению с контролем (30,4 мм против 24,1 мм). При выращивании в грунте через 20 дней количество завязей в ростках бобов экспериментальной партии составило 100%, а в контрольных образцах – 80%. Площадь листовой поверхности опытных образцов была в 1,6 раза выше, чем у контрольных; зеленая масса растений при поливе раствором модифицированного хитозана на 24% больше, а сухая масса – на 29%. Нарработку фотосинтетических пигментов в растениях оценивали по электронным спектрам поглощения экстрактов из листьев. Содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях (мг/г сухой массы листьев), при использовании водорастворимого хитозана или активированной плазмой воды (PAW), увеличилось по сравнению с контрольными образцами (таблица).

	Хлорофилл <i>a</i> , мг/г	Хлорофилл <i>b</i> , мг/г	Каротиноиды, С, мг/г
Контроль	2,94	1,29	0,80
0,1% р-р хитозана	4,82	2,32	0,95
PAW	4,43	2,06	1,02

Библиографический список

1. Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E., Kolik L.V., Dorokhov A.S., Izmailov A.Y., Shokri B., Gudkov S.V. Advancements in plasma agriculture: A Review of recent studies // *Int. J. Mol. Sci.* **2023**. *V.* 24. P. 15093.
2. Titov V.A., Naumova I.K., Khlyustova A.V., Sirotkin N.A. Gas discharge treatment of chitosan solutions to obtain biologically active products // *High Energy Chem.* **2023**. *V.* 57. № S1. P. S238.

Влияние плазмохимических процессов на физико-механические характеристики неорганических и органических волокнистых наполнителей композиционных материалов

The effect of plasma chemical processes on the physical and mechanical characteristics of inorganic and organic fibrous fillers of composite materials

Сагитова Ф.Р.*, Некрасов И.К.** , ***, Шарифуллин Ф.С.*

Sagitova F.R., Nekrasov I.K., Sharifullin F.S.

*КНИТУ, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса 68, farida_sagitova@mail.ru

** Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская 18, igor05071997@mail.ru

***ООО «ПЛАЗМА-ВСТ», 420080, г. Казань, ул. Курская 27, 2960091@mail.ru

В настоящее время использование неорганических и органических волокнистых наполнителей таких как стекловолокно (СВ), углеродное волокно (УВ) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обработанных потоком низкоэнергетических ионов, позволяет получить композиционные материалы (КМ) с высокими эксплуатационными параметрами.

Свойства КМ зависят от процессов, протекающих на границе раздела фаз, и характеризуются прочностью сцепления волокна с матрицей и совокупностью напряжений, передаваемых матрицей армирующим волокнам. Характеристикой границы раздела фаз является адгезионная прочность. Для ее увеличения необходима модификация компонентов КМ на надмолекулярном уровне без изменения исходного химического строения.

Прочностные характеристики КМ существенно зависят от сохранности механических характеристик армирующего вещества при его модификации.

К низко энергзатратным и наиболее экологичным относятся плазмохимические методы модификации.

В работе представлены результаты воздействия потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления на СВ, УВ, СВМПЭ. Данный метод обработки не приводит к деструкции армирующих материалов.

Установлен оптимальный плазменный режим для СВ и стеклоткани (СТ): энергия ионов $W_i=80\text{эВ}$, плотность ионного тока $J_i=1,5\text{А/м}^2$, $\tau=180\text{сек}$, $P=26,6\text{Па}$, $G=0,04\text{г/с}$, плазмообразующий газ Ar (70%) – воздух (30%). Плазменная модификация позволяет повысить прочность на разрыв для СВ в 2 раза и для СТ на 27% относительно исходных образцов. Полученные КМ на их основе показали увеличение прочности на разрыв на 25% и ударной вязкости на 75%.

Плазменное модифицирование УВ при пониженном давлении позволило улучшить физико-механические характеристики. В качестве плазмообразующего газа использовались смеси Ar с O_2 , CO_2 и CO . Сдвиговая прочность КМ на их основе возросла на 21%.

Высокие эксплуатационные характеристики для КМ на основе модифицированных СВМПЭ при режиме: $W_i=90\text{эВ}$, $J_i=1,5\text{А/м}^2$, $\tau=180\text{сек}$, $P=26,6\text{Па}$, $G=0,04\text{г/с}$, плазмообразующий газ Ar . После обработки прочность сцепления модифицированного СВМПЭ с матрицей повысилась в 2 раза, что позволяет получить высокопрочный КМ, превосходящий по удельной прочности металлы в 6-7 раз, стеклопластики в 2 раза, а углепластики в 1,5 раза.

Найдены режимы обработки армирующих материалов потоком низкоэнергетических ионов, которые позволяют создавать сверхлегкие высокопрочные КМ на их основе.

Получение и сенсibilизация фоточувствительных слоев PbSe методом плазмохимического осаждения из газовой фазы

PECVD preparation and sensibilization of PbSe photosensitive layers

Слаповская Е.А., Мочалов Л.А., Телегин С.В., Кудряшов М.А.

Slapovskaya E.A., Mochalov L.A., Telegin S.V., Kudryashov M.A.

Университет Лобачевского

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, E-mail: slapovskaya@unn.ru

To obtain the lead selenide layers, for the first time, we implemented the PECVD method. Elementary high-purity Pb (5N) and Se (5N) were used as starting materials, and high-purity argon was used as a carrier gas. Deposition was carried out on cooled glass substrates with dimensions of 25×25×1 mm, selected as a template for the further creation of photosensitive matrices by lithography. Sensitization of the resulting films was carried out in two stages: annealing in and then iodination in plasma.

Селенид свинца представляет собой полупроводниковый материал с узкой прямой запрещенной зоной, с полезными электрическими, оптическими свойствами и свойствами решетки. Обладает уникальными свойствами – экситоном Бора (В46 нм), который позволяет настраивать ширину запрещенной зоны от 0,27 эВ до 2,0 эВ; возможностью работы в ближнем инфракрасном и видимом диапазоне, от 1 до 5 мкм [1, 2]. Нанокристаллические пленки PbSe могут быть полупроводниками как p-типа, так и n-типа, в зависимости от соотношения Pb и Se [3].

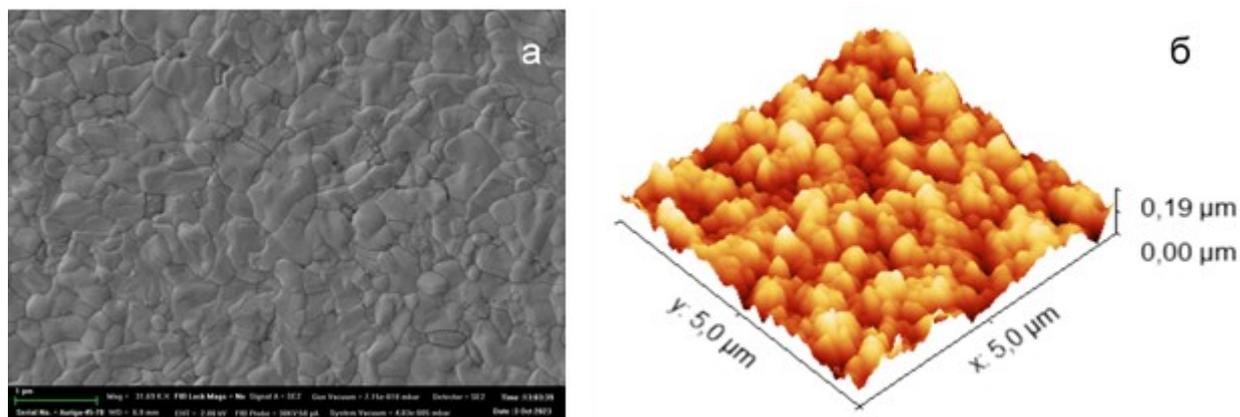


Рис. 1 – Результаты СЭМ (а) и АСМ (б)

Для получения слоев селенида свинца в настоящей работе использовался метод химического осаждения из газовой фазы (CVD), реализованный на установке для синтеза халькогенидных структур. В качестве исходных веществ были использованы элементарные высокочистые свинец (5N) и селен (5N), а в качестве газа-носителя - высокочистый аргон. Осаждение проводили на охлаждаемые стеклянные подложки размером 25×25×1 мм, выбранные в качестве шаблона для дальнейшего создания фоточувствительных матриц методом литографии. Сенсibilизация полученных пленок осуществлялась в две стадии: отжиг на воздухе, а затем йодирование. Исследовано влияние условий отжига на воздухе и йодирования на морфологию поверхности и фотоэлектрические свойства конечных пленок. Данные о структуре и морфологии поверхности образцов были получены методами РФА, СЭМ и АСМ.

Библиографический список

1. Bando C.K., Nkrumah I., Ampong F.K., Nkum R.K., Boakye F. // Chalcogenide Letters. **2021**. V. 18. (2).
2. Ding J., Song Y., Ding D. // Surface Review and Letters (SRL), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., V. 30(08). P. 1-8.
3. Harrison J.T., Gupta M.C. // J. Appl. Phys. **2022**. V. 131 (2). P. 025308.

Плазмохимическое осаждение тонких пленок $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$

Plasma chemical deposition of $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films

Кудряшов М.А.*, Мочалов Л.А., Слаповская Е.А.
Kudryashov M.A., Mochalov L.A., Slapovskaya E.A.

*Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, E-mail: mikhail.kudryashov1986@yandex.ru
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

First, $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) thin films were grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition, where elemental high-purity gallium (5N), sulfur (5N) and selenium (5N) were the starting materials, and high-purity argon (6N) was implemented as a carrier gas. Deposition was carried out on sapphire (0001) substrates with 10×10 mm in size. The composition of the $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ films was determined by energy-dispersive spectroscopy measurements. Data on the surface morphology of the samples were obtained by SEM and AFM methods. The structural properties were studied by XRD. Diffraction patterns showed that the $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ films possess a hexagonal structure with high crystalline quality. The lattice constants of the samples were estimated. The optical properties of $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ films were found out from the transmission spectra. It was found that the optical band gap of the films increases with increasing sulfur content.

GaS и GaSe представляют собой полупроводники слоистого типа, кристаллизующиеся в решетке с сильными внутрислойными ковалентными связями и слабыми межслоевыми ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями. Эти материалы привлекли внимание исследователей благодаря своим привлекательным свойствам в технологических приложениях, таких как полевые транзисторы, термоэлектрические устройства, устройства преобразования и хранения энергии, нелинейные оптические устройства и фотодетекторы. GaSe и GaS образуют непрерывный ряд смешанного соединения $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ без ограничений в диапазоне $0 \leq x \leq 1$. $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ представляет собой значительное преимущество, заключающееся в том, что различные характеристики GaSe и GaS можно регулировать в зависимости от соотношения их составов. Принимая во внимание технологическое применение GaSe и GaS, смешанные кристаллы $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ потенциально могут быть использованы при изготовлении светоизлучающих и оптических переключающих устройств и фотодетекторов.

Соединения GaSe и GaS исследовались в виде тонкопленочных структур во многих работах. Однако, насколько нам известно, рост тонкопленочных структур смешанных кристаллов $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ представлен очень мало. Нами было найдено всего три работы по данной тематике, где получение пленок осуществляли с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии и термического испарения [1–3]. В настоящей работе тонкие пленки $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) были впервые выращены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, где в качестве исходных веществ были использованы элементарные высокочистые галлий (5N), сера (5N) и селен (5N), а в качестве газа-носителя - высокочистый аргон (6N). Осаждение проводили на сапфировые подложки размером 10×10 мм. Состав пленок $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ определен на основе измерений энергодисперсионной спектроскопии. Данные морфологии поверхности образцов были получены методами СЭМ и АСМ. Структурные свойства были изучены методом РФА. Дифрактограммы показали, что пленки $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ имеют гексагональную структуру с высоким кристаллическим качеством. Оценены постоянные решетки образцов. Оптические свойства пленок $\text{GaS}_{1-x}\text{Se}_x$ исследованы из спектров пропускания. Обнаружено, что оптическая ширина запрещенной зоны пленок увеличивается с увеличением содержания серы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-19-20081, <https://rscf.ru/project/22-19-20081/>

Библиографический список

1. Budiman M., Okamoto T., Yamada A., Konagai M. // Applied Surface Science. **1997**. V. 117-118. P. 518–522.
2. Isik M., Emir C., Gasanly N.M. // Optik. **2021**. V. 230. P. 166344.
3. Işık P., Karatay A., Gul Yaglioglu H., Elmali A., Kürüm U., Ateş A., Gasanly N. // Optics Communications. **2013**. V. 288. P. 107–113.

Разработка супергидрофобных покрытий фотоэлектрических ячеек для автономных модулей трекинга вагонов

Development of superhydrophobic photovoltaic cell coatings for autonomous wagon trekking modules

Пермякова Е.С.*, Манахов А.М.

Permyakova E.S., Manakhov A.M.

Национальный университет науки и технологий МИСИ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, E-mail: permyakova.es@misis.ru

На настоящий момент активно внедряются аппаратно-программные комплексы для отслеживания передвижения и местоположения вагонов и локомотивов на железнодорожных путях, что существенно улучшает логистику и экономическую эффективность. Однако системы, которые сейчас существуют, работают в полуавтоматическом режиме и в основном автоматизация основана на распознавании номеров вагонов по изображениям и передачи данных с обработанных изображений на сервер. Для постоянного онлайн слежения за подвижным составом необходимы комплексы, которые предполагают размещения трекинг систем в составе вагонов/локомотивов, использующие спутниковые трекинг системы GPS или ГЛОНАСС. Для поддержания их работы необходим источник энергии, в большинстве случаев для данных задач используют фотоэлектрические системы. Однако, поскольку фотоэлектрические устройства часто находятся на открытом воздухе в течение длительного времени, большое количества пыли и др. загрязнений может оседать на поверхности крышки фотоэлектрической ячейки (в основном из стекла). Также при движении поездов вагоны могут преодолевать большие расстояния и проходить через разные климатические зоны, попадать под воздействие погодных осадков (дожди, снег), что способно привести к оледенению. Перечисленные факторы могут серьезно повлиять на эффективность фотоэлектрической генерации.

Изменение гидрофильности покровного стекла фотоэлектрической ячейки на супергидрофобность является пассивным методом очистки с большим потенциалом развития, который предотвращает накопление пыли и адгезию льда. Приготовление супергидрофобной пленки было проведено за счет плазменной полимеризации, что обеспечило адгезию между супергидрофобной пленкой и стеклянной подложкой за счет образования стабильных ковалентных связей. Осаждение проводили с использованием системы подачи жидких прекурсоров в плазменный реактор (ZP-COVANCE-RFPE-3MP, Covance, Южная Корея). Были протестированы и проанализированы фундаментальные характеристики осаждаемого покрытия, включая коэффициент пропускания, угол контакта, микроморфологию и энергетический спектр. Светопропускание пленки было измерено с помощью японского спектрофотометра Shimadzu uv3600. Поскольку необходимый свет для фотоэлектрических модулей находится в основном в области видимого света, светопропускание образца будет измерено видимым светом с длиной волны в диапазоне от 300 нм. до 800 нм. Наконец, после нанесения пленки на фотомодули было изучено влияние супергидрофобной пленки на характеристики самоочистки и улучшение выходной мощности. Были проведены эксперименты по моделированию процесса оледенения, за счет распыления воды на поверхность ФЯ с последующей заморозкой образца. В данной работе были исследованы несколько видов прекурсоров для плазмохимической полимеризации с целью получения супергидрофобных покрытий на поверхности фотоэлектрических ячеек.

Секция 4

ОРГАНИЧЕСКИЙ И НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГАЗОФАЗНЫХ И ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Паровой риформинг метана в СВЧ разряде в воде

Steam reforming of methane in microwave discharge in water

Батукаев Т.С.¹, Билера И.В.¹, Крашевская Г.В.^{1,2}, Лебедев Ю.А.¹

Batukaev T.S., Bilera I.V., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A.

¹Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, 29, E-mail: batukaevtimur95@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

The products of the gas phase of a microwave discharge (2.45 GHz) in water with methane bubbling were studied. The discharge was ignited in a liquid at the end of a tungsten tube through which methane was supplied. The pressure above the liquid was equal to atmospheric pressure. The composition of products at the outlet of reactor: H₂, CO₂, CO, CH₄, O₂. Obtained dependences of the products formation rates on the methane flow rate for different values of incident power are obtained. The highest value of hydrogen formation rate was 227 ml/min.

В последнее время растет интерес к производству водорода и водородосодержащих газов. Ожидается, что водород станет безвредным и доступным источником энергии. Ответ на вопрос, сможет ли водород удовлетворить мировые потребности в качестве энергоносителя, не столь очевиден. Подробно эта проблема рассмотрена в [1] и обоснован вывод о том, что на начальном этапе развития водородной энергетики наиболее реальным способом решения сложных проблем транспортировки и хранения водорода является его рассредоточенное малотоннажное производство непосредственно на предприятиях места потребления.

В настоящее время основным способом получения водорода является каталитический риформинг легких углеводородов [2]. Большое внимание уделяется проблеме получения водорода с использованием СВЧ разрядов в жидких углеводородах, растворах спирта и воде [3-5]. Разряд нестационарен и плазмохимические процессы происходят в газовом пузыре, расположенном внутри жидкости на конце СВЧ-антенны. Барботаж дополнительными газами исследован в [5].

Основной целью работы было исследование получения водорода в микроволновом разряде в воде с барботаж метана. Экспериментальная установка, используемая для генерации и исследования СВЧ-разряда в жидкостях, подробно описана в [4, 5]. Разряд создавался в воде на конце вольфрамовой трубки, через которую подавался метан. Для облегчения возникновения разряда, в воду добавляли небольшое количество легкоионизируемого вещества - гидроксида калия (0,025 моль/л). Продукты газовой фазы отделялись от паров жидкости с помощью водяного холодильника и их состав исследовался на газовом хроматографе.

Были получены зависимости скоростей образования продуктов и концентрации продуктов от расхода метана для различных значений падающей мощности. Из полученных экспериментальных результатов следует вывод о том, что состав продуктов газовой фазы напрямую зависит от соотношения метана и паров воды в пузырьке с плазмой. Наибольшее значение скорости образования водорода равнялось 227 мл/мин, оно было получено при падающей мощности 650 Вт и потоке метана 74 мл/мин.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

Библиографический список

1. Lebedev Yu. A. // *Polymers* **2021**. V. 13. I. 11. P. 1678.
2. Nikolaidis P., Poullikkas A. // *Renewable and sustainable energy reviews*, **2017**. T. 67. C. 597-611.
3. Wang Q. et al. // *Chemical Engineering Journal* **2023**. T. 465. C. 142872.
4. Batukaev T. S. et al. // *Plasma Processes and Polymers* **2023**. T. 20. № 6. C. e2300015.
5. Batukaev T. S. et al. // *Processes* **2023**. T. 11. № 8 C. 2292.

СВЧ-плазменная конверсия метана в ацетилен и бензол

Microwave-plasma-activated methane conversion into acetylene and benzene

Капустин Р.В., Агрба А.И., Гринвальд И.И.

Kapustin R.V., Agrba A.I., Grinvald I.I.

*Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
603900, г. Нижний Новгород, улица Минина, 24, E-mail: grinwald@mts-nn.ru*

The investigation of microwave plasma activated methane conversion in acetylene and benzene at different condition of plasma generation is presented. A system of two active zones in a synthesis reactor was evaluated. The temperature of reactor walls by the blowing gas and methane preheating control the conversion process. The pressure in the reactor, as well as the plasma burning time are the essential factors for achieving the best yield of products. These operating factors can be applied separately or in combination. The application of flow-rate mode provides the industrial quantities of acetylene and benzene at relatively low methane pressure in reactor. A general qualitative model of methane reforming in these conditions is suggested.

СВЧ-плазмохимические методы получения основных продуктов органического синтеза из природного сырья являются одним из перспективных направлений современной химической технологии, альтернативной нефтехимическим синтезам. Это связано, прежде всего, с высокой энергоэффективностью и экологичностью таких процессов. В частности, это относится к получению ацетилена и бензола из метана.

В представленной работе предложен новый подход, позволяющий существенным образом увеличить выход ацетилена и получить бензол в системе с контролируемой СВЧ-активированной конверсией метана, К основным особенностям этого подхода относится создание в плазменном реакторе двух зон синтеза – зоны активации и зоны релаксации (образования) продуктов, соотношение которых может регулироваться за счёт локального нагрева или охлаждения стенок реактора, изменения давления метана в реакторе, параметров струи входящего в реактор газа, скорости вывода продуктов синтеза, обдува стенок реактора воздухом разной температуры, а также предварительным нагревом метана.

Контроль выхода образующихся продуктов осуществлялся методом ИК-спектроскопии in-situ по характеристическим полосам поглощения ацетилена и бензола, Предложенный вариант мониторинга является надёжным и не требует разработки дополнительных методик и использования сопутствующих компонентов, а также удобен для применения в производственных условиях. Разделение основных продуктов проводилось методом низкотемпературной сепарации в потоке с конденсацией и последующим испарением продуктов плазмохимического синтеза.

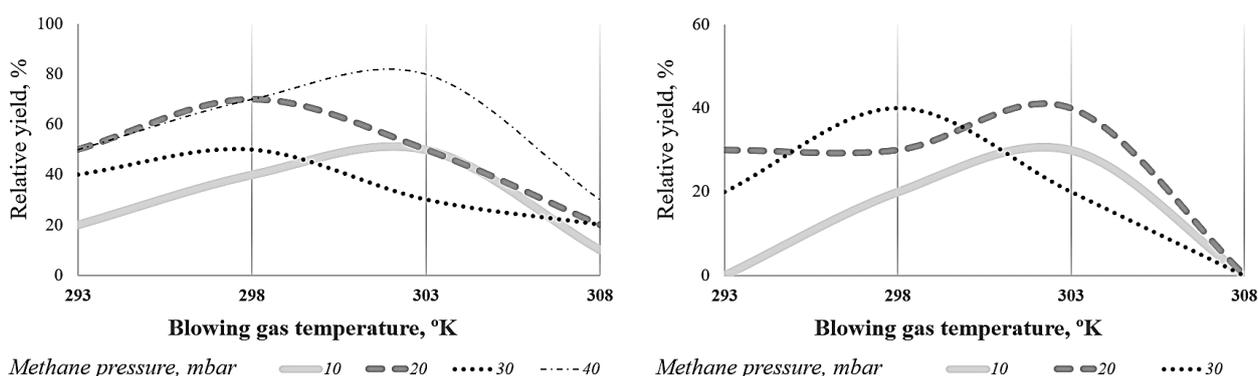


Рисунок 1. Зависимость выхода ацетилена (слева) и бензола (справа) от температуры обдувающего стенки реактора газа при разных давлениях метана в реакторе.

В рамках нашего подхода удаётся достичь существенно больших выходов продуктов (рис.1), по сравнению с известными в литературе результатами плазмохимического синтеза ацетилена из метана (выход 15–45%). При этом нами не используются катализаторы и, кроме того, в условиях проведения процесса удаётся получить бензол при прямой конверсии метана.

Физико-химические процессы образования и гибели активных частиц в подводном разряде переменного тока

Physico-chemical processes of formation and active particles in an underwater alternating current discharge

Ощенко И.И., Смирнов С.А.
Oshchenko I.I., Smirnov S.A.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: sas@isuct.ru*

Исследование процессов взаимодействия неравновесной плазмы с жидкой фазой на сегодняшний день приобретает важность для большого числа областей науки и техники [1, 2]. Процессы, протекающие в плазме, являются многоканальными и многостадийными, а внутренние параметры плазмы сами зависят от скоростей протекающих физико-химических процессов. Поэтому анализ такой сложной системы требует кроме широкого набора экспериментальных данных также данных, полученных численным моделированием.

Целью работы является анализ кинетики и механизмов физико-химических процессов, формирующих стационарные параметры и состав активных частиц разряда переменного тока, горящего между металлическими электродами, погруженными в воду. Описание установки и методик экспериментов можно найти в работах [3 – 5].

Были получены экспериментальные данные о параметрах разряда переменного тока частотой 50 Гц горящего под водой между электродами из меди, молибдена и стали. Диаметр газовых пузырьков, в которых происходит микроразряд, составляет $\sim 0,54 \pm 0,03$ мм. На основании вольтамперных характеристик разряда установлено, что продолжительность отдельных микроразрядов равна $\sim 0,9 \pm 0,2$ мс, разница потенциалов между электродами 510 ± 60 В, напряженность электрического поля $\sim 510 \pm 60$ В/см, приблизительная мощность термических источников нагрева жидкой среды $\sim 120 \pm 10$ Вт. [4].

Для выделения основных элементарных процессов, и уточнения состава газовой фазы микроразряда, выполнено совместное численное решение уравнения Больцмана для электронов, уравнений колебательной кинетики для основных электронных состояний молекул кислорода, воды, водорода, а также уравнений химической кинетики для процессов с участием указанных молекулярных продуктов.

Результаты моделирования показали, что состав газового пузырька для различных рассматриваемых систем не идентичен. Для комбинаций электродов с применением меди (Cu-Cu и Cu-Fe) можно говорить о схожем составе 60 % кислорода, 37 % водорода, 3 % паров воды. Для стальных электродов составляет 10 % кислорода, 87 % водорода, 3 % паров воды. Для систем с молибденовыми электродами состав несколько отличается: 55 % кислорода, 35 % водорода и 10 % паров воды. При данных составах газовой фазы удается добиться удовлетворительного согласия между расчетными и экспериментальными интенсивностями излучения основных компонентов разряда [5]. Показано, что при расчете ФРЭЭ нельзя пренебрегать столкновениями второго рода с колебательно возбужденными молекулами H_2O и H_2 .

Библиографический список

1. Mezei P., Cserfalvi T. A Critical Review of Published Data on the Gas Temperature and the Electron Density in the Electrolyte Cathode Atmospheric Glow Discharges // Sensors. – 2012. – №12. – P. 6576–6586.
2. Chen, Q. A review of plasma–liquid interactions for nanomaterial synthesis / Qiang Chen, Junschuai Li and Yongfeng Li // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2015. – V. 48. – № 42. – P. 424005.
3. Oshenko, I. I. Electrophysical parameters of AC plasma system / I. I. Oshenko, S. A. Smirnov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2270 11.06.2022. – DOI 10.1088/1742-6596/2270/1/012027.
4. Oshenko, I. I. Alternating current underwater discharge parameters / I. I. Oshenko, S. A. Smirnov // ChemChemTech. – 2022. – V.65, – №11. – P. 6–12. – DOI 10.6060/ivkkt.20226511.6696.
5. Ощенко, И. И. Экспериментальное исследование и моделирование физико-химических процессов в подводном разряде переменного тока / И. И. Ощенко, Смирнов С. А. // Прикладная физика. – 2023, – № 4. P.55–60. – DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-55-60

Секция 5

ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИКА РЕАГИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ

К теории разряда на электронном циклотронном резонансе в магнитной ловушке

On the theory of discharge on electronic cyclotron resonance in a magnetic trap

Двинин С.А., Корнеева М.А.*

Dvinin S.A., Korneeva M.A.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские Горы, 1, стр. 2, E-mail: s_dvinin@mail.ru

**ФГУ ФНЦ «Научно-исследовательский институт системных исследований РАН»,*

117218, Москва, Нахимовский проспект., 36, стр. 1. E-mail: korneevama@mail.ru

A kinetic model of an ultrahigh-frequency ECR discharge in a magnetic trap is constructed under conditions when the free path of ions is longer than the length of the trap, and the characteristic diffusion time to the wall is much longer than the time of ion flight between its ends. The equations obtained can be easily generalized to the case of a discharge in a gas stream, as well as to the case of a source of multicharged ions.

Разряды на электронном циклотронном резонансе применяются в современной физике для создания источников многозарядных ионов [1], ионов водорода [2], маневровых двигателей космических аппаратов [3] и плазмохимических установок для обработки материалов [4]. Одним из вариантов подобных устройств является разряд в магнитной ловушке [5]. Ранее были рассчитаны пространственное распределение поля и импеданс разряда для экспериментального стенда, генерирующего разряд в пробкотроне [6].

Цель данной работы – построение кинетической модели разряда в магнитной ловушке. Модель основана на предположении, что длина свободного пробега ионов много меньше размеров ловушки, а характерное время диффузии на стенку много больше времени пролета ионов между ее торцами. В приближенной модели магнитное поле считалось параксиальным и для него использовалась аппроксимация

$$\mathbf{B}_0 = B_0 \left(\mathbf{e}_z \left(1 + \frac{z^2}{l^2} - \frac{r^2}{2l^2} \right) + \mathbf{e}_r \frac{rz}{l^2} \right), \quad (1)$$

где B_0 – резонансное магнитное поле для частоты 2.45 ГГц. На магнитной поверхности, находящейся на расстоянии r_0 от центра симметрии ($r=0, z=0$) условие сохранения магнитного момента позволяет получить уравнение для потенциала, аналогичное уравнению плазмы и слоя Ленгмюра и Тонкса [7,8].

$$\sqrt{\frac{B_0(z)}{B_0(0)}} \frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 4\pi e n_0(r_0) \left\{ \exp\left(\frac{e\varphi(z)}{kT_e}\right) - (v_i(r_0) - \tau^{-1}(r_0)) \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{(2e/M)(\varphi(z') - \varphi(z))}} \exp\left(\frac{e\varphi(z')}{kT_e}\right) \right\} \quad (2)$$

На границе ловушки формируется слой пространственного заряда, уравнивающий потоки электронов и ионов на стенку. Здесь $v_i(r_0)$ – частота ионизации, усредненная по данной магнитной поверхности, а τ – усредненное по этой поверхности время жизни, связанное с диффузией поперек магнитного поля, определяемое второй производной зависимости усредненной плотности электронов n_0 по радиусу. Уравнение (2) предполагает, что и электроны, и ионы будут замагниченными. Интегрирование идет вдоль продольной координаты магнитной поверхности.

Распределение плотности заряженных частиц по радиусу определяется диффузией в магнитном поле. Использовалась классическая модель. Уравнение для радиального распределения плотности электронов имеет вид:

$$\frac{1}{r_0 n_0(r_0)} \frac{d}{dr_0} D_{eff}(r_0) r_0 \frac{dn_0(r_0)}{dr_0} = \tau^{-1}(r_0), \quad (3)$$

где D_{eff} – усредненный по магнитной поверхности коэффициент диффузии.

Пространственное распределение частоты ионизации в (1) определяется решением уравнения переноса тепла и уравнений максвелла. Для построения интегральной модели разряда поглощенную в плазме энергию можно рассчитать с помощью пакета Комсол [6].

Полученные уравнения можно легко обобщить на случай разряда в газовом потоке, а также на случай источника многозарядных ионов.

Библиографический список

1. Gammino S. // *Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: Ion Sources, Senec, Slovakia*, **2012**, CERN-2013-007, P. 123,
2. Zhang W.H., Ma H.Y., Yang Y., & al. // *Review of scientific instruments*, **2012**, V. 83, 02A329.
3. Fu S., Ding Z., Ke Y., Tian L.. // *IEEE Transactions on plasma science*. **2020**, V. 48, P. 676.
4. Asmussen Jr. J., Grotjohn T.A., Mak P., and Perrin M.A. // *IEEE transactions on plasma science*, **1997**, V. 25, P. 1196.
5. Asanina S.G. and Korneeva M.A. // *Plasma Physics Reports*, **2022**, V. 48. P. 96.
6. S. A. Dvinin, and Korneeva M. A. // *Plasma Physics Reports*, **2023**, V. 49, No. 11, pp. 1448–1452.
7. Langmuir I., Tonks L // *Phys. Rev.* **1929**. V. 34. P. 876.
8. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. // *Физика плазмы*. **1999**. Т. 25. С. 882.

Исследование переноса воды в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом

Investigation of the transfer of water into the gas phase in a discharge with a liquid cathode

Чистолинов А.В., Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С.

Chistolinov A.V., Gadzhiev M.Kh., Tyuftyaev A.S.

Объединённый институт высоких температур РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, E-mail: a-chi@yandex.ru

In this work, we studied the transfer of water into the gas phase under the action of a direct current discharge with a liquid cathode for different solution temperatures. The study was conducted on two reactors of different types. Approximating dependences of the water transfer coefficients on the solution temperature were found for both types of reactors. It was shown that the dependences of the water transfer coefficients on the temperature of solutions are exponential and do not depend on the type of reactor.

Взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью жидкости и, в частности, с поверхностью водных растворов является объектом повышенного интереса исследователей в последнее время. Целью настоящей работы являлось исследование процесса переноса воды из водного раствора электролита в газовую фазу под действием разряда постоянного тока с жидким катодом.

Впервые проведено исследование влияния температуры раствора на скорость переноса воды из водного раствора электролита в газовую фазу под действием разряда постоянного тока с жидким катодом. Исследование проведено для двух реакторов разного типа, отличающихся как способом сбора вещества, перенесённого разрядом в газовую фазу, так и условиями циркуляции раствора и плазмообразующего газа.

В ходе проведения исследования были определены коэффициенты переноса воды под действием разряда с жидким катодом для обоих реакторов при одних и тех же условиях. Все эксперименты проводились при токе разряда 80 мА и расстоянии между электродом и поверхностью раствора 6 мм. Перенос воды исследовался в диапазоне температур раствора: 25–85 °С.

Показано, что для реакторов обоих типов получаются близкие значения коэффициентов переноса воды для одинаковых температур. При этом, температура раствора оказывает чрезвычайно сильное влияние на значение коэффициентов переноса воды. Найдены аппроксимирующие зависимости коэффициентов переноса воды от температуры раствора. Показано, что зависимость коэффициента переноса воды из водного раствора под действием разряда с жидким катодом от температуры раствора хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

Пространственное распределение интенсивности свечения компонентов плазмы разряда с жидким электролитным катодом

Spatial distribution of the luminescence intensity of the discharge plasma components with a liquid electrolyte cathode

Чистолинов А.В.¹, Лубин А.А.^{1,2}, Якушин Р.В.²

Chistolinov A.V., Lubin A.A., Yakushin R.V.

¹*Объединённый институт высоких температур РАН*

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, E-mail: a-chi@yandex.ru

²*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9.*

The distribution of the luminescence intensity of the discharge plasma components with a liquid electrolyte cathode over the height of the discharge gap at atmospheric pressure in the air at a discharge current of 60 mA and a discharge gap of 2 mm was studied. The intensity distributions of the plasma components: OH radicals, molecular nitrogen N₂(2+), atomic hydrogen H I, atomic oxygen O I and atomic sodium Na I were obtained. It was shown that the distribution of the luminescence intensity of atomic NaI in a liquid cathode discharge differs significantly from the intensity distribution of other plasma components. As it was shown by the data of high-speed photography of the discharge, it was an averaging over a large number of individual "flashes" of Na I luminescence localized in different zones of the discharge.

Разряд с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе в широком диапазоне разрядных токов представляет собой тлеющий разряд атмосферного давления. Если разряд с жидким катодом происходит в воздухе, то в его эмиссионном спектре всегда наблюдаются полосы второй положительной системы молекулярного азота, OH радикала, атомарного водорода и кислорода. Поскольку разряд с жидким катодом имеет относительно небольшую протяжённость, обычно от 1 до 10 мм, многочисленные спектральные исследования разряда с жидким катодом проводились либо вообще без пространственного разрешения, либо с достаточно низким пространственным разрешением. Однако, высокое пространственное разрешение очень важно вблизи поверхности раствора и металлического электрода, где параметры плазмы и яркость свечения её компонент быстро меняются с изменением расстояния.

Целью настоящей работы являлось исследование с высоким разрешением пространственного распределения интенсивности свечения компонент плазмы разряда с жидким электролитным катодом в воздухе при атмосферном давлении.

В ходе выполнения настоящего проекта были найдены зависимости интенсивности свечения компонент плазмы разряда с жидким электролитным катодом от расстояния до поверхности раствора (время экспозиции 1 с). Полученные зависимости были сопоставлены с данными скоростной цветной фотосъёмки разряда (время экспозиции 125 мкс).

Исследование проводилось на экспериментальной установке, в которой разряд постоянного тока создавался между стержневым металлическим электродом, выполняющим роль анода, и поверхностью раствора, являющуюся катодом. Все исследования проводились при токе разряда 60 мА и расстоянии между электродом и поверхностью раствора 2 мм. В качестве раствора электролита использовался раствор нитрата натрия с концентрацией 10⁻² моль/л. Разряд создавался в проточной разрядной ячейке объёмом 100 мл. Скорость циркуляции раствора через разрядную ячейку составляла 5,5 мл/с.

Для этих условий были получены распределения интенсивности свечения компонент плазмы разряда с жидким катодом: OH – радикалов, молекулярного азота N₂(2+), атомарного водорода H I, атомарного кислорода O I и атомарного натрия Na I.

Показано, что все эти распределения, кроме распределения Na I, имеют локальные максимумы, совпадающие с поверхностью жидкого катода и металлического анода и локальные минимумы на расстоянии ~100 мкм от поверхности раствора.

Распределение же Na I имеет единственный максимум на расстоянии ~70 мкм от поверхности раствора и, как показывают данные скоростной фотосъёмки разряда, является усреднением по большому количеству отдельных «вспышек» свечения Na I, локализованных в разных зонах разряда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

Фиксация атмосферного азота в микроволновых разрядах, поддерживаемых непрерывным миллиметровым излучением гиротронов

The fixation of atmospheric nitrogen in microwave discharges sustained by gyrotron continuous millimeter-wave radiation

Синцов С.В., Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Преображенский Е.И.
Sintsov S.V., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A., Chekmarev N.V., Preobrazhensky E.I.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: sins@ipfran.ru

This study presents the results of two test experiments on atmospheric nitrogen fixation in discharges maintained in the gas flow by continuous electromagnetic radiation of millimeter (24 GHz, 5 kW) and submillimeter (263 GHz, 1.1 kW) wavelength ranges. The results on nitrogen oxide content and energy efficiency of its synthesis were obtained.

Разряд, поддерживаемый в потоке газа непрерывным электромагнитным излучением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, является наименее изученным объектом прикладной физики плазмы. Благодаря последним достижениям в области разработки мощных непрерывных электровакуумных СВЧ генераторов – гиротронов, появилась возможность для поиска приложений ранее недоступного диапазона частот электромагнитного излучения, в том числе в интересах плазмохимии [1, 2].

Использование электромагнитного излучения с частотой 30 – 300 ГГц позволяет создать при атмосферном давлении слабо столкновительную плазму ($\nu_{em} \ll \omega$, где ν_{em} частота электрон-нейтральных столкновений, ω - циклотронная частота), что может обуславливать ряд физических эффектов, влияющих на пространственное распределение электронной плотности в разряде и степень неравновесности его температурных характеристик [3]. Характерной особенностью таких разрядов является формирование плазменных нитей, электронная плотность в которых на несколько порядков может превышать критическое значение для частоты греющего поля [4]. Неоднородное радиальное распределение электронной плотности в филаментах обуславливает сильно локализованное резонансное поглощение энергии СВЧ волны на их периферии, что делает плазменные нити эффективными источниками ионизирующего ультрафиолетового излучения. Под его воздействием вокруг нитей формируется плазменный ореол – область несамостоятельного неравновесного разряда, которая может являться благоприятной неравновесной средой для протекания плазмохимических процессов [2, 3].

В работе представлены результаты двух тестовых экспериментов по фиксации атмосферного азота в разрядах, поддерживаемых в потоке газа непрерывным электромагнитным излучением миллиметрового (24 ГГц, 5 кВт) и субмиллиметрового (263 ГГц, 1.1 кВт) диапазонов длин волн. Реализация процесса Биркеланда-Эйда позволяет синтезировать оксиды азота (NO_x) из смеси азота и кислорода с целью последующего получения азотной кислоты [5].

На экспериментальном стенде «волноводный плазмотрон» [6], построенном на базе технологического гиротрона с частотой излучения 24 ГГц, разряд поддерживался в потоке воздуха (3-15 л/мин) при атмосферном давлении. Максимальное содержание оксидов азота в отработанной плазмообразующей смеси достигало 1.35% при энергозатратах 3 – 6 МДж/моль.

На экспериментальном стенде «гибридный плазмотрон» разряд поддерживался в потоке газовой смеси аргон – воздух (10 – 30 л/мин) при атмосферном давлении сфокусированным излучением гиротрона с частотой 263 ГГц. Степень конверсии кислорода в оксиды азота составляет 18 – 58% при энергоэффективности процесса на уровне 3 – 4%.

Библиографический список

1. Glyavin M. Y., Denisov G. G., Zapevalov V. E., Kuftin A. N., Luchinin A. G., Manuilov V. N., Morozkin M. V., Sedov A. S., Chirkov A. V. // Journal of Communications Technology and Electronics **2014**. Т. 59(8) С. 792.
2. Богатов Н.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. // Физика плазмы **1986**. Т. 12(11). С. 1369.

3. V.B. Gildenburg, S.V. Golubev, E.D. Gospodchikov, S.V. Sintsov, A.V. Vodopyanov // *Physics of Plasmas* **2024**. Т 31(2).
4. Синцов С.В., Водопьянов А.В., Степанов А.Н., Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Преображенский Е.И., Мурзанёв А.А., Ромашкин А.В. // *ЖТФ*. **2023**. Т. 93(1). С. 95.
5. Kelly, S., Vogaerts, A. // *Joule*. **2021**. Т. 5(11). С. 3006.
6. Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, С.В. Синцов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, М.Е. Виктор // *Письма в ЖТФ*. **2023**. Т. 49, С. 15.

Моделирование СВЧ- и лазерно-иницированного СВЧ-разрядов в молекулярных газах

Simulation of microwave and laser-initiated microwave discharges in molecular gases

Сайфутдинов А.И., Кустова Е.В.*
Saifutdinov A.I., Kustova E.V.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, E-mail: as.uav@bk.ru

*Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9,
E-mail: elena_kustova@mail.ru

Self-consistent models of microwave and laser-initiated microwave discharges are presented. The transition from the diffuse form of the microwave discharge to the filamented (thread-like) form has been demonstrated. A comparative analysis of numerical calculations with experimental data was carried out.

В данной работе представлены результаты численных расчетов динамики плазмы в СВЧ-разряде в азоте и в воздухе по условиям экспериментов из [1-2].

В основу модели положены уравнения баланса заряженных и возбужденных частиц, уравнения баланса энергии электронов и тяжелой компоненты плазмы, а также система уравнений Максвелла для описания электромагнитного поля СВЧ [3,4]. Для описания СВЧ-разряда в азоте был рассмотрен комплекс реакций из [5]. Для описания разряда в воздухе учитывался набор элементарных процессов из работы [6], дополненный [7]. Кроме того, в модели учитывалось уравнение баланса колебательной энергии азота, а кинетика элементарных процессов включала механизмы быстрого нагрева газа [7] и колебательно-поступательной релаксации. Скорости неупругих процессов с участием электронов определялись с использованием максвелловской ФРЭ и ФРЭ, полученной в рамках локального кинетического уравнения Больцмана.

В результате численных расчетов представлена динамика пробоя СВЧ-разряда и его удлинения вдоль осциллирующего электрического поля.

Продемонстрирован переход от диффузной формы СВЧ-разряда к филаментированной (нитевидной) форме. Проведен сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00241, <https://rscf.ru/project/23-19-00241/>

Библиографический список

1. Vikharev A.L., et al. *Plasma Phys. Rep.* **18** (1) (1992)
2. Brovkin V.G. and Vedenin P.V., *J. Appl. Phys.* **128**, 113301 (2020).
3. Saifutdinov A. I. and Kustova E. V. *J. of Applied Physics*, **129** 023301 (2021)
4. Saifutdinov A., Kustova E. // *Plasma Sources Science and Technology*, **32** 125010 (2023)
5. Akishev Yu. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 215202 (2010)
6. Zhu Y. and Starikovskaia S. *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 124007 (2018)
7. Popov N. A. *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 044003 (2016).

Напряженность электрического поля на боковой поверхности катода в тлеющем разряде атмосферного давления в гелии

Electric field strength on the side surface of the cathode in a glow discharge in helium at atmospheric pressure

Иванова П.А., Казак А.В., Симончик Л.В., Томкович Н.В.

Ivanova P.A., Kazak A.V., Simonchik L.V., Tomkovich N.V.

Институт физики НАН Беларуси, 220072, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68

E-mail: p123456ivanova@yandex.by

Formation of the recorded polarization contours through the entire cathode layer of the σ - Stark components of the helium line He I 492,2 nm is studied. The electric field strength and distribution on the side surface of the cathode in the atmospheric pressure glow discharge in helium at continuous current is determined.

Тлеющий разряд атмосферного давления (ТРАД) на постоянном токе является простейшим источником для создания неравновесной плазмы атмосферного давления. В работе рассмотрен случай нормального самостоятельного ТРАД в гелии [1], когда поперечные размеры отрицательного свечения значительно превосходят диаметр катода и свечение распространяется на его боковую поверхность. Параметры эксперимента: стержневой медный катод диаметром 9 мм, разрядный промежуток 5 мм, расход гелия около 1 л/мин, сила тока разряда 1 А.

Регистрация контуров линии HeI 492,2 нм, образованных штарковскими σ -компонентами, проводилась перпендикулярно касательной к поверхности катода.

Расчет контуров выполнялся с использованием численных массивов данных для смещений и интенсивностей штарковских σ -компонент в зависимости от напряженности электрического поля [2]. Так как регистрируемое излучение будет суммарным по всей толщине области катодного падения потенциала, поэтому производилось суммирование контуров при изменении напряженности от 0 до E_0 , где E_0 – напряженность поля у поверхности катода. Распределение

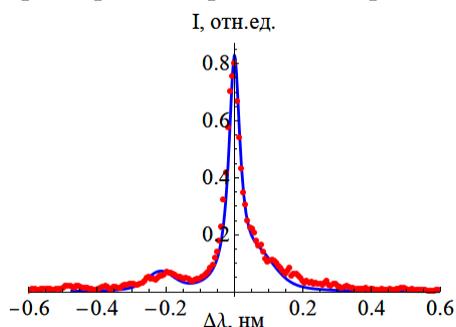


Рис.1 Рассчитанный (сплошная кривая) и экспериментальный (кружки) контуры линии HeI 492,2 нм.

напряженности электрического поля в катодном слое предполагалось линейным.

Соответствие расчетного и экспериментального контуров (Рис.1) достигалось подбором трех параметров: величин постоянной (E_0) и флуктуирующей (E_{-}) составляющих напряженности электрического поля, а также амплитуды несмещенной составляющей контура линии.

Полученное распределение напряженности электрического поля вдоль боковой поверхности стержневого катода представлено на Рис. 2. Видно, что напряженность поля уменьшается практически линейно по мере удаления от разрядного промежутка. Производится сравнение с результатами параметров области катодного падения в случае плоского катода.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ Ф24МП-017.

Библиографический список

1. Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Ya.A., Simonchik L.V., Zgrouski S.M. // *Plasma Sources Sci. Technol.* **2009**. Vol.18, №4.
2. Arkhipenko V.I., Zgrouskii S.M., Konjevic N., Kuraica M.M., Simonchik L.V. // *J. Appl. Spectrosc.* **2000**. Vol. 60, №5.
3. Kuraica M.M., Konjevic N., Videnovic I. R. // *Spectrochim. Acta. Pt. B.* **1997**. Vol. 52, №6.

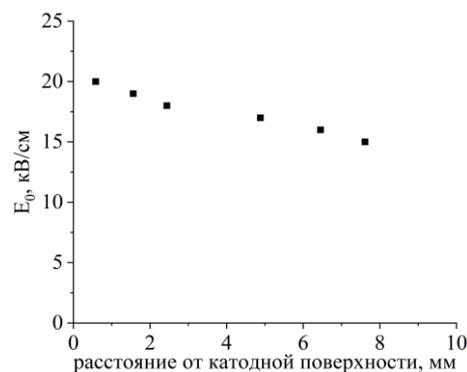


Рис.2 Распределение напряженности электрического поля вдоль боковой поверхности катода

Разложение углекислого газа в СВЧ разрядах, поддерживаемых излучением с частотами 2.45 и 24 ГГц

Decomposition of carbon dioxide in microwave discharges supported by radiation with frequencies of 2.45 and 24 GHz

**Водопьянов А.В.^{1,2}, Мансфельд Д.А.¹, Чекмарев Н.В.¹, Синцов С.В.^{1,2},
Преображенский Е.И.¹**

Vodopyanov A.V. Mansfeld D.A. Chekmarev N.V. Sintsov S.V.1, Preobrazhensky E.I.

¹*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.*

²*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23.*

E-mail: avod@ipfran.ru

The work provides a detailed comparison of the plasma-chemical decomposition of carbon dioxide in two types of atmospheric pressure microwave discharge with heating by radiation with frequencies of 2.45 GHz and 24 GHz.

Задача плазмохимического разложения углекислого газа является одной из самых актуальных задач плазмохимии в мире [1]. Одним из возможных перспективных способов утилизации углекислого газа является конверсия углекислого газа в монооксид углерода и молекулярный кислород в СВЧ разрядах атмосферного давления. Монооксид углерода является ценным сырьем для химической промышленности.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований конверсии углекислого газа в двух экспериментальных установках, в основе которых лежат разряды атмосферного давления с нагревом СВЧ излучением с частотами 2.45 ГГц и 24 ГГц. В первом случае используется традиционная схема организации разряда с волноводом [2]. Для создания и нагрева плазмы использовался магнетрон с контролем отраженной волны и максимальной мощностью 3 кВт. Во втором случае использовался волноводный плазмотрон собственной разработки [3]. В этом плазмотроне СВЧ нагрев осуществлялся с помощью непрерывного электромагнитного излучения технологического гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. Измерения химического состава продуктов реакции проводились с помощью газоанализатора с оптическими ячейками CO₂, CO O₂, а также отбирался ряд проб для контроля методами ИК-Фурье и хромато-масс спектрометрии [4].

В работе подробно обсуждаются зависимости степени конверсии углекислого газа и энергоэффективности от потока газа и вкладываемой мощности для обеих схем организации разряда. Характер зависимостей конверсии CO₂ от мощности и потоков газа позволяет выявить главные факторы, влияющие на протекающие плазмохимические процессы.

Библиографический список

1. R. Brandenburg et al. // *Plasma Process. Polym.* **2019**. V. 16. N. 1. P. 1.
2. M. Moisan and Z. Zakrzewski // *J. Phys. D. Appl. Phys.* **1991**. V. 24. N. 7, P. 10.
3. Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, С.В. Синцов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, М.Е. Виктор // *Письма в ЖТФ* **2023**. Т. 49. В. 1. С. 39.
4. N.V. Chekmarev, D.A. Mansfeld, A.V. Vodopyanov, S.V. Sintsov, E.I. Preobrazhensky, M.A. Remez // *J. CO₂ Util.* **2024**. , V. 82. P. 102759.

Пространственное распределение температуры тлеющего разряда атмосферного давления в гелии со стержневым катодом

Spatial distribution of temperature of an atmospheric pressure glow discharge in helium with a rod cathode

Томкович Н.В., Казак А.В., Иванова П.А., Рафатов И.*, Симончик Л.В.

Tomkavich M.U., Kazak A.V., Ivanova P.A., Rafatov I., Simonchik L.V.,

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,

220072, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 68-2, E-mail: m.tomkavich@ifanbel.bas-net.by

**Физический факультет Средневосточного технического университета,*

06800, Турция, г. Анкара, бульвар Думлупынар, 1/6, E-mail: rafatov@metu.edu.tr

The temperature distribution of an atmospheric pressure glow discharge at direct current in the discharge gap and on the side surface of the rod (non-planar) cathode has been determined. Parameters of cathode fall layer in different paths of rod cathode was tested on corresponding to scaling laws.

Тлеющий разряд атмосферного давления (ТРАД) на постоянном токе в гелии зажигался в герметичной камере [1]. В эксперименте использовался стержневой (неплоский) неохлаждаемый медный катод. Его диаметр составляет 9 мм, а длина до держателя 10 мм. Вид разряда при разрядном токе 1 А и разрядном промежутке ~ 4 мм представлен на Рис. 1, а. Температура газа T_g определялась с использованием разрешенной колебательно-вращательной полосы электронного перехода молекулярного иона азота $(0,1) N_2^+ (B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$ [1].

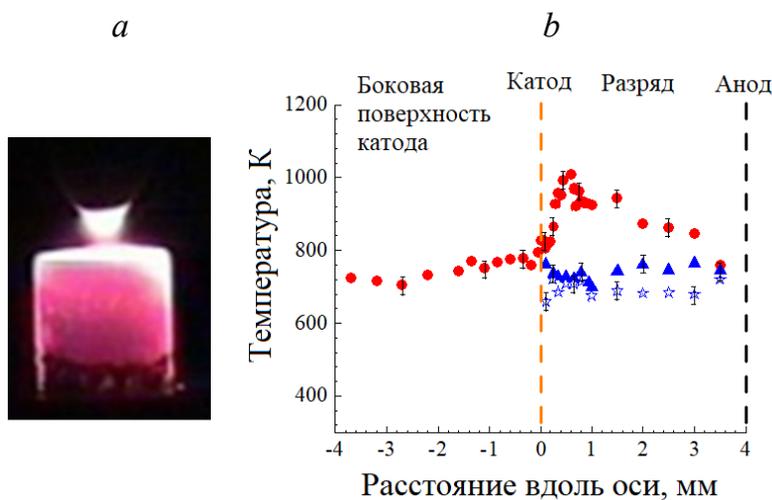


Рисунок 1 – Фото (а) и распределение температуры газа в разряде (b) вдоль оси (кружки), на удалении от оси 2.2 мм (треугольники) и 4.4 мм (звезды).

Распределение температуры газа (Рис. 1, b) приблизительно соответствует представленному в работе [2]. Максимум температуры на расстоянии от поверхности катода около 0,5-0,6 мм обусловлен потоком тепла из контрагированного положительного столба в область катодного падения потенциала, что приводит к его увеличению. Это, в свою очередь, ведет к несоответствию параметров области катодного потенциала на оси разряда законам подобия. Из-за высокой теплопроводности меди (материал катода) температура газа вдоль поверхности катода со стороны разрядного промежутка изменяется незначительно и параметры области катодного потенциала на ее

периферии соответствуют законам подобия.

На боковой поверхности катода температура газа составляет около 800 К вблизи плоской поверхности катода. Она уменьшается при удалении на 4 мм от разрядного промежутка до 700 К. Параметры области катодного падения потенциала здесь также соответствуют законам подобия.

Полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с результатами расчета в рамках численной модели [2] для условий данного эксперимента.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов БРФФИ Ф24МП-017 и НАН Беларуси №2024-25-122.

Библиографический список

1. В.И. Архипенко [и др.] // *Спектроскопия плазмы и природных объектов* **2007**. С. 10–66.
2. L. Simonchik [et al.] // *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** (2024) 025014.

Комбинированный и СВЧ разряды в высокоскоростных газовых потоках

Combined and Microwave discharges in high-speed gas flows

Корнев К.Н., Двинин С.А., Логунов А.А., Сурконт О.С., Абушаев Т.Р., Волынец А.Л.

Kornev K.N., Dvinin S.A., Logunov A.A., Surkont O.S., Abushaev T.R., Volynets A.L.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет; 119991, ГСП-1, г. Москва,

Ленинские горы, д.1, с.2, E-mail: singuliarnost@yandex.ru

The work experimentally studied a combined discharge and microwave (2.45 GHz) discharges created on initiators of various shapes placed in high-speed (150-250 m/s) air and propane-air flows. Using high-speed video imaging and optical emission spectroscopy methods, the main discharge and plasma parameters were determined: discharge structure, electron concentration and temperature, vibrational and rotational temperatures of the gas. The possibility of using microwave discharges and a combined discharge to ignite propane-air flows has been experimentally demonstrated. K. N. Kornev acknowledges the support of the Theoretical Physics and Mathematics Advancement Foundation "BASIS." This research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-22-00233.

Для задач плазменной аэродинамики на протяжении последних лет активно исследуются различные разряды в высокоскоростных газовых потоках, в том числе реакционно-способных. Необходимость детального изучения физико-химических механизмов воздействия низкотемпературной плазмы разрядов на высокоскоростные потоки обуславливает актуальность проводимых исследований [1]. В работе экспериментально изучен комбинированный разряд и СВЧ разряды, создаваемые на инициаторах различной формы, помещаемых в высокоскоростные (150-250 м/с) воздушные и пропан-воздушные потоки. Разряды организованы по схеме СВЧ плазмотрона: аэродинамический канал врезался в волновод перпендикулярно его широкой стенке [2]. Использовался магнетронный источник с частотой 2.45 ГГц, рассчитанный для работы на мощностях до 5 кВт в непрерывном режиме. Для создания комбинированного разряда дополнительно применялся высоковольтный источник постоянного тока с максимальным напряжением 4.5 кВ и максимальным током 20 А. Структура разрядов регистрировалась с помощью высокоскоростной видеосъемки. Оптический спектр в видимой и ближней УФ области регистрировался спектрометром OceanOptics. При анализе спектров определялись основные параметры плазмы разрядов: концентрация и температура электронов, колебательная и вращательная температуры газа [3].

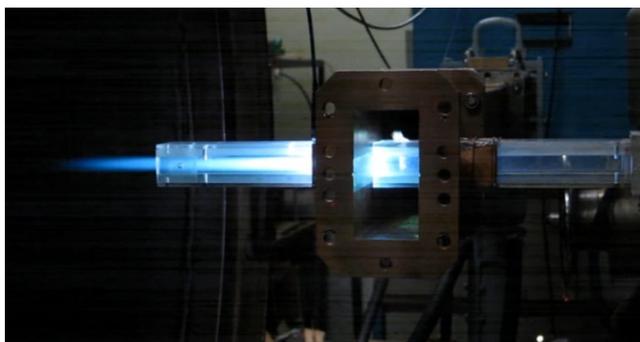


Рис.1. Фотография воспламененного СВЧ разрядом пропан-воздушного потока.

Экспериментально показана зависимость структуры СВЧ разряда от параметров потока: давления в потоке и его скорости. Для СВЧ разряда, инициируемого прямым полуволновым вибратором, измерена концентрация электронов $n_e \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а также установлено, что плазма находится в состоянии близком к равновесному. Измерены пороги пробоя СВЧ разряда на кольцевых инициаторах. Экспериментально показана возможность применения СВЧ разрядов и комбинированного разряда для воспламенения пропан-воздушных потоков (см. рис.1).

Корнев К.Н. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» и благодарит его за финансовую поддержку. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00233.

Библиографический список

1. I Adamovich et al 2022 J. Phys. D: Appl. Phys. 55 373001
2. Yu A Lebedev 2015 Plasma Sources Sci. Technol. 24 053001
3. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М. Физматлит, 2006.

Влияние запертых самопоглощением линий желтого дублета натрия на спектры разрядов, инициируемых в порошковых смесях импульсами излучения мощного гиротрона

Effect of the lines of the yellow doublet of sodium trapped by self-absorption on the spectra of discharges initiated in powder mixtures by the microwave radiation pulses of a powerful gyrotron

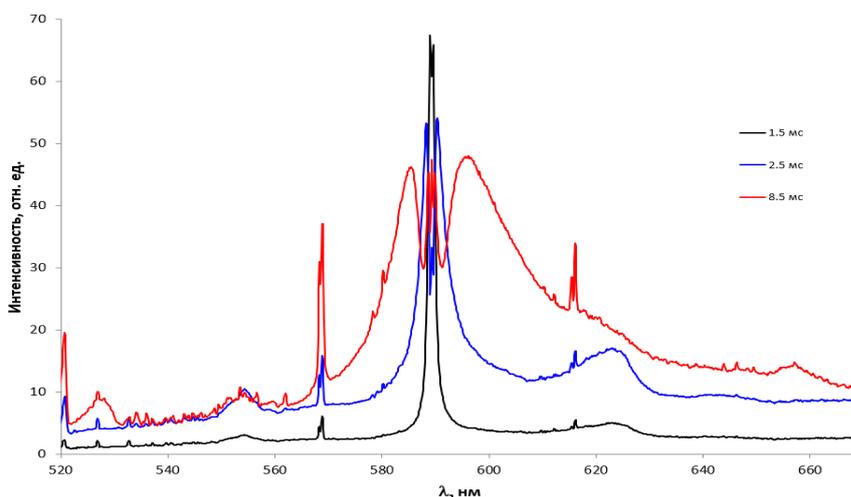
Летунов А.А., Логвиненко В.П., Воронова Е.В., Князев А.В., Борзосеков В.Д.,
Гудкова В.В., Степахин В.Д.

*Letunov A.A., Logvinenko V.P., Voronova E.V., Knyazev A.V., Borzosekov V.D., Gudkova V.V.,
Stepakhin V.D.*

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, г. Москва,
ул. Вавилова, 38, e-mail: let@fpl.gpi.ru*

В докладе приведены и обсуждаются спектры в окрестностях желтого дублета Na I при его сильном самообращении в экспериментах по синтезу микро- и наночастиц в микроволновом разряде. Разряды инициировались импульсами излучения мощного гиротрона ($\lambda = 4$ мм, $t = 8$ мс, $P = 400$ кВт) в тонких слоях порошковых смесей со свободной верхней поверхностью. При содержании натрия ~1% при разрешении 0.01 – 0.02 нм было обнаружено, что резонансное излучение оказывается эффективно запертым в интервале несколько сотых нм. Это приводит к росту спектральной плотности энергии внутри разряда в этом спектральном интервале на много порядков по сравнению с пьедесталом вблизи запертого излучения, регистрируемым в области дублета. При этом возникают особенности спектров, не наблюдавшиеся ранее в смесях со следовыми концентрациями натрия. Доклад посвящен описанию обнаруженного явления.

Обзорный спектрометр с разрешением ~0.2 нм, свет в который собирался из области в паре сантиметров над исходной поверхностью порошка регистрировал последовательности спектров в каждом микроволновом импульсе. На рисунке представлены три последовательных спектра, снятые с разными задержками от старта гиротрона. В них, кроме атомных линий и пьедестала запертого излучения, видны спутники, которые можно интерпретировать, как стоковые и антистоковые линии комбинационного рассеяния (КР), связанные с колебаниями основного электронного состояния некоторой молекулы с колебательной энергией около 1000 см⁻¹. Однако не всё в регистрируемых спектрах вписывается в такую модель (верхний спектр).



Регистрируемые нами спектры являются результатом пространственного усреднения. Спектры КР связаны с заселенностью близких к основному, а не возбужденных состояний, как при испускании. Связанные с усреднением вопросы можно было бы снять, взяв достаточно мощный лазер и сняв с ним спектр КР с пространственным разрешением. Но тогда надо решить сложную задачу подавления паразитного рассеяния, что совсем не просто сделать на реальной установке.

Высокочастотный индукционный плазмотрон для плазмохимических процессов. Определение конструктивных параметров

High-frequency induction plasma torch for plasma chemical processes. Calculation of design parameters

Петренко П.И., Артемов А.В., Вошинин С.А., Переславцев А.В.

Petrenko P.I., Artemov A.V., Voschinin S.A., Pereslavitsev A.V.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 123182 Россия,

Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

e-mail: petrenko_pi@nrcki.ru

An analytical study of the physical regularities of a high-frequency discharge induction in HF plasma torch has been carried out. A sequence has been developed for calculating the design parameters of HF plasma torches for specified values of operating power and gas consumption for operation at atmospheric pressure.

Выполнено аналитическое исследование физических закономерностей высокочастотного разряда в высокочастотном индукционном (ВЧИ) плазмотроне. Разработана последовательность расчёта конструктивных параметров ВЧИ плазмотронов на заданные величины рабочей мощности и расхода газа для работы при атмосферном давлении.

Расчёт носит оценочный характер, он позволяет выбрать геометрические параметры плазмотрона для дальнейшей разработки конструкции.

В качестве примера зададимся исходными данными:

- Рабочий газ – воздух;
- Рабочая частота – 13,56 МГц;

Результаты расчёта:

- Длина газоразрядной камеры – 10 – 15 см;
- Радиус – 2,5 см (внутренний радиус разрядной трубки);
- Индуктор (витки) – 20;
- Ток – 15 А;
- Потребная мощность источника питания 15 кВт;
- Наибольший расход рабочего газа – 0,3 – 1 г/с.

Необходимость проведения плазмохимических процессов без влияния примесей продуктов распыления металлических электродов требует использования ВЧИ плазмотронов.

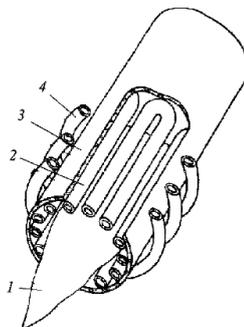


Схема ВЧИ плазмотрона с водоохлаждаемой разрядной камерой: 1 - плазменный факел, 2 - секция камеры, 3 – кварцевый корпус, 4 –индуктор.

Работа выполнена в рамках прикладных исследований в области физики и химии низкотемпературной плазмы», выполнявшейся в соответствии с приказом НИЦ «Курчатовский институт» №101 от 20.01.2023.

Библиографический список

1. Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. – М.: Наука. Физматлит. 1992. 537 с.
2. Райзер Ю.П. Высокочастотный индукционный разряд высокого давления и безэлектродный плазмотрон. Успехи физических наук. 1969. декабрь. Том 99. вып.4. С. 687 – 712.

Получение водородосодержащей плазмы и возможности ее применения в лабораторной плазмохимической установке

Hydrogen-containing plasma production and the possibility of its usage in a laboratory plasma-chemical installation

Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б.

Kuznetsov V.E., Dudnik Yu.D., Safronov A.A., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B.

ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,

191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб. д.18,

e-mail: rc@iperas.nw.ru, julia_dudnik-s@mail.ru

The paper considers the usage of hydrogen and a mixture of hydrogen-containing gases in the arc discharge plasma of alternating current plasma torches in the production of carbide powder in a laboratory plasma-chemical installation.

Практический интерес к использованию водорода как универсального энергоносителя обусловлен рядом преимуществ, главные из которых: высокая теплопроводность, высокая удельная теплота сгорания, экологическая безопасность и др. При этом средняя теплопроводность водорода практически на два порядка превышает теплопроводность воздуха, что положительно сказывается на плазмохимических процессах для нужд металлургии, при нанесении покрытий, получении тугоплавких порошков и карбидных материалов, конверсии углеводородов [1, 2].

Несмотря на некоторые сложности работы с водородом, к которым можно отнести его взрывоопасность, летучесть, способность диффундировать через металлы, высокую реакционную способность, в ИЭЭ РАН был создан экспериментальный образец электродугового плазматрона переменного тока, который позволяет использовать в качестве плазмообразующего газа водород и метан, отдельно и в виде смеси. В ходе исследований плазматрона установлены следующие рабочие параметры: мощность 4-10 кВт, расход рабочих газов - водород до 1 г/с, метан до 0.5 г/с. Получены характерные осциллограммы токов и напряжений, динамические вольт-амперные характеристики, позволяющие определить величины пиков зажигания и погасания электрической дуги, мощность плазматрона и судить об эффективности процессов теплообмена.

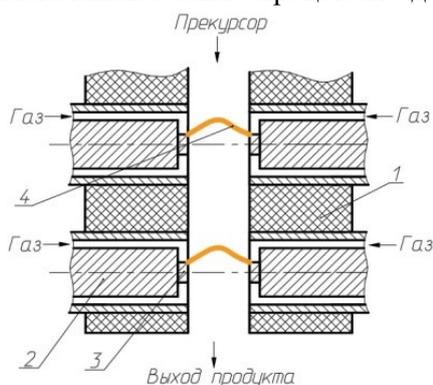


Рисунок 2 - Принципиальная схема:
1 - реактор, 2 - электродный блок, 3 - наконечник, 4 - электрическая дуга.

теплообмена.

На базе этого плазматрона создана плазмохимическая лабораторная установка, она включает в себя два плазматрона переменного тока мощностью до 10 кВт, расположенных друг под другом относительно подачи прекурсора.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема подачи обрабатываемого материала относительно расположения электродуговых каналов. На установке был выполнен цикл экспериментов, полученный материал был проанализирован методами рентгенофазовой дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии. В ряде экспериментов зафиксировано наличие карбида вольфрама, оцененный размер частиц составил 5-20 мкм.

Продемонстрирована возможность применения такой установки в процессах получения карбидных материалов. В целом, результаты проведенного комплекса исследований позволяют сделать вывод о перспективах применения электродуговых плазматронов в плазмохимических технологиях.

Библиографический список

1. Vasiliev I.V., Ostapchuk S.S., Alekseeva Yu.V. // *Actual Problems of Oil and Gas* **2019**. Is. 4(27).
2. Фатеев В.Н., Порембский В.И., Григорьев С.А., Баранов И.Е., Островский С.В., Коробцев С.В., Денисенко В.П., Николаев И.И., Кириллов И.А., Демкин С.А., Смирнов Р.В. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики* **2021**. Т. 23(2). С. 128-148.

Сравнительный анализ результатов глобального и двумерного осесимметричного моделирования параметров ВЧИ-разряда в парах йода

Comparative analysis of the results of global and two-dimensional axisymmetric modeling of ICP discharge parameters in iodine vapor

Сайфутдинова А.А., Сайфутдинов А.И.

Saifutdinova A.A., Saifutdinov A.I.

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева - КАИ

420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, E-mail: aliya_2007@list.ru, as.uav@bk.ru

In this work, within the framework of a global model and a two-dimensional axisymmetric model, numerical studies of the dynamics of iodine plasma formation in ICP discharge, which is the working chamber of modern plasma engines, were carried out. Calculations were carried out for various values of input power. It is shown that at short times an ion-ion plasma with dominant particles and is formed, and at times from several fractions to several milliseconds a transition occurs from ion-ion to electron-ion plasma with a dominant atomic iodine ion.

В данной в рамках глобальной (нульмерной) модели и двумерной осесимметричной модели проведены численные расчеты ВЧИ-разряда в парах йода. Был рассмотрен достаточно подробный набор плазмохимических реакций в йоде, учитывающий образование атомарного и молекулярного положительных ионов йода и отрицательного иона в йоде, 4 возбужденных атомарных уровня и один молекулярный [1-4]. Были проведены параметрические численные исследования основных характеристик плазмы в йоде в диапазоне давлений от 1 до 10 Па и в диапазоне вкладываемой мощности от 50 до 1500 Вт.

В рамках обеих моделей было получено достаточно хорошее согласие по кинетике частиц плазмы. Показано, что в случае малой мощности менее 100 Вт и давлениях от 3 Па в рабочей камере может генерироваться ион-ионная плазма. При увеличении вкладываемой мощности наблюдается увеличение скоростей диссоциации молекулярного иона и тем самым генерируется классическая электрон-ионная плазма. Для различных значений вкладываемой мощности представлены динамические зависимости установления основных параметров плазмы при давлении 2.6 Па. Показано, что на малых временах формируется ион-ионная плазма, а на временах от нескольких долей до единиц миллисекунд происходит переход от ион-ионной к электрон-ионной плазме. Результаты численных расчетов могут быть использованы в плазмохимических приложениях и в создании современных электрических ракетных двигателей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00276, <https://rscf.ru/project/23-21-00276/>

Библиографический список

1. Niu X., Li X., Liu H., and Yu D. // *The European Physical Journal D*. **73** P. 1-8 (2019)
2. Mazouffre S. // *Plasma Sources Science and Technology*. **25** 3 P. 033002 (2016)
3. Levko D., Raja L. L. // *Journal of Applied Physics*. **130** 17 (2021)
4. Ambalampitiya, H. B., Hamilton, K. R., Zatsarinny, O., et al // *Atoms*. **9** 4 P. 103. (2021)

Опτικο-спектральный контроль процессов плазмохимического травления кремния в среде тетрафторметана

Optical-spectral control of the plasma-chemical etching processes of silicon in a tetrafluoromethane

Чесноков И. А., Мурин Д. Б.

Chesnokov I. A., Murin D. B.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: dim86@mail.ru*

The emission spectra of a direct current glow discharge in a tetrafluoromethane environment during silicon etching were obtained and analyzed. It is shown that the discharge radiation is represented by atomic and molecular components; it is assumed that the dependences of the intensities of lines and bands on the external conditions of the discharge are determined by the excitation of emitting states during direct electron impacts.

Низкотемпературная газоразрядная плазма фторсодержащих газов, в том числе и тетрафторметана (CF_4), в настоящее время активно применяется в процессах плазмохимического и реактивно-ионного травления поверхности полупроводниковых пластин и функциональных слоев интегральных микросхем. Одним из основных методов контроля плазменных процессов является оптическая эмиссионная спектроскопия. Данный метод является невозмущающим, так как прямого контакта с плазмой не происходит, прост в реализации и основан на регистрации излучения плазмы в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Основной сложностью применения данного метода является точная идентификация спектра излучения исследуемого плазмообразующего газа, установление механизмов образования и гибели излучающих состояний частиц и неоднозначная взаимосвязь измеряемых интенсивностей излучения и концентраций соответствующих частиц в основном состоянии. Целью данной работы является: 1) анализ спектров излучения тлеющего разряда постоянного тока тетрафторметана (CF_4) при травлении кремния; 2) исследование влияния внешних параметров разряда на интенсивности основных излучательных состояний; 3) предложение методов контроля кинетики и определения моментов начала и окончания процессов травления по излучению активных частиц и продуктов взаимодействия.

Для экспериментального исследования взаимодействия плазмы тетрафторметана с кремнием в условиях тлеющего разряда постоянного тока использовался стеклянный проточный плазмохимический реактор цилиндрической формы (внутренний диаметр 3.4 см, длина зоны разряда 40 см). Внешними параметрами разряда выступали ток разряда (5–75 мА), давление (20–200 Па) и расход (2–8 см³/сек при нормальных условиях) плазмообразующего газа. Тетрафторметан набирался в хлорвиниловую емкость, откаченный до давления ~ 1 Па, из металлического баллона с маркой "чистый". Давление и расхода газа контролировались U-образным масляным манометром и капиллярным реометром. Для травления использовались фрагменты полированных пластин кремния n-типа (средняя площадь 1 см², толщина 400 мкм). Образцы располагались в области положительного столба разряда под плавающим потенциалом, температура образца контролировалась по температуре подложкодержателя. Эмиссионные измерения были реализованы непосредственно с использованием плазмохимического реактора с помощью спектрометров фирмы Avantes AvaSpec, рабочий интервал длин волн 200-950 нм.

Перед исследованием кинетики травления кремния, нами были получены спектры излучения тлеющего разряда тетрафторметана. В спектрах излучения были зафиксированы группа линий атомарного фтора в области 620-780 нм. Излучение атомарного углерода представлено двумя линиями с длинами волн 918 и 960 нм. Излучение молекулярных компонентов представлено полосами CF , CF_2 , CF_3 , CO , F_2 . Излучение молекул углерода представлено системами полос Свана и Филипса (максимум на длине волны 789 нм). Переходя к анализу спектров излучения тетрафторметана при травлении кремния, кроме ранее обнаруженных линий и полос характерных для плазмы «чистого» CF_4 , были обнаружены группы линий атомарного кремния, а также полосы химических соединений кремния с фтором. К сожалению, последние не удалось проанализировать из-за их слабо интенсивности [1].

Библиографический список

1. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. М.: Изд. иностр. лит, 1949. 540 с.

Эмиссионные спектры дифтордихлорметана при травлении арсенида галлия

Emission spectra of difluorodichloromethane during etching of gallium arsenide

Гоголев И. А., Мурин Д. Б.

Гоголев И. А., Murin D. B.

*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: dim86@mail.ru*

The emission spectra of a direct current glow discharge in a difluorodichloromethane environment during gallium arsenide etching were obtained and analyzed. It is shown that the discharge radiation is represented by atomic and molecular components; it is assumed that the dependences of the intensities of lines and bands on the external conditions of the discharge are determined by the excitation of emitting states during direct electron impacts.

Одним из ключевых этапов в технологии производства современных интегральных микросхем является плазмохимическое травление. Традиционно в качестве плазмообразующих сред использовались фтор- или хлорсодержащие газы, но с развитием микроэлектроники и внедрением новых материалов в технологические процессы, инженеры стали использовать более сложные газовые системы. Можно отметить, что в таких системах реализуется комплексное воздействие плазмы на обрабатываемый материал – физическое и химическое взаимодействия, за счет сложного химического состава газов и наличия нескольких сортов частиц. Последнее в свою очередь позволяет достигать дополнительных эффектов при травлении ряда материалов, не проявляемых в простых плазмообразующих газах. Это эффект представляет большой технологический интерес, т.к. открывает возможности гибкой настройки и оптимизации выходных параметров процесса. Отметим также, что одним из самых эффективных методов контроля плазмохимического травления является оптическая эмиссионная спектроскопия. Целью данной работы является: 1) анализ спектров излучения тлеющего разряда постоянного тока дифтордихлорметана (CCl_2F_2) при травлении арсенида галлия; 2) исследование влияния внешних параметров разряда на интенсивности основных излучательных состояний.

Исследование взаимодействия тлеющего разряда постоянного тока дифтордихлорметана с арсенидом галлия проводилось на проточном плазмохимическом реактор. В качестве варьируемых параметров выступали: время обработки, ток разряда, давление плазмообразующего газа, температура образца. Дифтордихлорметан набирался в хлорвиниловую емкость, откаченный до давления ~ 1 Па, из металлического баллона с маркой "чистый". Давление и расхода газа контролировались U-образным масляным манометром и капиллярным реометром. Для травления использовались очищенные фрагменты полированных пластин арсенида галлия n-типа (площадь образцов 1 см^2). Образцы арсенида галлия площадью 1 см^2 помещались на уровень стенки реактора на столик в области положительного столба разряда. Нагрев подложкодержателя осуществлялся вольфрамовой спиралью, соединенной с регулируемым источником питания, позволяющим устанавливать нужную температуру образца. Температура образца контролировалась с помощью медь-константановой термопары и термопары лазерного пирометра фирмы Местек. Спектральные измерения были реализованы с помощью спектрометров фирмы Avantes AvaSpec, рабочий диапазон длин волн 200-1000 нм.

В спектрах излучения дифтордихлорметана были зафиксированы слабоинтенсивная группа линий атомарного фтора в области 620–760 нм. Две группы атомарного хлора, менее интенсивные в сине-зеленой части спектра 430–460 нм, и более интенсивные в красной области 700–900 нм. Излучение атомарного углерода представлено слабоинтенсивной линией 247 нм. Излучение молекулярных компонентов представлено полосами CF , CF_2 , CF_3 , F_2 , Cl_2 , CCl . Излучение молекул углерода представлено системами полос Свана, высокого давления и Деландра. Также были обнаружены группы линий атомарного галлия, мышьяка, а также слабоинтенсивные полосы химических соединений галлия и мышьяка с фтором и хлором [1].

Библиографический список

1. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. М.: Изд. иностр. лит., 1949. 540 с.

Исследование плазмы ВЧЕ-разряда в токе метана

Study of capacitively coupled plasma in methane flow

Гарифуллин А.Р., Шаехов М.Ф.

Garifullin A.R., Shaekhov M.F.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, E-mail: office@kstu.ru*

The spectra of capacitively coupled plasma in methane flow were studied at various values of discharge power, gas flow and pressure in the CCP reactor. Plasma components and their radiation intensities have been determined under different reactor operating modes.

Процессы получения водорода путем конверсии углеводородов весьма распространены. Помимо традиционных технологий для конверсии углеводородов можно использовать плазму источником которой являются различные виды электрических разрядов. При такого рода процессах в рабочем объеме образуются свободные электроны, радикалы, возбужденные молекулы, которые способны, подобно катализаторам, инициализировать реакционно-цепной механизм конверсии углеводородов.

Для изучения механизмов плазмохимических реакций, происходящих в системе, важно определить компоненты, присутствующие в плазме. Для этой цели хорошо применим оптико-эмиссионный спектральный анализ излучающей плазмы. В ходе данной работы были получены и проанализированы оптико-эмиссионные спектры плазмы ВЧЕ-разряда в потоке метана при различных значениях расхода газа, давления в реакторе и мощности разряда.

В исследуемых спектрах были определены ряд компонентов такие как, CH ($\text{B}^2\Sigma^- \rightarrow \text{X}^2\Pi$) (387,8 нм), CH ($\text{A}^2\Delta \rightarrow \text{X}^2\Pi$) (431,0 нм), $\text{H}\gamma$ (434,7 нм), $\text{H}\beta$ (486,2 нм), $\text{H}\alpha$ (656,6 нм). Также в результате обработки спектров были получены отношения интенсивностей излучения компонентов для сравнения различных режимов плазмы.

Определено, что при большей мощности разряда интенсивность излучения атомарного водорода $\text{H}\alpha$ значительно увеличивается по отношению к интенсивности излучения частицы CH (переход $\text{A}^2\Delta \rightarrow \text{X}^2\Pi$), что согласуется с большим выходом водорода при больших мощностях плазмы. А отношение интенсивности излучения $\text{H}\beta$ и $\text{H}\gamma$ к CH ($\text{A}^2\Delta \rightarrow \text{X}^2\Pi$) при этом, напротив, уменьшается. Отношение излучения $\text{H}\alpha$ к $\text{H}\beta$ при больших мощностях также увеличивается, что свидетельствует об увеличении электронной температуры плазмы.

Библиографический список

1. Bai, Nan; Huang, Bangdou; Liu, Yadi; Zhang, Cheng; Shao, Tao. Reaction mechanism in non-thermal plasma enabled methane conversion: correlation between optical emission spectroscopy and gaseous products.// *Journal of Physics D Applied Physics*, Volume 54 (42): 17 – Oct 21, 2021.
2. Mohammad Salehi, Parnia Bastani, Loghman Jamilpanah, Abbas Madani, Seyed Majid Mohseni. Low defect and high electrical conductivity of graphene through plasma graphene healing treatment monitored with in situ optical emission spectroscopy.// *Sci Rep* **11**, 20334 (2021).
3. C. Gomez-Aleixandre, O. Sanchez, A. Castro, and J. M. Albella. Optical emission characterization of CH_4+H_2 discharges for diamond deposition. *J. Appl. Phys.* 74, 3752 (1993).

Влияние подводного диафрагменного разряда на агрегацию частиц меди в водном коллоидном растворе

Effect of an underwater diaphragm discharge on the aggregation of copper particles in an aqueous colloidal solution

Шабанова А.А., Ситанов Д.В.*

Shabanova A.A., Sitanov D.V.

Ивановский государственный химико-технологический университет

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 7, E-mail: anya.shabanova.2018@mail.ru;

*sitanov@isuct.ru**

The work is based on the assumption that the chemical and biological activity of small particles depends on the size of these particles. Thus, the initially high activity of materials in nanoform should decrease as particles aggregate in colloidal solutions. The work shows that under the influence of an underwater diaphragm discharge it is possible to destroy surfactant molecules, thereby affecting the degree of aggregation of copper particles in an aqueous colloidal solution.

Факт высокой химической и биологической активности наночастиц хорошо известен и активно изучается на протяжении нескольких десятилетий [1,2]. Причем характер активности, как правило, коррелирует с размерами частиц. С другой стороны известно, что некоторые металлы, такие как серебро и медь сами по себе обладают бактерицидными свойствами [3]. Таким образом может быть интересен факт дозированного изменения свойств наночастиц в зависимости от их размеров в водной среде для целей медицинского применения [4]. В работе предлагается использовать подводный диафрагменный разряд (ПДР) с целью сегрегации частиц меди в коллоидных растворах. Размеры частиц меди укрупняются в зависимости от времени обработки и мощности, вкладываемой в разряд. Данный вывод был сделан на основе микроскопического исследования растворов металлической меди в воде в различных комбинациях нано- и микроформ, полученных после из обработки в ПДР. До сих пор этот вид разряда использовался преимущественно для изменения pH среды. Тем не менее, мы считаем, что, изменяя параметры разряда, можно влиять на механизмы образования и разрушения агрегатов твердой фазы в жидкой среде. Специфика ПДР такова, что в независимости от характера горения разряда в объеме разрядной ячейки могут образовываться ХАЧ (химически активные частицы-атомы, радикалы, вплоть до заряженных частиц). Действительно, устойчивое горение разряда реализуется в области диафрагмы малых размеров (от 1,5 до 0,5 мм в диаметре) вблизи заостренного электрода, радиус кривизны которого составляет примерно 0,05 мм. Внутренняя полость диафрагмы непосредственно не контактирует с жидкой фазой рабочего раствора. Заостренный электрод вводился во внутреннюю область диафрагмы и выполнял роль анода. В качестве катода использовался графитовый стержень, находящийся в растворе. Такая конструкция разрядной системы позволяла в зависимости от режимов работы источника питания получать в жидкости либо плазменный пузырь, либо стример, протяженностью до нескольких сантиметров. Эти плазменные образования являются источниками ХАЧ и способны разрушать крупные частицы поверхностно- активных веществ (ПАВ), стабилизирующих свойства коллоидных систем. Сам факт получения различных размеров частиц меди в водной среде позволит дозированно регулировать эффективность получаемых растворов по отношению к патогенам и микроорганизмам, снизив (в случае необходимости) эффект "агрессивного" действия меди на ткани в случае её нахождения в классической наноформе.

Библиографический список

1. Шаляпина А.Я., Полякова Л.А., Запорожец М.А., Хохлов Э.М., Губин С.П. // *Журнал неорганической химии*. 2011. Т. 56. № 8. С. 1253-1258.
2. Аксенова Н.А., Савко М.А., Урюпина О.Я., Ролдугин В.И., Тимашев П.С., Кузьмин П.Г., Шафеев Г.А., Соловьева А.Б. // *Журнал физической химии*. 2017. Т. 91. № 1. С. 122-128.
3. Доронин С.Ю., Чернова Р.К., Алипов В.В., Белолипцева Г.М., Лебедев М.С. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2011. Т. 11. № 1. С. 18-22.
4. Голованова М.А., Королев Д.В., Гареев К.Г. // *Наука настоящего и будущего*. 2017. Т. 1. С. 387-390.

Секция 6

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТОСТРОЕНИЕ

Проектирование пучково-плазменных реакторов: проблемы системной совместимости

Design of beam-plasma reactors: system compatibility issues

Васильев М.Н., Васильева Т.М.

Vasiliev M.N., Vasilieva T.M.

Объединенный институт высоких температур РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, E-mail: mvasiliev2006@rambler.ru

Compatibility of functional elements for various designs of beam-plasma setups is considered. Optimal control techniques for plasma chemical reactors by electron beam characteristics variation and by plasma-forming media parameters adjustment are analyzed.

Плазмотехнические системы, в которых генерируется холодная электронно-пучковая плазма (ЭПП), заняли определенную нишу среди устройств, применяемых в научных исследованиях, и, благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам, служат основой целого ряда производственных, ресурсосберегающих, аграрных и медико-биологических технологий [1]. Известны также приложения ЭПП в аэрокосмической технике бортового и наземного размещения [2].

В числе проблем, с которыми сталкиваются при проектировании и эксплуатации пучково-плазменных установок, ключевыми являются системная совместимость их отдельных элементов и анализ возможного негативного влияния работающего генератора ЭПП на внешние устройства, окружающую среду и персонал. Когда ЭПП служит для целенаправленной модификации свойств материалов, что характерно для ее производственно-технологических приложений, необходимо принимать во внимание как позитивные синергетические факторы пучково-плазменного воздействия на вещество, так и возможные побочные негативные эффекты. Специфика системного анализа и оптимизации процессов и аппаратов на основе ЭПП определяется необходимостью самосогласованного учета многочисленных и имеющих различную физическую природу явлений.

В настоящей работе для различных технических решений пучково-плазменных установок рассматриваются следующие задачи:

- Совместимость генераторов электронных пучков с выводными окнами, предназначенными для выпуска быстрых электронов из вакуума в плотную плазмообразующую среду, в различных условиях работы установки.
- Оптимизация весогабаритных характеристик системы.
- Совместимость генераторов электронных пучков с другими ионизаторами для получения гибридной плазмы.
- Управление генерацией ЭПП за счет варьирования параметров электронных пучков и характеристик плазмообразующей среды.
- Анализ возможных побочных эффектов при пучково-плазменной обработке материалов и способов их подавления; проблемы радиационной безопасности.
- Анализ нестационарных процессов в пучково-плазменных установках как с точки зрения угроз устойчивости плазменного объема, так и возможности управления нестационарными процессами для повышения энергоэффективности установок.

При этом преимущественно рассматриваются плазмохимические реакторы, в которых реакционная зона формируется внутри заполненного плазмообразующей средой замкнутого объема, ограниченного стенками камеры. Плазма возбуждается инжекцией в нее сфокусированного электронного пучка, а на реакционный объем может накладываться внешнее электромагнитное поле. В реакционном объеме могут находиться макроскопические тела, например, образцы, подлежащие плазменной обработке, или/и диспергированные порошки или жидкости.

Библиографический список

1. Leonhardt D., Muratore C., Walton S.G., Blackwell D.D., Fernsler R.F., Meger R.A. // *Surface and Coatings Technology* **2004**. V. 177–178. P. 682.
2. Wendorf M. // *Interesting Engineering* **2021**. <https://interestingengineering.com/innovation/stealth-cloud-challenge-75-years-of-air-defence-strategy>

Выявление механизмов управления процессом атомно слоевого травления в установке плазмохимического травления

Identification of mechanisms for controlling the process of atomic layer etching in a plasma etching tool

Кузьменко В.О., Мяконьких А.В.

Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V.

Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН

117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект д.36 к.1, E-mail: kuzmenko@ftian.ru

The atomic layer etching process of HfO_2 and ZrO_2 in conventional plasma etching tool was studied. The etching process is based on surface modification by fluorocarbon film deposition in $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$ plasma and activation of surface reaction by Ar ion bombardment from plasma. The study of deposition process showed that varying plasma composition surface kinetics significantly change from deposition to etching. The mechanism of the etching process has been shown. The etching rate for HfO_2 was ~ 0.10 nm per cycle, and for ZrO_2 ~ 0.11 nm per cycle, which is close to the interatomic distance.

Масштабирование элементов интегральных схем требует развития технологий атомного масштаба для производства наноструктур из различных материалов. Для производства структур толщиной в несколько нанометров требуется атомно-слоевое травление (ALE) для точного и минимального повреждения процесса травления.

Концепция процесса ALE основана на многократном проведении двух самоограничивающихся стадий: модификации поверхности путем образования активного слоя, не травящего самопроизвольно поверхность, и активации реакции между слоем и поверхностью. Активация бомбардировкой инертных ионов обычно используется для анизотропного процесса ALE. Технологическая схема, направленная на устранение паразитных реакций (травление на стадии модификации и самопроизвольное распыление ионами на стадии активации), позволяет приблизить процесс травления к идеальному ALE. Одним из распространенных подходов к этапу модификации поверхности является осаждение тонких фторуглеродных пленок из плазмы [1]. Для достижения идеальных условий ALE фторуглеродная плазма не должна протравливать поверхность через пленку, а последующая бомбардировка инертными ионами должна активировать реакцию между фторуглеродной пленкой и протравленным материалом. Известно, что возможно травление диэлектриков во фторсодержащей плазме и через полимерную пленку [2], важно выбрать такие условия процесса, при которых исключено спонтанное травление.

В настоящей работе процесс ALE был реализован в установке плазмохимического травления с реактором с индуктивно-связанной плазмой. Для модификации поверхности использовалась плазма смеси газов $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$. Проведено предварительное исследование процесса взаимодействия плазмы $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$ с поверхностями различных материалов. Для реализации этапа модификации поверхности в процессе ALE был выбран соответствующий состав плазмы. Исследование механизма процесса травления и оптимизация параметров процесса ALE позволили получить самоограничивающуюся характеристику стадий. Скорость травления HfO_2 составила $\sim 0,10$ нм за цикл, а ZrO_2 $\sim 0,11$ нм за цикл, что близко к межатомному расстоянию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00771, <https://rscf.ru/project/23-29-00771/>

Библиографический список

1. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. // *Vacuum* **2023**. Т. 207. С. 111585.
2. Miakonkikh A. V., Kuzmenko V. O., Efremov A. M., Rudenko K. V. // *Russian Microelectronics* **2022**. Т. 51. №. 6. С. 505–511

Исследование плазмохимической модификации органических веществ, под действием высокочастотного безэлектродного разряда

Investigation of plasma chemical modification of organic substances under the action of high-frequency electrodeless discharge

Лубин А.А.^{a,b}, Якушин Р.В.^b, Чистолинов А.В.^a, Перфильева А.В.^b, Ощепков М.С.^b
Lubin A.A., Yakushin R.V., Chistolinov A.V., Perfiljeva A.V., Oshchepkov M.S.

^a Объединённый институт высоких температур РАН
Россия 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

^b Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»
Россия 125047, Москва, ул. Миусская площадь, 9, стр. 1

The thesis discusses a promising area of research - processes occurring in the zone of action of electrodeless plasma near the liquid surface at the interface. The authors study the oxidation of aliphatic alcohols in aqueous solution flowing through a thin capillary under the action of plasma in a high-frequency electrodeless discharge. Aqueous solutions of propan-2-ol and 2-methylpropan-1-ol alcohols are used in this work.

Одним из наиболее быстро развивающихся направлений современной плазмохимии является поиск устойчивых путей синтеза сложных органических соединений, соответствующих принципам «зеленой» химии. В литературе описывают получение аминов, нитрилов и азолов в плазмохимическом реакторе [1]. Существует потребность в устройствах для проведения редокс-процессов с малым количеством веществ, которые подвергаются контролируемым физико-химическим воздействиям. Коллективом авторов был спроектирован плазмохимический микрожидкостной реактор, где по мере прохождения по системе капилляров обрабатываемые модельные растворы первичных и вторичных спиртов (пропан-2-ола и 2-метилпропан-1-ола) подвергались воздействию высокочастотного безэлектродного разряда. Микрожидкостные технологии уже нашли широкое применение в тонком органическом синтезе и смежных областях.

Разработанная установка состоит из реактора с системой капиллярных трубок, к которому подведено высокое напряжение, перистальтического насоса и источника высокого напряжения. Высоковольтный и заземлённый электроды в реакторе размещены по разные стороны от системы капилляров. Возбуждение электрического тока в системе капилляров с жидкостью происходило под действием электрического поля высокой частоты. Максимальное электрическое поле возникало в воздушных пузырьках, где и происходил разряд. Жидкость в капиллярах выполняла роль электродов.

В ходе экспериментов по обработке алифатических спиртов (пропан-2-ол, 2-метилпропан-1-ол), варьировалась скорость потока и концентрация спирта в водном растворе (10-40%).

Анализ реакционных смесей ациклических кислородосодержащих соединений (пропанон-2, 2-метилпропан-2-ол, 2-метилпропан-1-ол, пропан-2-ол) проводили методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД).

В ряде экспериментов в продуктах конверсии наблюдаются спирты изомерного состава, что свидетельствует о возможных перегруппировках углеродного скелета исходных соединений без процесса окисления. Кроме того, наблюдается образование спиртов с редуцированным углеродным скелетом. Анализ реакционной смеси 2-метилпропан-1-ол показал содержание: бутан-1-ол (27 %), этанол (15 %), 2-метилпропан-2-ол (23 %), 2-метилпропан-1-ол (35 %). В свою очередь анализ реакционной смеси пропан-2-ола показал содержание: этанол 6%, пропан-2-ола (45%), пропан-1-ол (14%), 2-метилпропан-1-ол (13.4%), бутан-1-ол (21.4%), метилацетат (0.2%), (пропанон-2 > 0.1%).

Анализ реакционных смесей показал, что воздействие высокочастотного безэлектродного разряда в микрожидкостном реакторе позволяет создать условия для мягкого окисления, окислительной перегруппировки и этерификации без введения окисляющих агентов или жесткой окислительной деструкции углеродного скелета.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

Библиографический список

1. Hamdan A., Liu J. L., Cha M. S. Transformation of n-heptane using an in-liquid submerged microwave plasma jet of argon // *Journal of Applied Physics*. 2021. V. 129. No 4. P. 043303.

Наклонное травление оксида кремния

Tapered plasma etching of silicon oxide

Мельников А.Е., Кузьменко В.О., Мяконьких А.В.

Melnikov A.E., Kuzmenko V.O., Miakonkikh A.V.

*ФГБУН Физико-технологический институт им. К. А. Валиева Российской академии наук
117218, Москва, Нахимовский просп., 34, E-mail: alexen96@gmail.com*

This work is dedicated to the development of a process of forming silicon oxide structures with tapered sidewalls using dry etching methods, including a two-stage process involving the formation of a tapered photoresist mask and plasma etching of the silicon oxide.

Анизотропное вертикальное травление оксида кремния является хорошо изученным процессом, который легко осуществляется во фторсодержащей плазме без необходимости дополнительной пассивации стенок. Это связано с механизмами его травления, который, в отличие от кремния, активируется дефектами, создаваемыми ионной бомбардировкой. Однако существуют технологически важные задачи, для которых необходимо создать наклонный профиль стенок. Одной из таких практически важных задач является создание структур типа р-сар для оценки диэлектрических материалов в электронной технике [1]. Также разработка процесса плазменного травления SiO₂ с наклонными боковыми стенками может быть использована для создания микроэлектромеханических систем (MEMS) [2,3].

В данной работе мы стремились разработать процесс травления оксида кремния с минимальным углом наклона боковых стенок. Эксперимент осуществлялся на индуктивно-связанном плазменном реакторе Plasmalab 100 (Oxford Instruments), для которого был разработан двухэтапный процесс травления. В качестве образцов мы использовали кремниевые подложки размером 2 × 2 см, приклеенные к кремниевому носителю диаметром 10 см с помощью вакуумной смазки.

Первым шагом было изменение формы профиля маски фоторезиста с вертикального на наклонный с использованием плазмы Ar/O₂/CF₄. Маска фоторезиста представлял собой массив полос шириной 2 мкм и толщиной 1 мкм.

Второй шаг заключался в переносе полученного профиля фоторезиста в слой SiO₂ толщиной 300 мкм путем травления фоторезиста и SiO₂ с примерно одинаковыми скоростями. Скорость травления можно регулировать путем оптимизации состава плазмы.

Также была проведена актинометрическая диагностика плазмы для обоих шагов.

Библиографический список

1. L. Zhao, Z. Tikei, G. G. Gischia, H. Volders and G. Beyer, "A new perspective of barrier material evaluation and process optimization," 2009 IEEE International Interconnect Technology Conference, Sapporo, Japan, 2009, pp. 206-208, 2009.
2. R. Ghodssi and P. Lin, MEMS Materials and Processes Handbook, pp. 693–698, Springer, New York, 2011.
3. V. Bliznetsov, B. Li, J. W. Lee and H. Lin, "MEMS Industry-Worth Etching to Fabricate Tapered Structures in SiO₂," Journal of Microelectromechanical Systems, 26, no. 6, pp. 1400-1407, 2017.

Плазмохимическая очистка мышьяка через промежуточное образование его гидрида

Plasma-chemical purification of arsenic through the intermediate formation of its hydride

Мочалов Л.А.*, Телегин С.В., Слаповская Е.А.

Mochalov L. A., Telegin S. V., Slapovskaya E. A.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

603022, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

E-mail: mochalov@chem.unn.ru

The original arsenic of 5N purity was purified by plasma-chemical sublimation through the intermediate formation of its hydride. The plasma-chemical process of arsenic purification, as well as the impurity composition of arsenic before and after purification, have been studied. A mixture of hydrogen and helium was used as a plasma-forming gas mixture. The induction discharge was excited by an RF generator with an operating frequency of 40.68 MHz.

Исходный мышьяк чистотой 5N был очищен методом плазмохимической сублимации через промежуточное образование его гидрида. Исследован плазмохимический процесс очистки мышьяка, а также примесный состав мышьяка до и после очистки. В качестве плазмообразующей газовой смеси использовалась смесь водорода и гелия. Индукционный разряд возбуждался ВЧ-генератором с рабочей частотой 40.68 МГц.

Установка представляла собой цельно паянную конструкцию, выполненную из высокочистого кварца. Установка плазмохимической очистки мышьяка также подробно описана нами в деталях в работе [1]. Температура источника мышьяка при этом составляла 400 °С при общем давлении в системе – 1×10^{-2} Торр. Процесс проводили в условиях динамического вакуума.

Процесс плазмохимической сублимации мышьяка в водородно-гелиевой плазме был изучен методом оптической эмиссионной диагностики. Показано, что в плазменном разряде на первом этапе происходит атомизация кластеров As_4 , а также образование радикалов водорода $H\cdot$ из молекулы H_2 в газовой фазе. Дальнейшее образование арсина проходит по радикальному механизму. Полученные в плазме продукты реакций накапливали в ловушке, охлаждаемой жидким азотом, расположенной сразу после плазмохимического реактора

Показано, что выход конечного продукта – арсина – существенным образом зависит от времени пребывания гидрида в плазме, так как последний легко разлагается в УФ-излучении зоны послесвечения плазмы.

Библиографический список

1. Mochalov, L., Logunov, A., & Vorotyntsev, V. (2021). Preparation of gallium of the special purity for semiconductors and optoelectronics. Separation and Purification Technology, 258, 118001. doi:10.1016/j.seppur.2020.118001.
2. Патент №218.016.2604 РФ, Способ вакуумной очистки теллура от углеродсодержащих наноразмерных гетеровключений / Нежданов А. В., Машин А. И., Мочалов Л. А. – Оpubл.13.02.2018.
3. Патент РФ № 2585479 «Плазмохимический способ получения халькогенидных стекол системы as-s и устройство для его реализации».

Особенности масштабирования плазмохимических процессов очистки воздуха от паров летучих органических соединений

Features of scaling plasma-chemical processes for air purification from vapors of volatile organic compounds

Филатов И.Е., Кузнецов Д.Л.

Filatov I.E., Kuznetsov D.L.

Институт электрофизики УрО РАН

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, e-mail: fil@iep.uran.ru

A method is proposed for determining the relative reactivity of volatile organic compounds with respect to the components of a pulsed discharge plasma. The method includes measuring of determining the factors of energy efficiency of the processes. Reactivity factors were obtained for vapors of solvents of general use, unsaturated, aromatic and halogen-containing compounds. Methods are proposed for determining energy parameters for problems of scaling processes from laboratory to industrial levels.

Несмотря на бурное развитие интереса в мире к плазмохимическим методам очистки воздуха от паров летучих органических соединений (ЛОС), отсутствие единого, «унифицированного» подхода к исследованиям не позволяет корректно сравнивать результаты разных экспериментов. Проблема усложняется тем, что реакционная способность ЛОС по отношению к компонентам плазмы очень сильно зависит от его химической структуры. Отсутствие необходимых констант взаимодействия и сложность химического анализа усложняют процесс математического моделирования. Плюс ко всему, различные виды разрядов генерируют неравновесную плазму с различной энергетической эффективностью. Это еще больше осложняет выбор эффективного метода среди множества альтернативных.

Нами развивается унифицированный подход для исследования процессов удаления ЛОС из потоков воздуха, который позволяет преодолеть ряд недостатков используемых методов и повысить производительность исследований по очистке воздуха с помощью плазмохимических методов [1,2]. Суть подхода заключается в использовании в экспериментах множества компонентов из родственных или разных классов. Одновременно присутствующие в смеси компоненты находятся в равных реакционных и аналитических условиях, поэтому их относительная реакционная способность может быть измерена с высокой точностью даже с использованием «медленного» метода ГЖХ. Такой подход позволяет максимально эффективно выявлять основные закономерности процессов.

С помощью экспериментальной установки, подробно описанной в работах [1] проведены исследования групп соединений различной функциональности [1–4]. В экспериментах использовался импульсный коронный разряд амплитудой напряжения: 60–120 кВ, длительностью 25–45 нс. Показано, что множество полифункциональных и ароматических соединений при концентрациях 250–500 ppm при степени конверсии 90% удаляются с плазмохимическим выходом: $G=1-5$ мол./100 эВ. Ненасыщенные соединения, используемые как мономеры для производства пластмасс, в аналогичных условиях удаляются с выходом $G=2-30$ мол./100 эВ.

Определена относительная реакционная способность ряда соединений различных групп и делаются выводы о различиях механизмов их удаления.

В качестве меры энергетической эффективности для задач удаления ЛОС предложено использовать энергетическую эффективность наработки озона в ПХР [5].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-20031, <https://www.rscf.ru/project/24-19-20031/>).

Библиографический список

1. Филатов И.Е., Уварин В.В., Кузнецов Д.Л. // *Письма в ЖТФ* 2020. №. 2. С. 47.
2. Filatov I.E., Uvarin V.V., Nikiforova E.V., Kuznetsov D.L. // *Journal of Physics: Conference Series* 2021. Vol. 2064. Article N 012094.
3. Филатов И.Е., Уварин В.В., Кузнецов Д.Л. // *Письма в ЖТФ* 2021. №. 22. С. 9.
4. Филатов И.Е., Уварин В.В., Кузнецов Д.Л. // *Письма в ЖТФ* 2023. №. 11. С. 25.
5. Филатов И.Е., Сурков Ю.С., Кузнецов Д.Л. // *Письма в ЖТФ* 2022. №. 13. С. 28.

Изменением структуры дермы рыбьей кожи модифицированной плазмой в процессе выделки

Changing the structure of the dermis of fish skin with modified plasma during the dressing process

Ахвердиев Р.Ф., Рахматуллина Г.Р., Низамова Д.К., Тихонова В.П., Желтухин В.С.
Akhverdiev R.F., Rakhmatullina G.R., Nizamova D.K., Tikhonova V.P., Zheltukhin V.S.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань, ул. К.Маркса, 68,
 E-mail: nizamova.darya.93@mail.ru*

Плазменные технологии в настоящее время нашли широкое применение не только в машиностроении и радиоэлектронике, но и в легкой промышленности [1]. Физический механизм модификации материалов с помощью плазмы пониженного давления описан в работе [2].

В легкой промышленности используются материалы, имеющие волокнисто-пористую структуру, которая при обработке высокочастотным разрядом пониженного давления по всему объему создает новый материал с необходимыми свойствами [3].

В данной работе исследовалось влияние плазменного воздействия на кожу из шкур семги в процессе выделки при разной продолжительности обработки от 3 до 7 минут, при этом остальные параметры модификации оставались постоянными: плазмообразующий газ - аргон, расход газа - 0,04 г/с, мощность разряда – 1,55 кВт, давление -26,6 Па.

В результате проведенного эксперимента установлено, что с увеличением продолжительности плазменной обработки происходит уплотнение структурных элементов дермы кожи, в следствии чего изменяются свойства материала. Критерием изменения потребительских свойств служил показатель краевого угла смачивания, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние времени плазменной обработки на краевой угол смачивания кожи из шкур семги

Время плазменной обработки, мин	Краевой угол смачивания, °С	Поверхность
3	88,1	Гидрофильная
5	115,1	Гидрофобная
7	117,7	Гидрофобная
контрольный	95,0	-

Таким образом можно отметить, что плазменная обработка влияет на структуру дермы кожи из шкур семги, превращая ее в гидрофильный или гидрофобный материал, в зависимости от технологической задачи.

Библиографический список

1. Абдуллин, И. Ш. Неравновесная низкотемпературная плазма пониженного давления в процессах обработки натуральных полимеров / И. Ш. Абдуллин, Р. Ф. Ахвердиев, М. Ф. Шаехов // Вестник Казанского технологического университета. – 2003. – № 2. – С. 349-353.
2. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения — Казань: Изд. Казан. ун-та, 2000. 348 с.
3. Ахвердиев Р.Ф. Исследование влияния плазменной обработки на подготовительные процессы производства кожи из шкур лососевых рыб / Р. Ф. Ахвердиев, И. Ш. Абдуллин, В. П. Тихонова [и др.] // Кожевенно-обувная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 28-30.

Плазмохимический синтез нанопорошка диборида циркония в водородной плазме дугового разряда постоянного тока

Plasma chemical synthesis of zirconium diboride nanopowders in hydrogen plasma of DC arc discharge

Кирпичев Д.Е., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Фисунов Д.В.,
Калашников Ю.П., Литвинова И.С.

*Kirpichev D.E., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Sinaiskii M.A., Fisunov D.V., Kalashnikov Yu.P.,
Litvinova I.S.*

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
119334, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 49, E-mail: dkirpichev@imet.ac.ru*

The results of plasma chemical synthesis of zirconium diboride nanopowders in hydrogen plasma of a DC arc discharge are presented. The thermodynamic calculation of the equilibrium states of the Zr-B-H₂ system demonstrated the formation of ZrB₂ possibility at temperatures around 1900 K. A positive effect of increasing the enthalpy of the plasma jet, using hydrogen as a plasma-forming gas on the morphology, composition of the resulting powder and the ZrB₂ output is shown.

Широкий спектр применения материалов на основе боридов переходных металлов, в частности, диборида циркония обусловлен их инертностью, высокими температурой плавления, твердостью, упругостью, а также электрофизическими и теплофизическими характеристиками. Использование в порошковой металлургии наноразмерных порошков позволяет получать материалы с более высокими эксплуатационными показателями. Плазмохимический синтез нанопорошка ZrB₂ из хлоридов в водородной плазме дугового разряда представляет интерес в силу компактности оборудования с сохранением высокой производительности процесса, использования доступного и чистого от примесей сырья.

По результатам расчёта в программном комплексе ТЕРРА [1] равновесных состояний системы ZrCl₄-BCl₃-nH в диапазонах температур 500-5000 К и избытка водорода H/Cl 1 – 5 моль/моль при атмосферном давлении, максимальный выход ZrB₂ имеет место в окрестностях температуры 1900 К. С увеличением избытка H/Cl до 5 моль/моль при этом выход ZrB₂ возрастает до 85%.

Эксперименты проводили на установке, описанной в [2]. Хлориды циркония и бора в соотношении BCl₃/ZrCl₄ = 2 моль/моль в потоке транспортирующего газа подавались в высокотемпературную зону смешения с водородной плазменной струей при суммарном расходе от 4 до 8 г/мин. Образующиеся наночастицы ZrB₂ оседали в виде нанопорошка на водоохлаждаемых стенках плазмохимического реактора. Часть порошка выносилась в газодисперсном потоке из реактора и оседала на фильтре. После прохождения фильтра газ подвергался очистке в щелочном скруббере от образующегося в ходе синтеза хлороводорода, разбавлялся воздухом и сбрасывался в атмосферу. Собранный со стенок реактора порошок подвергался комплексному анализу.

В результате плазмохимического синтеза при взаимодействии хлоридов циркония и бора с водородной плазменной струей были получены агрегированные порошки, представленные, по данным РФА, фазой диборида циркония. Величина удельной поверхности полученных порошков изменялась от 108 м²/г до 25 м²/г, что соответствует среднему размеру частиц диборида циркония от 10 нм до 40 нм. Снижение удельной поверхности порошков связано с увеличением энтальпии плазменной струи от 7.2 кВт·ч/м³ до 8.5 кВт·ч/м³, уменьшением расхода плазмообразующего газа и увеличением общего расхода сырья с 4 до 8 г/мин. Содержание примесей кислорода в получаемых порошках находилось на уровне 2 - 4 %масс.

Работа проводилась в соответствии с государственным заданием № 075-00320-24-00

Библиографический список

1. Трусков Б.Г. Компьютерное моделирование фазовых и химических равновесий. //Инженерный вестник, **2012**, № 8, с. 1 – 7.
2. А. В. Самохин, Д. Е. Кирпичев, Н. В. Алексеев, Синайский М.А., Цветков Ю.В. Синтез нанопорошков нитрида и карбонитрида титана в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением //Химия высоких энергий. – **2016**. – Т. 50, № 6. – С. 491-497. – DOI 10.7868/S0023119316060164

Сепарация оксидных фаз в системе $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ при дуговом нагреве

Separation of oxide phases in the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ system during arc heating

Николаев А.А., Кирпичёв Д.Е., Муромский С.М.

Nikolaev A.A., Kirpichov D.E., Muromskii S.M.

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
119334, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 49, E-mail: dym2004@bk.ru*

The treatment process of quartz-leucoxene concentrate by distributed arc heating was investigated. The process was carried out in argon at atmospheric pressure and direct current in a graphite crucible with an arc power of 25 kW. The electric parameters of the distributed arc were determined. As a result of melting, an oxide ingot consisting of two phases was obtained. One phase was enriched with titanium oxide, the other with silicon oxide.

Ярегское месторождение является одним из крупнейших на территории России по запасам титанового сырья, представленного в форме кварц-лейкоксового нефтеносного песчаника. Разработка технологии по переработке кварц-лейкоксового концентрата с получением синтетического рутила является актуальной задачей. Исследован процесс разделения оксидов титана и кремния при рассредоточенном дуговом нагреве кварц-лейкоксового концентрата. Процесс проводили в аргоне при атмосферном давлении и постоянном токе в графитовом тигле диаметром 60 мм при мощности дуги 25-30 кВт. Конструкция лабораторной установки включала соосно расположенные графитовые тигель-анод и дисковый катод, установленные в стальной водоохлаждаемой камере-реакторе. Рассредоточение дугового нагрева осуществляли наложением осевого магнитного поля, при котором на поверхности материала формировалось диффузное анодное пятно с плотностью тока 8 A/cm^2 (рис. 1).



Рис.1 Схема экспериментальной установки и фотография дуги ($I=840\text{A}$, $U=34\text{В}$, экспозиция $1/4000$)

Определены вольтамперные параметры рассредоточенной дуги. В результате плавки получен слиток, состоящий из двух фаз соответственно на основе оксида титана и оксида кремния. Около 40 % концентрата подверглось конгруэнтному испарению, однако конденсация испарившегося материала происходила селективно. На охлаждаемых поверхностях в окрестности тигля образовался конденсат в виде порошка с удельной поверхностью $120 \text{ м}^2/\text{г}$, практически полностью состоящий из SiO_2 , а испарившийся TiO_2 удалился с отходящим газом.

Работа проводилась в соответствии с государственным заданием № 075-00320-24-00

Повышение прочностных показателей кожаной ткани овчины путем обработки потоком низкоэнергетических ионов

Increasing the strength indicators of chrome tanned sheepskin leather tissue by treatment with low-energy ions flow

Латфуллин И.И., Рахматуллина Г.Р.
Latfullin I.I., Rakhmatullina G.R.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, e-mail: lilatfullin@gmail.com*

The effect of combined treatment by low-energy ion flow and modified amino resins on tensile strength indicators of chrome tanned sheepskin leather tissue is shown. Porosity of leather tissue was analyzed by gas-liquid porometry using the scanning pressure method.

Основным фактором влияния потока низкоэнергетических ионов, генерируемых в среде высокочастотного емкостного разряда при пониженном давлении, является ионная бомбардировка. В результате такого воздействия изменяется надмолекулярная структура природного волокнистого материала – кожаной ткани [1, 2]. Дополнительным фактором воздействия потока низкоэнергетических ионов является интенсификация процессов, протекающих в жидкой среде [3].

Методом математического планирования эксперимента определены оптимальные параметры модификации кожаной ткани овчины хромового дубления потоком низкоэнергетических ионов: плотность ионного тока $J_i = 0,83 \text{ А/м}^2$, энергия ионов $W_i = 73-75 \text{ эВ}$, давление в разрядной камере $p = 26,6 \text{ Па}$, продолжительность обработки $\tau = 180 \text{ секунд}$, плазмообразующий газ – смесь аргона и воздуха в соотношении 70:30.

Дальнейшим этапом исследований являлось наполнение кожаной ткани овчины синтезированными олигомерными соединениями, а именно аминосолами, модифицированными алифатическими спиртами: карбамидоформальдегидной смолой, модифицированной изопропиловым спиртом (КФС-ИПС) и карбамидоформальдегидной смолой, модифицированной 1,1,3-тригидротетрафторпропанолом (КФС-ФП). Подобного типа соединения известны как наполняющие и дополнительно структурирующие реагенты в кожевенно-меховом производстве. Наполнение синтезированными карбамидоформальдегидными смолами проводили при температуре 38-40°C в течение 180 минут в смеси растворителей вода:диметилсульфоксид в соотношении 70:30.

Основными эксплуатационными показателями кожаной ткани являются физико-механические показатели. Комбинированная обработка кожаной ткани овчины хромового дубления низкоэнергетическими ионами и модифицированными аминосолами позволяет повысить предел прочности при растяжении экспериментальных образцов в 3,5 раза в случае смолы КФС-ИПС и в 2 раза в случае смолы КФС-ФП по сравнению с контрольными образцами.

Модификация структуры кожаной ткани потоком низкоэнергетических ионов приводит к равномерному распределению пор в объеме дермы. Однако, наполнение ее соединениями полимерного характера ведет к снижению пористости в целом. Распределение пор по размерам оценивалось газожидкостной порометрией методом сканирующего давления. Пористость экспериментальных образцов снижается в среднем на 14,0-20,9 % в случае наполнения КФС-ИПС и КФС-ФП соответственно.

Таким образом, комбинированная обработка кожаной ткани овчины хромового дубления потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых в среде высокочастотного емкостного разряда при пониженном давлении, с последующим наполнением модифицированными аминосолами позволяет повысить ее прочностные показатели без существенного снижения пористости.

Библиографический список

1. Абдуллин И. Ш., Сунгатуллин А. М., Фахрутдинова Г. Р., Желтухин В. С. // *Кожевенно-обувная промышленность* **2009**. №1. С.40.
2. Кулевцов Г. Н., Джанбекова Л. Р., Абдуллин И. Ш. и др. *Повышение эффективности использования сырья, полуфабриката, отходов и вспомогательных материалов кожевенного производства с применением низкотемпературной плазмы: монография*, **2008**. 260 с.
3. Абдуллин И. Ш., Вознесенский Э. Ф., Красина И. В., Хасанова Т. Р. // *V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сборник трудов*, **2008**. Т.2. С. 406.

Разработка комбинированного метода повышения коррозионной стойкости поверхностных слоев за счет электро- и плазмохимической обработки

Development of a combined method for increasing the corrosion resistance of surface layers through electro- and plasma-chemical treatment

Виноградова С.С., Юсупова А.А.

Vinogradova S.S., Yusupova A.A.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015. г. Казань, К. Маркса, 68, e-mail: ysvet2000@mail.ru*

A technology for controlling corrosion processes on the surface of stainless steels has been developed. It has been established that electrochemical modification of the surface in combination with low-temperature nitriding enhances nitrogen diffusion and is an effective way to increase wear resistance and corrosion resistance.

Методы обработки поверхности играют ключевую роль в поведении локальной коррозии нержавеющей стали, т.к. возникновение питтинговой коррозии зависит от качества поверхности [1]. Развитие методов электрохимической модификации поверхности хромоникелевых сталей, повышающих стойкость к питтинговой коррозии, открывает новые возможности для целей совершенствования методов модификации [2].

Суть комбинированного метода: электрохимическую модификацию поверхности проводили в сочетании с низкотемпературным плазменным азотированием. В условиях длительной поляризации образцов наложение переменной составляющей приводило к стабилизации режима растворения и пассивации питтингов. Поверхность нержавеющей стали становилась более восприимчивой к плазменному воздействию, что не только ускоряло процесс диффузии азота при пониженных температурах, но и позволило увеличить толщину диффузионного покрытия с более высокими показателями коррозионной стойкости.

Методика эксперимента: испытания на коррозионную стойкость проведены на образцах из стали 12Х18Н10Т с шероховатостью поверхности 3,2 мкм по шкале Ra: контрольный и обработанные в различных режимах в низкотемпературной плазме. Образцы были помещены в технологическую камеру. Затем камеру закрыли и вакуумировали до давления 10 Па, после чего пустили технологический газ (N₂) для достижения показателей давления 2 Па. Затем была включена подача напряжения на образец через фильтр ВЧ-токов переменной составляющей тока от потенциостата. Обработка, позволяющая варьировать мощность в разряде от 0,5 до 3кВт, длилась 60 мин. После обработки образец охлаждали в защитной среде; он был удален из держателя после разгерметизации рабочей камеры.

Результаты исследований: поверхность образца с подачей переменной составляющей тока, обработанная в низкотемпературной плазме однородная, т.к. ионная бомбардировка приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Микротвердость образцов, обработанный в низкотемпературной плазме с наложением переменного тока: в слое на глубине до 2 мкм удвоилась от 3,8 до 7,6 Гпа. Коррозионные процессы на образце, обработанном в низкотемпературной плазме с наложением переменной составляющей, они протекали на границах зажившего дефекта и аморфной связи, толщина азотированного слоя ~65нм.

Разработанный комбинированный метод модифицирования поверхности, сочетающий электрохимическую модификацию поверхности и низкотемпературное плазменное азотированием, который усиливает диффузию азота, позволил повысить в 2 раза коррозионную стойкость нержавеющей сталей.

Библиографический список

1. Rius-Ayra, O.;Llorca-Isern, N. // Coatings. **2021**. 11. P. 260.
- 2 И.О. Исхакова, С.С. Виноградова, Р.А. Кайдриков, Б.Л. Журавлев // Вестник Казан. технол. ун. –та. **2012**. Т.15. №18. С.83-85

Химически активная плазма, как метод глубокой очистки веществ

Chemically active plasma, as method of deep purification of substances

Корнев Р.А.

Kornev R.A.

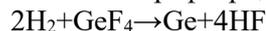
¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
603951, г. Нижний Новгород, Тропинина, 49, Email: kornev@ihps.nnov.ru*

Using the example of the chemical systems $2\text{H}_2+\text{GeF}_4$, $2\text{H}_2+\text{SiCl}_4$ и S_8 , the possibility of deep purification of the target products Ge, SiHCl_3 and S during their plasma-chemical synthesis or gas discharge treatment is shown.

Индивидуальные свойства веществ определяются степенью их химической чистоты. Различают понятия высокочистое вещество – вещество, имеющее предельно низкое содержание всех контролируемых примесей и особо чистое вещество – вещество с предельно низким содержанием одной лимитирующей примеси или небольшой группы. Известные химические и физико-химические методы глубокой очистки веществ характеризуются принципиальными предельными возможностями. Применение газового разряда позволяет провести глубокую очистку вещества от лимитирующих примесей в процессе плазмохимического синтеза.

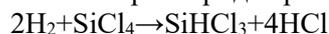
В докладе, на примере трех плазмохимических систем, обсуждается возможность одновременного плазмохимического синтеза основного вещества и его доочистки от лимитирующих примесей.

Так, в процессе водородного восстановления тетрафторида германия до германия по реакции:



в условиях ВЧИ – разряда при давлении 0,2 Торр наблюдается глубокая очистка германия от примеси бора [1].

В процессе водородного восстановления тетрахлорида кремния до трихлорсилана по реакции:



в условиях ВЧД – разряда при давлении 760 Торр наблюдается глубокая очистка трихлорсилана от хлорорганических примесей [2,3].

В процессе транспортирования серы через плазму ВЧЕ – разряда при давлении 0,1 Торр наблюдается глубокая очистка серы от примеси углерода [4].

Работа выполнена при поддержке госзадания министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0095-2019-0008.

Библиографический список

1. R. Kornev, P. Sennikov // *European Physical Journal Applied Physics*. **2016**. V. 75. P. 24718
2. A. V. Gusev, R. A. Kornev, A. Yu. Sukhanov // *High Energy Chemistry*. **2008**. V. 42. P. 56
3. A. V. Gusev, R. A. Kornev, A. Yu. Sukhanov // *High Energy Chemistry*. **2008**. V. 42. P. 324
4. L. Mochalov, R. Kornev, et all // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. **2018**. V.38. P.387

Плазмохимический синтез углеродных наноструктур в мазуте

Plasma-chemical synthesis of carbon nanostructures in fuel oil

Тимеркаев Б.А., Фархутдинова Г.Р., Курбангалеев Р.Р., Шайхатгаров Р.Р., Шакиров Б.Р.
*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева
(КНИТУ-КАИ)*

Россия, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, 420111

E-mail: btimerkaev@gmail.com

Исследован электродуговой разряд между двумя графитовыми электродами в жидких углеводородах. Показано, что квазиравновесный дуговой разряд, организованный в толще углеводородного сырья, может эффективно осуществить плазмохимическую конверсию углеводородов и служить в качестве эффективного инструмента для осуществления процесса синтеза самых разнообразных углеродных наноструктур.

Известно, что добывать атомарный углерод для синтеза углеродных наноструктур из графита энергетически невыгодно, так как испарение атомов углерода с поверхности графита начинается лишь после достижения 4000 градусов. Оказалось, что освобождение углерода из углеводородов намного выгоднее, так как этот процесс в электрическом разряде происходит при не очень высоких температурах. Для создания пара атомарного углерода зависимости от конкретных целей могут быть рассмотрены различные виды электрических разрядов. Наиболее привлекательными видами разрядов могут быть магнетронный разряд в аргоне с добавлением пропана [1] (в случае нанесения алмазоподобных покрытий), тлеющий разряд в среде углеводородов [2] (в случае синтеза углеродных нанотрубок), также дуговой разряд в углеводородах [3] (в случае синтеза углеродных наноструктур). В случае применения магнетронного разряда и тлеющего разряда разрывание молекул углеводородов происходит за счет высокоэнергичных электронов, которые разрывают химические связи в молекулах. И в том, и в другом случае плазма является сильно неравновесной: температура газа не превышает 500С, а температура электронов достигает сотни тысяч градусов. В дуговом разряде разложение молекул углеводородов происходит как за счет высоких температур, так и за счет электронных ударов. Освободившийся углерод при оптимальных условиях может собраться в различные наноструктуры. В работах Амирова Р.Х. и Шавелкиной М.Б. с соавторами (см., например, [4]) приводится способ синтеза углеродных нанотрубок с использованием плазматрона постоянного тока.

В данной работе изучаются способы плазмохимического синтеза углеродных наноструктур в толще мазута. Дуговой разряд инициируется путем непосредственного соприкосновения электродов, погруженных в толщу углеводородного сырья. В дуговом разряде длинные молекулы углеводородов разбиваются на составные элементы и при выходе из зоны разряда из этих элементов синтезируются новые образования: атомарный углерод, С₂, водород, метан, ацетилен и другие углеводороды. На границах с жидким углеводородом газовые фракции эффективно закаливаются, фиксируются образовавшиеся газовые фракции, которые впоследствии устремляются вверх и в виде пузырьков вырываются наружу. Выделившийся углерод откладывается на электродах, а также попадает в мазут.

Морфология углеродных отложений был проанализирован на электронном микроскопе. Оказалось, что она содержит полный ряд аллотропных форм углерода, которые располагаются на разных участках электродов. На Рис.1,2 показаны электронно-микроскопические снимки образцов из катода дугового разряда. Как показал элементный анализ состава этих нанообразований, они на все 100% состоят из углерода. Было проверена их твердость. Согласно результатам этих испытаний можно предположить, что они представляют собой наноалмазы. Их размеры колеблются в пределах от 100 до 200 нм.

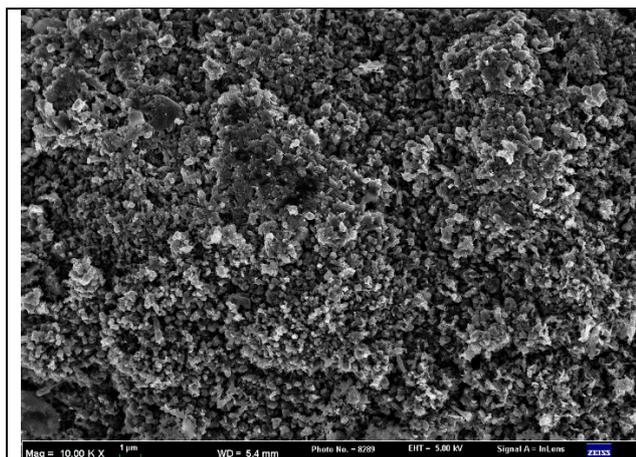


Рис.1. Наноалмазы. Увеличение 10000х.

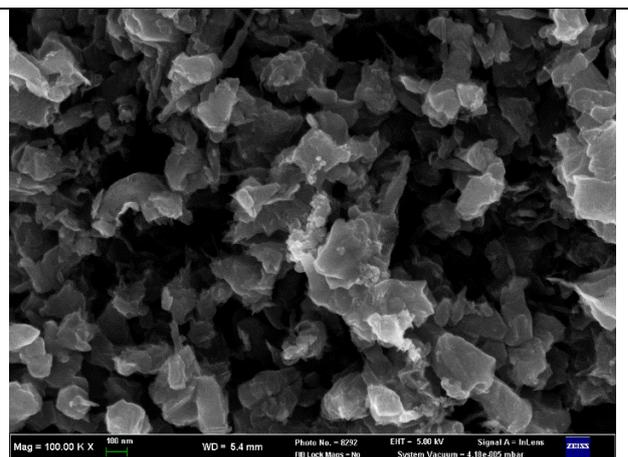


Рис.2. Наноалмазы. Увеличение 100000х.

Таким образом, дуговой разряд, организованный в толще углеводородного сырья, может эффективно осуществить плазмохимическую конверсию углеводородов и служить в качестве эффективного инструмента для синтеза самых разнообразных углеродных наноструктур.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Республики Татарстан в рамках научно-исследовательского проекта «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс) № 24-29-20170.

Библиографический список

1. Gainutdinov, M. Kh. Azamotov, A. N. Galiev, I. Z. Nurullin, S. N. Shusharin, and A. V. Mihaylov, "A hybrid antireflection coating with a diamondlike layer," *Journal of Optical Technology*. 82(1), 55-57 (2015). <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000055>
2. Timerkaev, B.A., Shakirov, B.R., Andreeva, N.G., ...Galeev, I.G., Saifutdinov, A.I. Synthesis of Nanodiamonds from Gasoline Fractions of Hydrocarbons in a High-Voltage Nonequilibrium Electric Discharge. *High Energy Chemistry*, 2023, 57, S50–S52. DOI: 10.1134/S0018143923070494
3. B. A. Timerkaev, R. K. Gevorgyan, A. A. Zalyalieva, and D. B. Timerkaeva. Plasma-chemical synthesis of nanodiamonds on the surface of a microarc discharge cathode. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 95, No. 5, 1201 – 1206. September, 2022. DOI 10.1007/s10891-022-02586-9
4. М.Б.Шавелкина, Р.Х.Амиров и др. Синтез углеродных нанотрубок с использованием плазмотрона постоянного тока. // *Изв. Вузов. Химия и химическая технология*. 2015. Т58.№7.С.23-28.

Авторский указатель

Кwon К.-Н.	24,36	Григорьян Г.М.	21
Абдуллин И.Ш.	14,63	Гринвальд И.И.	77
Абушаев Т.Р.	88	Грушко О.И.	18
Автаева С.В.	26	Гудков С.В.	11
Агафонов А.В.	48,55	Гудкова В.В.	11,39,41,89
Агрба А.И.	77	Гусейн-заде Н.Г.	11,52,56,57
Акишев Ю.С.	7	Гущин А.А.	19
Александров Н.Л.	20,22	Давыдов А.М.	41
Алексеев Н.В.	64,105	Данилейко Ю.К.	11
Алентьев А. Ю.	43,44	Двинин С.А.	80,88
Амиров И.И.	8	Демаков А.М.	42
Анпилов А.М.	41	Деминский М.А.	35
Артемов А.В.	90	Доброва Ю.С.	70
Артемьев К.В.	41	Дорофеев А.А.	64
Асташев М.Е.	11	Дудник Ю.Д.	91
Ахвердиев Р.Ф.	104	Евдокимова А.В.	58
Ахмадуллина Н.С.	52,57	Елинсон В.М.	45
Бадурин И.В.	56	Ефремов А.М.	24,36
Баимова Ю.А.	13	Желтухин В.С.	61,62,104
Батукаев Т.С.	76	Зайцев М.А.	39
Бахтин В.П.	7	Зарвин А.Е.	34
Бермешев М.В.	44	Зверев Г.А.	60
Билера И.В.	9,76	Зимица М.А.	41
Блинов Д.И.	69	Зиновьев А.В.	43,44
Бобылев А.В.	24,36	Иванова П.А.	85,87
Богатова Л.Ф.	30	Извекова А.А.	19
Борзосеков В.Д.	11,39,41,52,56,57,89	Иудин Д.И.	22
Булейко А.Б.	7	Кавыршин Д.И.	13
Булычев Н.А.	47	Казак А.В.	85,87
Вагапова Н.Т.	56	Казначеева Е.М.	24,36
Васильев М.Н.	40,98	Кайрыев Н.Ж.	10
Васильева М.С.	60	Калашников Ю.П.	105
Васильева О.Б.	91	Каляда В.В.	34
Васильева Т.М.	40,98	Капустин Р.В.	77
Виноградова С.С.	108	Кашапов Н.Ф.	29
Водопьянов А.В.	83,86	Каюмов Р.Р.	63
Возняк А.И.	44	Квиткова Е.Ю.	19
Волынец А.Л.	88	Кирпичев Д.Е.	105,106
Воронова Е.В.	89	Кичеева Т.Г.	48
Воцинин С.А.	90	Князев А.В.	39,89
Гаджиев М.Х.	81	Козак А.К.	56
Гайсин А.Ф.	63	Колик Л.В.	11,56,57
Гарифуллин А.Р.	95	Кончекоев Е.М.	11,41,56,57
Гатин А. К.	43	Конькова А.С.	56
Гаянова Т.Э.	56	Корнев К.Н.	88
Гильман А.Б.	12,43,44,45	Корнев Р.А.	109
Гоголев И.А.	94	Корнеева М.А.	80
Горберг Б.Л.	65,66	Кофанова Е.Д.	35
Гребенщикова М.М.	61,62	Кочетов И.В.	20,21
Кравец Л.И.	45,46	Никитин Д.С.	51

Крашевская Г.В.	76	Низамова Д.К.	104
Крылова К.А.	13	Никифоров Р.Ю.	44
Кудрякова В.П.	68	Николаев А.А.	106
Кудряшов М.А.	72,73	Никольская Е.Д.	40
Кудряшов С.В.	32,49	Обозная Е.Н.	23
Кузнецов А.А.	12,43,44,50	Образцова Е.А.	52,56
Кузнецов В.Е.	91	Озерин А.Н.	12
Кузнецов Д.Л.	103	Опра Д.П.	60
Кузьменко В.О.	28,99,101	Осипков А.С.	66
Кумеева Т.Ю.	65	Очередько А.Н.	32,49
Курбангалеев Р.Р.	110	Ощенко И.И.	78
Курявый В.Г.	60	Ощепков М.С.	100
Кустова Е.В.	84	Переславцев А.В.	90
Кылышканов М. К.	27	Пермякова Е.С.	42,74
Ларионов А.И.	55	Перфильева А.В.	100
Латфуллин И.И.	107	Петренко П.И.	90
Лебедев А.В.	35	Петров А.Е.	57
Лебедев Ю.А.	9,33,76	Петряков А.В.	7
Лелевкин В.М.	10,38	Пикалов Д.О.	60
Летунов А.А.	39,89	Пинчук М.Э.	18
Лещик А.В.	32	Пискарев М.С.	12, 43,44
Литвинова И.С.	105	Подойников М.А.	27
Логвиненко В.П.	89	Полисадов С.С.	31
Логинова Е.С.	56	Пономарев А.А.	22
Логунов А.А.	88	Преображенский Е.	83,86
Лоза О.Т.	7	Пророкова Н.П.	65
Лубин А.А.	82,100	Пушкарев А.И.	31
Луканин В.И.	11	Раваев А.А.	7
Макеев М.О.	66	Рафатов И.	87
Малахов Д.В.	39,52,57	Рахматуллина Г.Р.	104,107
Манахов А.М.	74	Резаева А.Д.	39,52
Мансфельд Д.А.	83,86	Руденко К.В.	6
Мельников А.Е.	101	Рыбкин В.В.	16
Минич А.С.	49	Рябов А.Ю.	32,49
Миронов М.М.	62	Сагитова Ф.Р.	71
Миронов С.В.	14	Сайфутдинов А.И.	15,84,92
Михалев П.А.	66	Сайфутдинова А.А.	92
Молдосанов К.А.	10	Самохин А.В.	64,105
Моллаева М.Р.	40	Сафронов А.А.	91
Морозова Т.И.	39	Сафронова С.С.	53,54
Моряков И.В.	11,41	Сенатулин Б. Р.	43
Мочалов Л.А.	53,54,72,73,102	Сергейчев К.Ф.	11
Мурин Д.Б.	93,94	Сивков А.А.	51
Муромский С.М.	106	Симончик Л.В.	85,87
Мяконьких А.В.	6,28,99,101	Синайский М.А.	64,105
Насырбаев А.	51	Синцов С.В.	83,86
Наумова И.К.	48,70	Сироткин Н.А.	48,55,58
Некрасов И.К.	14,71	Ситанов Д.В.	69,96

Скворцова Н.Н.	39,52,56,57	Чиркина М.В.	40
Скрылева Е. А.	43	Чистолинов А.В.	81,82,100
Слаповская Е.А.	53,54,72,73,102	Шабанова А.А.	9
Смирнов С.А.	16,66,78	Шавелкина М.Б.	13,
Смирнова И.М.	67	Шаехов М.Ф.	30,95
Снетов В.Н.	18	Шакиров Б.Р.	110
Сокол М.Б.	40	Шайхаттаров Р.Р.	110
Соколов А.С.	39,52,56,57	Шаненков И.И.	51,59
Сорокин А.А.	52,57	Шарифуллин Ф.С.	71
Сосновский С.А.	31	Шемахин А.Ю.	61
Степанова О.М.	18	Шестаков К.А.	27
Степахин В.Д.	39,52,56,57,89	Шибаета В.Д.	58
Субботин Д.И.	18	Шикова Т.Г.	40,66
Субботкина И.Н.	23	Ширяев В.Н.	91
Сурконт О.С.	88	Шишилов О.Н.	52,57
Сырцова Д.А.	43,44	Штанский Д.В.	42
Сысоев А.А.	22	Эпштейн И.Л.	33
Табакаев Р.Б.	59	Юсупова А.А.	108
Татаринев А.В.	33	Яббаров Н.Г.	40
Тверской А.В.	27	Яблоков М.Ю.	46,50
Тверской В.С.	27	Якушин Р.В.	82,100
Телегин С.В.	53,54,72,102	Яныкин Д.В.	11
Тепляков В.В.	44	Ярмоленко М.А.	46
Тимеркаев Б.А.	110		
Титов А.Ю.	33		
Титов В.А.	16,39,48,70		
Тихонова В.П.	104		
Ткаченко И.А.	60		
Ткаченко Т.Л.	21		
Токарев А.В.	38		
Томкович Н.В.	87,85		
Тюфтяев А.С.	81		
Фадеев А.А.	64		
Фархутдинова Г.Р.	110		
Фефелова Е.С.	7		
Филатов И.Е.	103		
Фисунов Д.В.	105		
Халилуллин Р.Р.	28		
Харченко У.В.	60		
Хижкина М.А.	48		
Хлюстова А.В.	55,58		
Холодков И.В.	66,67,68		
Холодкова Н.В.	67,68		
Художитков В.Э.	34		
Худякова А.Ю.	19		
Чебакова В.Ю.	29		
Чебакова Е.В.	29		
Чекмарев Н.В.	83,86		
Чесноков И.А.	93		

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	5
Возможности глубокого плазменного травления кремния для создания интегральных конденсаторов высокой емкости	6
Мяконьких А.В., Руденко К.В.	
Формирование протяженной трубчатой плазмы в аргоне при низком давлении и в слабом продольном магнитном поле	7
Акишев Ю.С., Бахтин В.П., Булейко А.Б., Лоза О.Т., Петряков А.В., Раваев А.А., Фелелова Е.С.	
Каталитические плазменные процессы в технологии нанoeлектроники	8
Амиров И.И.	
Плазмохимическое получение ацетилена из углеводородного сырья	9
Билера И.В., Лебедев Ю.А.	
Наночастицы из сплавов Cu-Ni – перспективные материалы для нанотехнологий	10
Лелевкин В.М., Молдосанов К.А., Кайрыев Н.Ж.	
Активация жидких сред с помощью низкотемпературной плазмы для биологических приложений: физика и техника эксперимента	11
Кончечков Е.М., Гусейн-заде Н.Г., Яныкин Д.В., Колик Л.В., Данилейко Ю.К., Луканин В.И., Сергейчев К.Ф., Моряков И.В., Борзосексов В.Д., Гудкова В.В., Асташев М.Е., Гудков С.В.	
Воздействие низкотемпературной плазмы на сверхвысокомолекулярный полиэтилен и области его применения	12
Писарев М.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А., Озерин А.Н.	
Особенности плазмохимического синтеза наночастиц Си/Графен: эксперимент и компьютерное моделирование	13
Шавелкина М.Б., Крылова К.А., Баимова Ю.А., Кавыршин Д.И.	
Плазмохимические процессы с применением высокочастотных разрядов пониженного давления для формирования диффузионных покрытий	14
Абдуллин И.Ш., Миронов С.В., Некрасов И.К.	
Кинетика быстрых электронов в плазме коротких тлеющих разрядов в инертных газах и их приложение в анализе продуктов конверсии углеводородов и силана	15
Сайфутдинов А.И.	
Влияние гетерогенных физико-химических процессов на параметры низкотемпературной плазмы	16
Смирнов С.А., Титов В.А., Рыбкин В.В.	
Секция 1 КИНЕТИКА, ТЕРМОДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ	17
Образование пероксида водорода в бидистиллированной воде в электрофизической системе «воздух-плазма-жидкость»	18
Грушко О.И., Субботин Д.И., Снетов В.Н., Пинчук М.Э., Степанова О.М.	
Плазмохимическая деструкция левомицетина в воде	19
Извекова А.А., Квиткова Е.Ю., Худякова А.Ю., Гущин А.А.	
Электронные кинетические коэффициенты для моделирования разрядов в смесях воздуха с парами воды	20
Александров Н.Л., Кочетов И.В.	
Динамика молекул СО и СО₂ в смеси с инертными газами в плазме газового разряда постоянного тока	21
Григорьян Г.М., Кочетов И.В., Ткаченко Т.Л.	
Влияние кластеризации отрицательных ионов на генерацию затравочных электронов при распространении волн ионизации в смесях He:O₂	22
Александров Н.Л., Пономарев А.А., Сысоев А.А., Иудин Д.И.	
Деструкция родамина С под действием диафрагменного разряда	23
Обозная Е.Н., Субботкина И.Н.	

Параметры плазмы и кинетика реактивно-ионного травления кремния в смесях $CF_4 + CHF_3 + O_2$ и $CF_4 + C_4F_8 + O_2$	24
Бобылев А.В., Ефремов А.М., Казначеева Е.М., Kwon К.-Н.	
Секция 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	25
Концентрации атомов брома и фтора в CF_3Br плазме низкого давления	26
Автаева С.В.	
Моделирование равновесных состояний термодинамической системы $MgFON$ для плазменного пиролизного гидролиза фторида магния с получением оксида магния и фтороводорода	27
Тверской А.В., Тверской В.С., Кылышканов М. К., Подойников М.А., Шестаков К.А.	
Моделирование функции распределения ионов по энергиям в плазме аргона: Влияние параметров процесса на характеристики функции распределения ионов по энергиям	28
Кузьменко В.О., Мяконьких А.В., Халилуллин Р.Р.	
Моделирование гетерогенных систем	29
Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю., Чебакова Е.В.	
Зависимость выбора метода консервации археологических объектов из натуральной кожи от состояния сохранности	30
Богатова Л.Ф., Шаехов М.Ф.	
Моделирование плазмохимических процессов в барботажном реакторе с металлическим расплавом	31
Пушкарев А.И., Полисадов С.С., Сосновский С.А.	
Метод моделирования плазмохимических реакций в барьерном разряде	32
Рябов А.Ю., Кудряшов С.В., Очередыко А.Н., Лещик А.В.	
СВЧ разряд в воде при барботировании метаном. Математическое моделирование	33
Лебедев Ю.А., Татаринцов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.	
Моделирование плазмохимических процессов в кластированной сверхзвуковой струе	34
Художитков В.Э., Зарвин А.Е., Каляда В.В.	
Влияние степени дисперсности газовой фазы на скорость разложения метана в плазменно-расплавленной технологии	35
Кофанова Е.Д., Лебедев А.В., Деминский М.А.	
Особенности кинетики атомов фтора и закономерности реактивно-ионного травления кремния в смесях различных фторуглеродных газов с кислородом	36
Ефремов А.М., Бобылев А.В., Казначеева Е.М., Kwon К.-Н.	
Секция 3 ПОРОШКИ, ПЛЕНКИ, ПОКРЫТИЯ, МОДИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ В ПЛАЗМЕ (ВКЛЮЧАЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ), СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ. ПЛАЗМЕННАЯ МЕДИЦИНА И БИОЛОГИЯ	37
Антипригарное микродуговое оксидирование	38
Лелевкин В.М., Токарев А.В.	
Возможность исследования предбиологического синтеза в модельном эксперименте по микроволновому разряду в смесях имитатора лунной пыли LMS-1D и карбоната аммония	39
Борзосеков В.Д., Гудкова В.В., Зайцев М.А., Морозова Т.И., Соколов А.С., Князев А.В., Летунов А.А., Скворцова Н.Н., Резаева А.Д., Малахов Д.В., Титов В.А., Степахин В.Д.	
Изменение физико-химических свойств и биосовместимости полиэтилентерефталата путем обработки в гибридной плазме	40
Васильева Т.М., Никольская Е.Д., Васильев М.Н., Моллаева М.Р., Чиркина М.В., Сокол М.Б., Яббаров Н.Г., Шикова Т.Г.	
Многоискровой кольцевой высоковольтный импульсно-периодический разряд в среде вода-газ для решения биологических задач	41
Гудкова В.В., Зимица М.А., Моряков И.В., Артемьев К.В., Давыдов А.М., Кончечков Е.М., Анпилов А.М., Борзосеков В.Д.	
Получение аминокислотсодержащих полимерных покрытий из циклопропиламина методом плазменной полимеризации	42
Демаков А.М., Пермякова Е.С., Штанский Д.В.	

Влияние разряда постоянного тока на свойства поверхности пленок полифениленоксида	43
Зиновьев А.В., Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А., Скрылева Е. А., Сенатулин Б. Р., Гатин А. К., Сырцова Д. А., Алентьев А. Ю.	
Улучшение газоразделительных свойств стеклообразных полимеров, модифицированных в низкотемпературной плазме	44
Сырцова Д.А., Зиновьев А.В., Никифоров Р.Ю., Алентьев А.Ю., Пискарев М.С., Возняк А.И., Бермешев М.В., Кузнецов А.А., Тепляков В.В., Гильман А.Б.	
Функционализация поверхности трековых мембран в низкотемпературной плазме для расширения области применения	45
Кравец Л.И., Гильман А.Б., Елинсон В.М.	
Осаждение на поверхности трековых мембран гидрофобных полимерных покрытий из активной газовой фазы	46
Кравец Л.И., Яблоков М.Ю., Ярмоленко М.А.	
Плазменный разряд в жидкофазных средах под действием интенсивной ультразвуковой кавитации и его применение для синтеза наночастиц оксидов металлов	47
Булычев Н.А.	
Плазмохимическое модифицирование хитозана для получения ранозаживляющих материалов	48
Титов В.А., Сироткин Н.А., Наумова И.К., Хижкина М.А., Кичеева Т.Г., Агафонов А.В.	
Опыт применения барьерного разряда для влияния на морфогенез и продуктивность некоторых сельскохозяйственных культур	49
Кудряшов С.В., Рябов А.Ю., Очередько А.Н., Минич А.С.	
Воздействие низкотемпературной плазмы на смачиваемость и электреты свойства полимерных материалов	50
Яблоков М.Ю., Кузнецов А.А.	
Синтез многокомпонентных и композиционных материалов в высокоскоростной струе плазмы дугового разряда	51
Никитин Д.С., Шаненков И.И., Насырбаев А., Сивков А.А.	
Создание облаков левитирующих частиц, имитирующих космическую или лунную пыль в лабораторных условиях	52
Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Борзосеков В.Д., Малахов Д.В., Соколов А.С., Ахмадуллина Н.С., Резаева А.Д., Сорокин А.А., Образцова Е.А., Шишилов О.Н., Гусейн-заде Н.Г.	
Получение тонких пленок IGZO плазмохимическим осаждением из газовой фазы	53
Мочалов Л.А., Телегин С.В., Слаповская Е.А., Сафронова С.С.	
Получение тонких пленок CdS и CdTe методом PECVD	54
Сафронова С.С., Телегин С.В., Мочалов Л.А., Слаповская Е.А.	
Плазменно-жидкостный синтез как новый метод получения MXenes	55
Сироткин Н.А., Ларионов А.И., Хлюстова А.В., Агафонов А.В.	
Микроволновые имитационные эксперименты по воздействию частиц лунного реголита LMS-1D на солнечные батареи	56
Соколов А.С., Степахин В.Д., Скворцова Н.Н., Борзосеков В.Д., Гаянова Т.Э., Козак А.К., Вагапова Н.Т., Бадурин И.В., Логинова Е.С., Образцова Е.А., Колик Л.В., Конькова А.С., Кончечков Е.М., Гусейн-заде Н.Г.	
Микроволновые эксперименты по осаждению частиц лунного реголита на нержавеющую сталь, тантал, молибден	57
Степахин В.Д., Скворцова Н.Н., Борзосеков В.Д., Малахов Д.В., Соколов А.С., Ахмадуллина Н.С., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Петров А.Е., Сорокин А.А., Шишилов О.Н., Гусейн-заде Н.Г.	
Создание фото- и электрохромных материалов на основе TiO₂ с использованием подводного диафрагменного разряда	58
Хлюстова А.В., Евдокимова А.В., Сироткин Н.А., Шибаева В.Д.	

Плазмодинамический синтез полифункциональных катализаторов в среде углекислого газа для СВЧ-пиролиза органического сырья	59
Шаненков И.И., Табакаев Р.Б.	
Оксиды меди, полученные в плазме импульсного высоковольтного разряда и с последующим перемалыванием	60
Курявый В.Г., Зверев Г.А., Васильева М.С., Опра Д.П., Ткаченко И.А., Харченко У.В., Пикалов Д.О.	
Математическое моделирование ВЧ-плазменной модификации титано-гафниевых нитридных покрытий	61
Гребенщикова М.М., Желтухин В.С.	
Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела	61
Шемахин А.Ю.	
Плазмохимические аспекты при формировании нанокomпозиционных покрытий нитридов гафния и титана в ионно-плазменном процессе	62
Гребенщикова М.М., Желтухин В.С., Миронов М.М.	
Электролитно-плазменная обработка со струйным течением электролита	63
Каюмов Р.Р., Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш.	
Синтез композитных нанопорошков на основе вольфрама в термической плазме электродугового разряда и их перспективное использование для технологий аддитивного производства	64
Фадеев А.А., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Дорофеев А.А.	
Магнетронное напыление диоксида титана на ткань из химических волокон: структура покрытия и свойства ткани	65
Пророкова Н.П., Кумеева Т.Ю., Горберг Б.Л.	
Поляризация пленок ПВДФ в коронном разряде	66
Холодков И.В., Шикова Т.Г., Смирнов С.А., Горберг Б.Л., Макеев М.О., Михалев П.А., Осипков А.С.	
Морфология поверхности полипропиленовой пленки после обработки в плазме тетрафторида углерода	67
Холодков И.В., Холодкова Н.В., Смирнова И.М.	
Особенности гидрофобизации поверхности полимеров в тлеющем разряде постоянного тока в SF₄	68
Холодкова Н.В., Холодков И.В., Кудрякова В.П.	
Спектральный контроль содержания металлов в составе биологических структур	69
Блинов Д.И., Ситанов Д.В.	
Влияние плазмохимической обработки хитозана на всхожесть и развитие проростков черных бобов (<i>Vicia faba</i>)	70
Доброва Ю.С., Наумова И.К., Титов В.А.	
Влияние плазмохимических процессов на физико-механические характеристики неорганических и органических волокнистых наполнителей композиционных материалов	71
Сагитова Ф.Р., Некрасов И.К., Шарифуллин Ф.С.	
Получение и сенсбилизация фоточувствительных слоев PbSe методом плазмохимического осаждения из газовой фазы	72
Слаповская Е.А., Мочалов Л.А., Телегин С.В., Кудряшов М.А.	
Плазмохимическое осаждение тонких пленок GaS_{1-x}Se_x	73
Кудряшов М.А., Мочалов Л.А., Слаповская Е.А.	
Разработка супергидрофобных покрытий фотоэлектрических ячеек для автономных модулей трекинга вагонов	74
Пермякова Е.С., Манахов А.М.	
Секция 4 ОРГАНИЧЕСКИЙ И НЕОРГАНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГАЗОФАЗНЫХ И ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ	75
Паровой риформинг метана в СВЧ разряде в воде	76

Батукаев Т.С., Билера И.В., Крашевская Г.В., Лебедев Ю.А. СВЧ-плазменная конверсия метана в ацетилен и бензол	77
Капустин Р.В., Агрба А.И., Гринвальд И.И.	
Физико-химические процессы образования и гибели активных частиц в подводном разряде переменного тока	78
Ощенко И.И., Смирнов С.А.	
Секция 5 ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ И ДИАГНОСТИКА РЕАГИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ	79
К теории разряда на электронном циклотронном резонансе в магнитной ловушке	80
Двинин С.А., Корнеева М.А.	
Исследование переноса воды в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом	81
Чистолинов А.В., Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С.	
Пространственное распределение интенсивности свечения компонентов плазмы разряда с жидким электролитным катодом	82
Чистолинов А.В., Лубин А.А., Якушин Р.В.	
Фиксация атмосферного азота в микроволновых разрядах, поддерживаемых непрерывным миллиметровым излучением гиротронов	83
Синцов С.В., Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Преображенский Е.И.	
Моделирование СВЧ- и лазерно-иницированного СВЧ-разрядов в молекулярных газах	84
Сайфутдинов А.И., Кустова Е.В.	
Напряженность электрического поля на боковой поверхности катода в тлеющем разряде атмосферного давления в гелии	85
Иванова П.А., Казак А.В., Симончик Л.В., Томкович Н.В.	
Разложение углекислого газа в СВЧ разрядах, поддерживаемых излучением с частотами 2.45 и 24 ГГц	86
Водопьянов А.В., Мансфельд Д.А., Чекмарев Н.В., Синцов С.В., Преображенский Е.И.	
Пространственное распределение температуры тлеющего разряда атмосферного давления в гелии со стержневым катодом	87
Томкович Н.В., Казак А.В., Иванова П.А., Рафатов И., Симончик Л.В.	
Комбинированный и СВЧ разряды в высокоскоростных газовых потоках	88
Корнев К.Н., Двинин С.А., Логунов А.А., Сурконт О.С., Абушаев Т.Р., Вольнец А.Л.	
Влияние запертых самопоглощением линий желтого дублета натрия на спектры разрядов, инициируемых в порошковых смесях импульсами излучения мощного гиротрона	89
Летунов А.А., Логвиненко В.П., Воронова Е.В., Князев А.В., Борзосексов В.Д., Гудкова В.В., Степахин В.Д.	
Высокочастотный индукционный плазмотрон для плазмохимических процессов. Определение конструктивных параметров	90
Петренко П.И., Артемов А.В., Вошинин С.А., Переславцев А.В.	
Получение водородосодержащей плазмы и возможности ее применения в лабораторной плазмохимической установке	91
Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б.	
Сравнительный анализ результатов глобального и двумерного осесимметричного моделирования параметров ВЧИ-разряда в парах йода	92
Сайфутдинова А.А., Сайфутдинов А.И.	
Оптико-спектральный контроль процессов плазмохимического травления кремния в среде тетрафторметана	93
Чесноков И. А., Мурин Д. Б.	
Эмиссионные спектры дифтордихлорметана при травлении арсенида галлия	94
Гоголев И. А., Мурин Д. Б.	
Исследование плазмы ВЧЕ-разряда в токе метана	95
Гарифуллин А.Р., Шаехов М.Ф.	
Влияние подводного диафрагменного разряда на агрегацию частиц меди в водном коллоидном растворе	96
Шабанова А.А., Ситанов Д.В.	

Секция 6 ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТОСТРОЕНИЕ	97
Проектирование пучково-плазменных реакторов: проблемы системной совместимости	98
Васильев М.Н., Васильева Т.М.	
Выявление механизмов управления процессом атомно слоевого травления в установке плазмохимического травления	99
Кузьменко В.О., Мяконьких А.В.	
Исследование плазмохимической модификации органических веществ, под действием высокочастотного безэлектродного разряда.	100
Лубин А.А., Якушин Р.В., Чистолинов А.В., Перфильева А.В., Ощепков М.С.	
Наклонное травление оксида кремния	101
Мельников А.Е., Кузьменко В.О., Мяконьких А.В.	
Плазмохимическая очистка мышьяка через промежуточное образование его гидрида	102
Мочалов Л.А., Телегин С.В., Слаповская Е.А.	
Особенности масштабирования плазмохимических процессов очистки воздуха от паров летучих органических соединений	103
Филатов И.Е., Кузнецов Д.Л.	
Изменением структуры дермы рыбьей кожи модифицированной плазмой в процессе выделки	104
Ахвердиев Р.Ф., Рахматуллина Г.Р., Низамова Д.К., Тихонова В.П., Желтухин В.С.	
Плазмохимический синтез нанопорошка диборида циркония в водородной плазме дугового разряда постоянного тока	105
Кирпичев Д.Е., Самохин А.В., Алексеев Н.В., Синайский М.А., Фисунов Д.В., Калашников Ю.П., Литвинова И.С.	
Сепарация оксидных фаз в системе TiO₂-SiO₂ при дуговом нагреве	106
Николаев А.А., Кирпичёв Д.Е., Муромский С.М.	
Повышение прочностных показателей кожаной ткани овчины путем обработки потоком низкоэнергетических ионов	107
Латфуллин И.И., Рахматуллина Г.Р.	
Разработка комбинированного метода повышения коррозионной стойкости поверхностных слоев за счет электро- и плазмохимической обработки	108
Виноградова С.С., Юсупова А.А.	
Химически активная плазма, как метод глубокой очистки веществ	109
Корнев Р.А.	
Плазмохимический синтез углеродных наноструктур в мазуте	110
Тимеркаев Б.А., Фархутдинова Г.Р., Курбангалеев Р.Р., Шайхаттаров Р.Р., Шакиров Б.Р.	

Подписано в печать 01.08.2024. Формат 60x84 1/8. Бумага писчая.
Печ. л. 15,0 Усл. печ. л. 13,95 Уч. изд. л. 14,63 Тираж 90 экз. Заказ _____

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Отпечатано в АО «Ивановский издательский дом»
153000, г. Иваново, ул. Степанова, 5
Тел. 8(4932)30-14-11, 30-32-37 e-mail: 30-14-11@rambler.ru