

На правах рукописи

Хтет Ко Ко Зау

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ РЕАКТОРАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ МЕДИКО-
БИОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 2021

Работа прошла апробацию на кафедре логистических систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Васильева Татьяна Михайловна**

доктор технических наук, доцент, профессор
департамента химии федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский физико-
технический институт (национальный
исследовательский университет)»

Ведущая организация: Акционерное общество "Государственный
научный центр Российской Федерации
"Исследовательский центр имени М.В.
Келдыша"

Защита состоится «16» декабря 2021 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.04.08.006 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского Физико-Технического Института (национального исследовательского университета):

<https://mipt.ru/education/postgraduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Работа представлена «3» сентября 2021 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национального исследовательского университета)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Создание на поверхности изделий требуемого специального распределения физических, химических, а в последнее время – и биологических, свойств является одной из наиболее развитых областей электронно-лучевой обработки материалов. Такая обработка может применяться на различных технологических этапах изготовления изделий, но чаще всего – на финальных стадиях, когда важно контролируемым образом модифицировать свойства материала в поверхностном слое, не изменяя их в объеме изделия.

Успехи в технике проводки электронных пучков из вакуума в плотные газообразные среды и аэрозоли позволили создать особый класс плазмотехнических систем на основе плазмы, генерируемой электронными пучками – электронно-пучковой плазмы (Electron-Beam-Generated Plasma). Такие системы заняли определенную нишу среди других плазменных устройств, в которых обработка поверхности материала или изделия осуществляется за счет воздействия на нее холодной сильнонеравновесной плазмы. В пучково-плазменных реакторах удастся в полной мере использовать преимущества плазмы, возбуждаемой электронным пучком, для низкотемпературной обработки с целью получения материалов с новыми или улучшенными функциональными свойствами.

Одним из наиболее активно развивающихся направлений в применениях плазменно-модифицированных материалов являются изделия медико-биологического назначения, используемые в клинической практике и для лабораторных работ. В рамках этого направления сформировался ряд научных и технологических задач, связанных с созданием на поверхности изделия структур со сложным распределением физико-химических и биологических свойств, в частности – функционально-градиентных структур.

В области технологий получения функционально-градиентных материалов сформировалось самостоятельное направление – градиентные полимерные материалы [1]. Если для получения градиентных материалов на основе металлов основным механизмом воздействия на вещество является нагрев (в том числе – электронно-лучевой нагрев) [2, 3], то для полимерных материалов термическое воздействие ограничено температурной стойкостью материала, и требуемое распределение свойств по поверхности изделия определяется степенью модификации материала за счет иных механизмов. При этом традиционно ставится следующая инженерная задача: создать материал с регулируемым в широком интервале модулем упругости в пределах одного образца. Примером успешного применения таких материалов в медицине является производство имплантатов, когда жёсткий материал имитирует костную ткань, а резиноподобный – хрящевидную.

Для модификации полимеров успешно применяются вневакуумные электронно-лучевые технологии. Обычно используются установки на основе

ускорителей электронов, в которых сформированный в условиях глубокого вакуума электронный пучок большого сечения выводится в атмосферу через выводное окно фольгового типа [4]. Для таких установок характерны высокие (~ 1 МэВ) энергии ускоренных электронов, и модификация материала происходит именно за счет воздействия на него высокоэнергетичных электронов. Степень модификации поверхности определяется дозой электронного облучения, а для создания поверхностей с некоторым распределением свойств обычно применяются специальные поглощающие маски или механическое перемещение материалов в зоне электронно-лучевого воздействия.

Перенос процесса обработки в область форвакуумных давлений и применение систем вывода концентрированных электронных пучков устраняют эти недостатки: перемещением электронного пучка, выведенного в плотную газообразную среду с давлением 0,1-100 Торр, легко управлять с помощью простых электромагнитных отклоняющих систем, а энергию электронов можно снизить до десятков кэВ. При прохождении такого электронного пучка через газ, пар или аэрозоль образуется холодная, но обладающая высокой химической активностью плазма, что позволяет задействовать плазмохимические механизмы управляемой модификации свойств полимерных материалов. Разработке плазмохимических технологий низкотемпературной модификации полимеров и биополимеров в настоящее время уделяется большое внимание, и известно значительное количество работ, посвященных научным и технологическим аспектам этой проблемы (см., например, [5, 6]).

Главной идеей диссертационного исследования является попытка совместить в одном устройстве сразу несколько преимуществ электронно-пучковых установок, работающих в форвакуумном диапазоне давлений, а именно возможность:

- Осуществить процесс обработки в средах специально подобранного химического и фазового состава;
- Задействовать механизмы низкотемпературной плазмохимической модификации полимеров в неравновесных условиях;
- Использовать совместимость электронных пучков с другими ионизаторами (например, с газовым разрядом емкостного типа) для получения комбинированной (или как ее часто называют, гибридной) плазмы с целью получения дополнительных преимуществ от их совместного воздействия на плазмообразующую среду и обрабатываемый материал;
- Безинерционно управлять направлением оси концентрированного электронного пучка после его инъекции в плазмообразующую среду и, соответственно, пространственным распределением энерговыделения в реакционном объеме и на поверхности обрабатываемого изделия;
- Применить импульсно-периодические режимы генерации плазмы для того, чтобы:

- повысить энергоэффективность процесса за счет осуществления плазмохимических процессов в распадающейся плазме,
- снизить тепловые нагрузки на материал в зоне пучково-плазменного воздействия,
- повысить управляемость локальной дозой облучения материала (тяжелыми частицами плазмы и электронами деградационного спектра) в процессе обработки.

В импульсно-периодических режимах работы пучково-плазменного реактора, а также при сканировании электронного пучка по реакционному объему и/или по обрабатываемой поверхности неизбежно возникают специфические нестационарные процессы, как в плазме, так и в материале. Плазменные эффекты главным образом связаны с процессами распада плазмы после прекращения действия ионизатора. Процессы в обрабатываемом материале обусловлены периодическим нагревом/охлаждением зоны пучково-плазменного воздействия и запуском плазмохимических процессов, которые могут продолжаться и без воздействия электронного пучка.

Весьма важным является и то, что перечисленные выше особенности пучково-плазменных реакторов позволяют проводить обработку больших по площади и сложных по форме изделий с целью создания локально-модифицированных зон, которые могут образовывать градиентные структуры. Материалы с поверхностно-распределенными свойствами, в том числе градиентно-функциональные полимеры, привлекают все больше внимания для изучения клеточных ответов, адгезии, распределения и миграции клеток по поверхности искусственных матриц.

Подобные свойства полимерные материалы могут приобретать при создании на их поверхностях целенаправленного распределения заряженных групп, придающих ей упорядоченно изменяющиеся гидрофильные или гидрофобные свойства. Для получения таких эффектов электронно-пучковая и комбинированная плазма могут оказаться вполне подходящим инструментом при формировании полимерных матриц, обладающих высокой биосовместимостью с живыми клетками, которые обеспечивают их рост в заданном направлении и организацию упорядоченных межклеточных контактов. Матрицы, обладающие перечисленными свойствами, находят свое применение в области регенеративной медицины.

С этой точки зрения выполненное диссертационное исследование, в котором изучается модификация материалов и изделий, реально применяемых в медицинской практике и лабораториях медико-биологического профиля, с помощью пучково-плазменных реакторов, работающих в импульсно-периодических режимах или в режимах со сканированием электронного пучка, является актуальным и дает дополнительную информацию по данной научно-технической проблеме.

Научная новизна исследования:

В ходе выполнения работы была создана установка, позволяющая генерировать в импульсно-периодическом режиме электронно-пучковую и гибридную плазму как в свободном объеме, так и внутри диэлектрических контейнеров, получая при этом достаточно большие устойчивые реакционные области. Получены новые данные об электронной плотности в распадающейся электронно-пучковой плазме аргона, а также ее времени жизни в зависимости от условий генерации плазмы, в том числе от частоты модуляции пучка. Для форвакуумного диапазона давлений экспериментально обнаружено существование долгоживущих возбужденных состояний в плазме аргона.

С использованием импульсно-периодических и сканирующих электронных пучков на поверхности полимерных материалов, применяемых для культуральных работ и изготовления медицинских имплантатов, были получены структуры с пространственно-распределенными свойствами (одномерные, двумерные и трехмерные паттерны). Накоплены данные о химическом составе и биологических свойствах поверхности полимеров, модифицированных в электронно-пучковой и гибридной плазме.

Практическая значимость:

В результате работы была продемонстрирована принципиальная возможность получения в распадающейся электронно-пучковой и гибридной плазме, управляемой сканирующим электронным пучком, биосовместимых градиентных полимерных материалов для работы с клеточными культурами. Показана эффективность метода для поверхностной обработки термолабильных изделий, имеющих сложную объемную геометрию, таких как мультитулочные культуральные планшеты. Для таких изделий предложен оригинальный способ управления процессом плазмохимической обработки посредством регулировок и оптимизацией частоты, длительности и количества импульсов электронного пучка.

В целом, разработанная в диссертации методика может быть применена для создания современных интеллектуальных материалов, в том числе multifunctional и адаптирующихся покрытий, клеточных скаффолдов и матриц, систем адресной доставки лекарственных препаратов и депо-форм пролонгированного действия, а также для модификации и риформинга природных высокомолекулярных соединений.

Работа была поддержана грантом РФФИ на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»): грант №19-38-90009.

Цель исследования:

Целью настоящей работы является изучение нестационарных процессов в пучково-плазменных плазмохимических реакторах, работающих в импульсно-периодических режимах и режимах со сканированием электронного пучка, при их использовании для формирования структур с

поверхностно-распределенными свойствами в полимерных материалах и изделиях.

Задачи исследования:

- 1) Создать экспериментальную установку, позволяющую генерировать электронно-пучковую и гибридную плазму в импульсно-периодическом режиме как в сводном объеме, так и внутри диэлектрических контейнеров.
- 2) На примере электронно-пучковой плазмы аргона получить экспериментальные данные об эволюции электронной плотности в процессе распада плазмы, а также времени ее жизни, в зависимости от параметров генерации плазмы и частоты модуляции пучка; установить характерные времена различных фаз распада электронно-пучковой плазмы.
- 3) Получить в гибридной плазме, управляемой импульсно-периодическими и/или сканирующими электронными пучками, на поверхности полимерных материалов структуры с пространственно-распределенными свойствами.
- 4) Предложить алгоритмы управления процессом модификации полимерных материалов посредством локализации облака гибридной плазмы в заданной зоне реакционного объема сканирующими импульсно-периодическими электронными пучками. Найти способы управления плазмохимическими процессами в приповерхностной зоне обрабатываемого изделия посредством регулировок и оптимизацией частоты, длительности и количества импульсов электронного пучка.
- 5) Накопить экспериментальные данные о возможных нарушениях однородности реакционного объема при работе пучково-плазменных реакторов в переходных режимах, когда один или несколько параметров, характеризующих условия генерации плазмы, изменяются во времени по заданному закону.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Конструкция экспериментальной установки, позволяющей генерировать и исследовать электронно-пучковую и гибридную плазму в условиях, характерных для плазмохимических реакторов, работающих в импульсно-периодических режимах или режимах со сканированием пучка по реакционному объему.
- 2) Результаты зондовых измерений электронной плотности в распадающейся электронно-пучковой плазме аргона и результаты оптических измерений времени ее высвечивания в зависимости от условий генерации плазмы.
- 3) Способ управления процессом пучково-плазменной поверхностной модификации полимерных материалов посредством локализации облака гибридной плазмы в заданной зоне реакционного объема сканирующими и импульсно-периодическими электронными пучками. Способы управления

- реакционным объемом с помощью задания специальных алгоритмов сканирования электронного пучка.
- 4) Результаты исследований химического состава и биологических свойств поверхности полимеров, модифицированных в плазме, возбуждаемой или управляемой сканирующими и импульсно-периодическими электронными пучками.

Апробация работы:

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях, симпозиумах и научных семинарах:

1. VIII Международный симпозиум “Теоретическая и прикладная плазмохимия”, г. Иваново, Россия, 2018.
2. 61-я Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2018.
3. 14-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва, 2019.
4. 12th International Conference on “Plasma Assisted Technologies”, Yalta, Russian Federation, 2019.
5. XXVI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», г. Судак, ТОК «Судак», 2019.
6. II Ежегодный Саммит молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки», г. Сочи, Россия, 2019 г.
7. 62-ой Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2019.
8. 27-я научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», г. Судак, ТОК «Судак», 2020.
9. 63-ой Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2020.

Публикации автора по теме диссертации:

По теме диссертации опубликовано 10 работ в том числе 10 статей в журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём диссертации:

Диссертационная работа объемом 108 страниц состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов, 5 глав экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов. Работа содержит 6 таблиц и 35 рисунков. Список литературы включает 31 отечественных и 103 иностранных работ.

Вклад автора:

Автор принимал непосредственное участие в планировании экспериментов и в выборе методик их проведения. Им была получена значительная часть экспериментальных данных, проведен их анализ и

обобщение. Автором сформулированы выводы и рекомендации по практическому использованию результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость результатов.

Первая глава содержит краткий обзор наиболее значимых работ, посвященных технике генерации, исследованиям свойств и различных характеристик распадающейся ЭПП и гибридной плазмы, управляемой электронными пучками. Рассматривается модификация полимеров в плазме этих типов. В отдельном разделе представлен обзор работ, посвященных описанию свойств, методов получения и применений градиентных материалов, при этом особое внимание уделено использованию таких материалов в биологии и медицине. Результаты анализа литературных данных определили постановку задач, а также подтвердили актуальность и новизну диссертационной работы.

Глава 2 посвящена описанию материалов и методов, использованных для анализа структуры и свойств поверхности исходных и плазменно-модифицированных полимеров. Эксперименты выполняли на пленках полиэтилентерефталата (ПЭТ) и пластинках полиметилметакрилата (ПММА). Для обработки были также использованы культуральные 24-луночные планшеты, изготовленные из полистирола, tissueculture-treated (Corning, США). Состав и структура полимерных поверхностей были охарактеризованы с помощью ИК-спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Гидрофильно-гидрофобные свойства поверхности образцов характеризовали путем измерения краевого угла смачивания по дистиллированной воде θ и вычисления свободной поверхностей энергии (SFE). Биологические свойства полимерных материалов оценивали по их цитотоксичности с помощью МТТ-теста.

В главе 2 описаны установки и техника генерации ЭПП и гибридной плазмы. ЭПП генерировали путем инъекции ЭП в плотные газообразные среды [4]. Гибридная плазма образуется при одновременном действии на плазмообразующую среду ЭП (основной ионизатор) и ВЧ-разряд с частотой 13,56 МГц (дополнительный ионизатор) [7]. Геометрия, состав, температуры частиц и др. характеристики ЭПП и гибридной плазмы определяются энергией электронов E_b , током пучка I_b , а также давлением P_m , температурой T_m , химическим составом плазмообразующих сред, характеристиками ВЧ-разряда [8].

В главе 3 рассматриваются общие свойства и особенности ЭПП, генерируемой с помощью импульсного или импульсно-периодического ЭП. Анализ проводился в следующих предположениях:

1. Первоначально ЭПП генерируется непрерывным ЭП или импульсом ЭП большой длительности. Свойства и состав плазмы до отсечки ЭП

известны, и традиционные подходы [8-9] могут быть использованы для характеристики исходного состояния плазмы в реакционном объеме;

2. Распадающаяся плазма рассматривается как последовательность квазистационарных состояний плазмы.
3. Плазма распадается самопроизвольно.
4. За распад плазмы ответственны многочисленные процессы наработки и гибели частиц. Процессы потери электронов ответственны за эволюцию электронной плотности n_{ep} , а процессы деактивации возбужденных состояний частиц плазмы вызывают оптическое излучение ЭПП. Для описания квазистационарных состояний распадающейся ЭПП использовались следующие параметры:
 - электронная плотность n_{ep} ;
 - плотности нейтральных частиц (молекул и атомов) в основных состояниях;
 - плотности молекулярных и атомарных ионов в основных состояниях;
 - плотности тяжелых нейтральных и заряженных частиц в возбужденных состояниях;
 - температура электронов T_e .

Все параметры распадающейся ЭПП являются функциями времени t . Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в распадающейся ЭПП не является максвелловской и изменяется во времени. Релаксацию ЭПП можно охарактеризовать временем нейтрализации плазмы ($n_{ep} \rightarrow 0$), и временем дезактивации плазмы (когда все возбужденные частицы исчезают). В качестве характеристики скорости распада (времени жизни) плазмы удобно принять время, необходимое для уменьшения вдвое электронной плотности, $\tau_{1/2}$. Рассчитанные значения $\tau_{1/2}$ в различных газах в зависимости от давления газа при температуре 300 К представлены на Рис. 1 [9]; расчеты выполнены по кинетическим схемам ЭПП, предложенным Н.Л. Александровым.

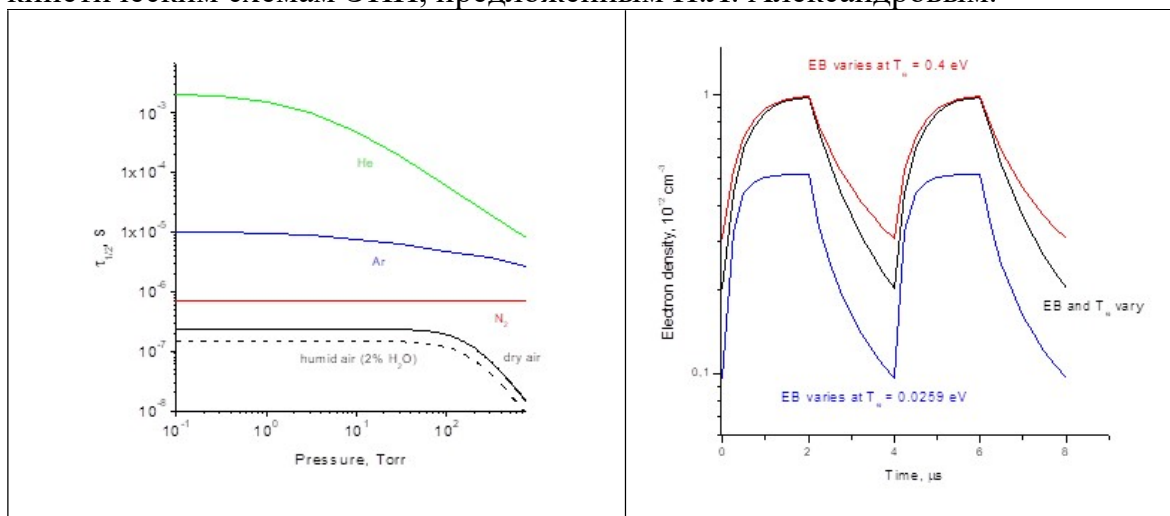


Рис. 1. Время, необходимое для уменьшения вдвое начальной

Рис. 2. Эволюция во времени электронной плотности $n_{ep}(t)$ в

концентрации электронов $n_{ep0} = 10^{12}$ см ⁻³ при распаде ЭПП различных газов, в зависимости от давления P_m .	периодически генерируемой и распадающейся плазме воздуха при наложении внешнего электрического поля: $P_m = 1$ Торр, $T_m = 300$ К.
---	---

В импульсно-периодическом режиме свойства плазмы сильно зависят от соотношения между длительностью импульса ЭП (τ_g) и длительностью паузы до его следующего включения (τ_d). Эволюция во времени электронной плотности в периодически генерируемой и распадающейся гибридной воздушной плазме при $P_m = 1$ Торр и $T_m = 300$ К показана на Рис. 2 [9]. На этом рисунке черная кривая относится к режиму, когда ЭП и электрическое поле одновременно выключаются и включаются. Красная кривая соответствует импульсно-периодической инжекции ЭП, но при этом электрическое поле остается постоянным, так что $T_e = 0,4$ эВ. Синяя кривая иллюстрирует распад ЭПП в нулевом электрическом поле и приведена для сравнения. Мощности ЭП и электрического поля имеют значения, при которых максимальная концентрация электронов и температура электронов составляют, соответственно, 10^{12} см⁻³ и $0,4$ эВ. Длительности импульса и паузы между импульсами одинаковы: $\tau_g = \tau_d = 2$ мкс.

Влияние электрического поля на величину $\tau_{1/2}$ проявляется, главным образом, через изменение температуры электронов, причем для ЭПП кислорода и кислородосодержащих газовых смесей этот процесс является весьма существенным.

Вблизи твердой стенки контейнера плазма может распадаться за счет амбиполярной диффузии электронов и ионов. Оценки показали, что в условиях наших плазмохимических реакторов влиянием твердой стенки и диффузии к ней заряженных частиц на распад плазмы можно пренебречь.

В главе 4 приводятся техника экспериментального исследования распада (а именно эволюции во времени электронной плотности и интенсивности излучения) ЭПП аргона и кислорода, генерируемой внутри диэлектрического контейнера цилиндрической геометрии, стенки которого ограничивали радиальные размеры плазменного объема.

В разделе 4.1 дано описание генератора ЭПП, который является автоматически управляемым и оснащен диагностическим комплексом, отображающим данные о режимах работы, основных свойствах плазмы и параметрах обработки материалов. Реактор имеет несколько подсистем [7]:

- генератор электронно-пучковой плазмы, основными элементами которого являются электронная пушка триодного типа, источник ее

питания и выводное окно, предназначенное для транспортировки электронных пучков из вакуума в плотную плазмообразующую среду.

- система подачи газа, обеспечивающая формирование плазмообразующей среды заданного химического состава и поддерживающая требуемое давление P_m ;
- вспомогательные системы, включая вакуумные насосы с запорно-регулирующей арматурой, защиту от неиспользуемого рентгеновского излучения, систему охлаждения и некоторые другие.

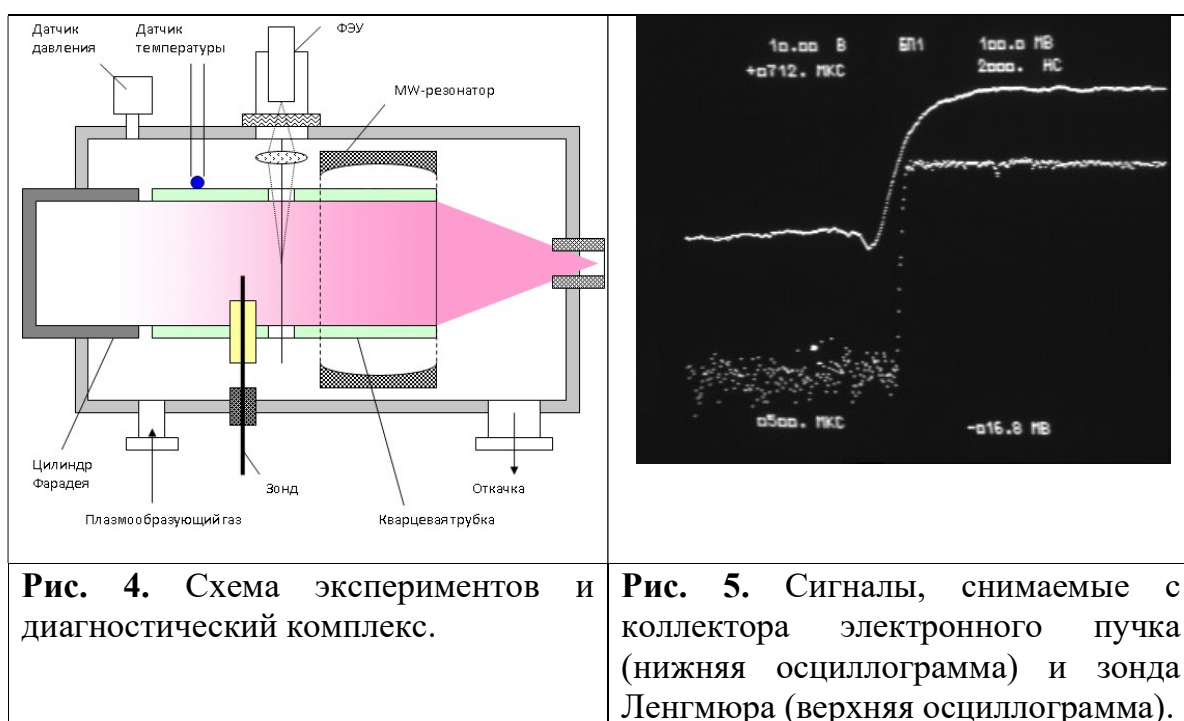
Для генерации импульсно-периодических пучков на управляющий электрод пушки подаются импульсы запирающего напряжения. Блок модуляции ЭП встроен в источник питания и позволяет непрерывно формировать меандр импульсов электронного пучка с частотой 1-300 Гц. Длительность импульсов могла варьироваться в диапазоне 0,5 с -1 мс, а скважность импульсов – в диапазоне 0,2-0,8.

Работа электронной пушки и источника высокого напряжения управляется контроллером ЭП, который поддерживает ток пучка, ускоряющее напряжение и параметры модуляции в соответствии с заданными установками (раздел 4.2). Сканирование ЭП осуществлялось специальным программируемым свип-контроллером SyconEBS-530 (США).

Для решения задач диссертационного исследования были разработаны два алгоритма отклонения ЭП, а именно:

1. Вращение оси инжекции пучка по концентрическим окружностям (или эллипсам) с остановками в определенных точках каждой окружности (эллипса). При этом можно варьировать:
 - Диаметры окружностей (или длины главных осей эллипсов);
 - Длительность остановки пучка в каждой точке траектории от нуля до нескольких секунд;
 - Скорость перемещения пучка от точки к точке.
2. Линейное перемещение оси инжекции пучка вдоль некоторой прямой с остановками пучка в определенных точках этой прямой. При этом можно было изменять:
 - Амплитуду сканирования;
 - Ориентацию и расположение отрезка сканирования в плоскости (x,y) , перпендикулярной оси инжекции ЭП z ;
 - Длительность остановки пучка в каждой точке траектории;
 - Скорость перемещения пучка от точки к точке.

Примеры паттернов сканирования пучка в плоскости (x,y) для обоих алгоритмов сканирования представлены на Рис. 3.



В **разделе 4.3** описана схема измерений с помощью электростатических зондов Ленгмюра, а в **разделе 4.4** приведены результаты предварительных тестов при регистрации излучения ЭПП и оптических измерениях. Для широкополосных измерений интегральной интенсивности излучения ЭПП в реакционной камере использовался фотоумножитель ФЭУ-106, диапазон длин волн постоянной чувствительности которого лежит в пределах $\lambda = 300-800$ нм. Схема проведения экспериментов иллюстрируется рисунком 4.

В **главе 5** представлены результаты физических экспериментов, постановка которых была рассмотрена в главе 4. В **разделе 5.1** подробно описана процедура проведения эксперимента при различных условиях генерации ЭПП и частотах модуляции ЭП в диапазоне 10-250 Гц. Давление газа (P_m), ток пучка, (I_b), время предварительного нагрева реакционной камеры

($t_{heating}$) и время предварительной дегазации и промывки рабочей камеры чистым аргоном варьировались.

В разделе 5.2 приводятся результаты зондовых измерений, выполненных в плазме аргона. Измерялось время, за которое плотность электронов уменьшалась на порядок с $n_{ep0} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $n_{ep} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Совокупность накопленных экспериментальных данных показывает, что:

1. При умеренном энергетическом воздействии ($I_b < 5 \text{ мА}$, $P_m < 5 \text{ Торр}$) типичная продолжительность полного спада ЭПП τ_d находится в диапазоне 300-500 мкс. Такие значения τ_d были получены как в свободной плазме, так и в ЭПП, локализованной внутри реакционной камеры диаметром 20 мм.
2. Функция $n_{ep}(t)$ состоит из двух участков, соответствующих двум фазам распада ЭПП:
 - На первом этапе распад ЭПП происходит очень быстро. К сожалению, на этой стадии точная кинетическая кривая $n_{ep}(t)$ не может быть распознана из-за ограничений, накладываемых инерционностью системы управления током пучка: время отсечки ЭП $\tau_b \approx 30\text{-}40 \text{ мкс}$.
 - Вторая стадия распада ЭПП более затянута, и электронная плотность убывает достаточно медленно, по крайней мере, в сравнении с τ_b (см. Рис. 5).
3. На форму осциллограммы зондового сигнала влияет время предварительной промывки рабочей камеры чистым аргоном. Мы предположили, что недостаточная очистка аргона от воздуха, десорбируемого со стенок рабочей камеры установки при кратковременной промывке, влияет на процесс распада. Для подтверждения этого предположения было проведено сравнение полученных осциллограмм распадающейся плазмы различных газовых сред:
 - а) аргон после кратковременной промывки камеры длительностью 1 мин (предполагается, что аргон загрязнен воздухом);
 - б) воздух;
 - в) кислород;
 - г) аргон после продолжительной промывки (5 минут и дольше); при этом предполагается, что загрязнение Ar воздухом не превышает 0,1%, что соответствует сертификату завода-поставщика газа.

Сравнение осциллограмм показало, что кривая затухания сигнала зонда в случаях «а», «б» и «в» имеют одинаковый вид, тогда как кривая затухания в случае «г» отличается от всех трех предыдущих. Типичные значения времени распада плазмы после продолжительной промывки также составляли 300-500 мкс. К сожалению, время распада воздушной плазмы и, особенно плазмы кислорода, нам измерить не удалось: оно оказалось слишком коротким (значительно меньше 50 мкс).

4. Наибольшее время распада ЭПП аргона ($\tau_d \approx 1,8$ мс) было получено, когда температуры газа и стенок реакционной камеры были ~ 1000 К, а реакционная камера была тщательно промыта чистым аргоном.

Таблица 1 показывает, как время распада ЭПП увеличивается с ростом давления газа. Этот эффект, по-видимому, объясняется нагревом газа: температура реакционной камеры повышается с ростом давления газа. В наших экспериментах температура реакционной камеры увеличивалась от 300 К до 500 К. Нагрев аргона:

- вызывает разрежение газа,
- увеличивает исходную электронную плотность,
- уменьшает влияние загрязнения воздухом.

Таблица 1. Влияние давления газа на время распада ЭПП аргона: $U = 27$ кВ, $I_b > 7,5$ мА, $z_0 = 135$ мм, длительная промывка рабочей камеры чистым аргоном.

P_m , Торр	3,0	5,0	7,0	10,0	13,0	16,0
τ_d , мкс	242	475	715	845	1015	1100

Накопленные экспериментальные данные показывают, что в условиях проводившихся экспериментов ($U = 25-30$ кВ, $I_b = 2-10$ мА, $P_m = 1-20$ Торр):

1. Характерные времена распада ЭПП аргона τ_a не превышают 1000-2000 мкс.
2. Короткоживущие возбужденные частицы ЭПП аргона ответственны за 95 % суммарной энергии, высвечиваемой плазменным облаком: плазма высвечивает 95% полной энергии за первые ~ 10 мкс своего послесвечения.
3. Вклад долгоживущих возбужденных частиц ЭПП аргона, как правило, не превышает 5% полной энергии, высвечиваемой плазмой после выключения ЭП, т.е. за время 10-1000 мкс (может быть, 2000 мкс) плазма высвечивает только несколько процентов энергии своего послесвечения.

Объединяя данные, полученные в зондовых и оптических измерениях, можно заключить, что для описания процесса распада ЭПП можно ввести набор временных интервалов:

- продолжительность быстрого падения электронной плотности, τ_{d1} ;
- продолжительность «хвоста» релаксации электронной плотности, τ_{d2} ;
- продолжительность быстрого спада интенсивности излучения, τ_{a1} ;
- продолжительность длительного послесвечения, τ_{a2} .

Соотношение этих времен по порядку величины иллюстрируется Таблицей 2.

В разделе 5.3 приведены результаты исследований интегральной интенсивности излучения распадающейся ЭПП в зависимости от времени, т.е. функции $B(t)$. В этих экспериментах время жизни ЭПП характеризовалась длительностью послесвечения плазмы τ_a .

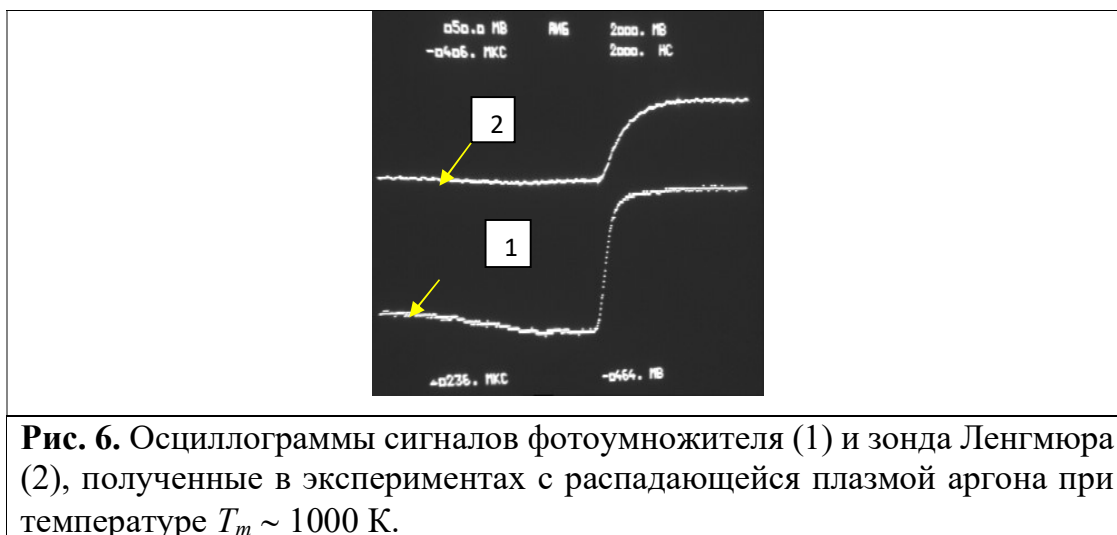


Таблица 2. Характерные времена различных фаз распада ЭПП, полученные в зондовых и оптических измерениях.

τ_{d1}	τ_{d2}	τ_{a1}	τ_{a2}
$\sim 10\text{-}100$ мкс	~ 1 мс	~ 10 мкс	$\sim 0,1\text{-}1$ мс

Главный вывод этой серии экспериментов: послесвечение ЭПП спадает синхронно с электронной плотностью, но с разным темпом: как правило, B спадает быстрее, чем n_{ep} (см. Рис. 6). Однако, в переходных (по величине P_m) режимах работы пучково-плазменного реактора был обнаружен диапазон давлений, в пределах которого время высвечивания удаленной ЭПП аргона, достигает 1-10 мс и даже 100. Явление наблюдалось в экспериментах по генерации ЭПП в цилиндрической реакционной камере с отверстием в боковой стенке (см. Рис. 7а). Через это отверстие плазма, предварительно возбужденная электронным пучком внутри замкнутого объема, могла со скоростью $w \sim 1\text{-}10$ м/с истекать наружу; давление P_m варьировалось в диапазоне 1-5 Торр, а давление в окружающем пространстве поддерживалось постоянным на уровне 0,5 Торр. При этом в некоторых переходных режимах наблюдается распад светящейся зоны на отдельные сгустки, отдаленно напоминающие страты (см. Рис. 7б).



Крайне важно отметить, что перечисленные выше характерные времена n_{ep} -эволюции и B -эволюции в ЭПП аргона и многих других чистых плазмообразующих газов сильно зависят от примесей. Даже небольшое загрязнение (0,01-0,1% воздухом и, особенно, кислородом) способно сократить время распада ЭПП аргона на 1-2 порядка по сравнению с распадом плазмы чистого Ar, причем время послесвечения более чувствительно к примесям, чем время гибели электронов [8, 9].

Для подтверждения возможности получения градиентных материалов в пучково-плазменных реакторах непрерывного и импульсно-периодического действия были проделаны демонстрационные и модельные (близкие к натурным) технологические эксперименты, которые подробно описаны в **разделе 5.5**. В первой серии экспериментов (**раздел 5.5.1**) в ЭПП были получены образцы ПММА с одномерным градиентом шероховатости поверхности (Рис. 8). Обработка проводилась в импульсно-периодическом режиме генерации ЭПП, причем управление экспозиционными дозами облучения, накапливаемыми различными зонами образца, осуществлялось интегрированием числа импульсов, которые вырабатывались фотодиодом ВРХ-90 как отклик на каждый импульс ЭП (см. Рис. 4).



Рис. 8. Образец с градиентно-изменяющейся прозрачностью, полученный в результате обработки ПММА в электронно-пучковой плазме аргона: $U = 27$ кВ, $I_b = 1$ мА; P_m изменялось в диапазоне 0,5-5 Торр.

Зависимость интегральной интенсивности излучения слоя ЭПП аргона от давления плазмообразующего газа (т.е. функция $B(P_m)$) на различных расстояниях z_0 от выводного устройства показана на Рис. 9. При изменении P_m максимум функции $B(P_m)$ смещается: с ростом P_m этот максимум сдвигается в сторону выводного устройства (Рис. 4). Это свидетельствует о том, что при изменении давления в реакционной камере изменяется продольный профиль плотности активных частиц плазмы. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете экспозиционной дозы облучения различных зон поверхности образца при варьировании P_m . Если давление в реакционной камере изменяется достаточно медленно, то в импульсно-периодическом режиме работы реактора эта доза пропорциональна количеству импульсов, регистрируемых фотоприемником, на малом интервале изменения P_m . Зная зависимость давления в реакционной камере от времени $P_m(t)$ и величину дозы, которую должна накопить каждая зона образца для формирования требуемого градиента свойств поверхности, можно построить алгоритм управления числом импульсов ЭП по времени.

Во второй серии экспериментов (**раздел 5.5.2**) обработке в гибридной плазме подвергались образцы ПЭТ и ПММА, а также изделия сложной геометрии, применяемые в медицинских и биологических лабораториях, а именно 24-луночные планшеты для работы с клеточными культурами.

Методика проведения эксперимента иллюстрируется Рис. 10. Образец 2 устанавливался в зазоре между сетчатым активным ВЧ-электродом 4 и плоским пассивным (заземленным) электродом 1. В пространстве между электродами 1 и 4 зажигается ВЧЕ-разряд 3. Сквозь сетку электрода 4 инжектируется сканирующий электронный пучок 5; сканирование ЭП в плоскости $\{x,y\}$ осуществляется электромагнитной отклоняющей системой 6.

На Рис. 11 показан процесс обработки планшета в гибридной плазме аргона непрерывным, но равномерно сканирующим, электронным пучком: режим сканирования подбирался таким образом, чтобы пучок не останавливался в каких-либо положениях. В других экспериментах, напротив, положение ЭП фиксировалось на определенное время для формирования точечных паттернов (см. Рис. 12), сам ЭП был импульсно-периодическим. Счетчик импульсов считал количество импульсов в каждом положении пучка, что и определяло экспозиционную дозу облучения образца в данной зоне.

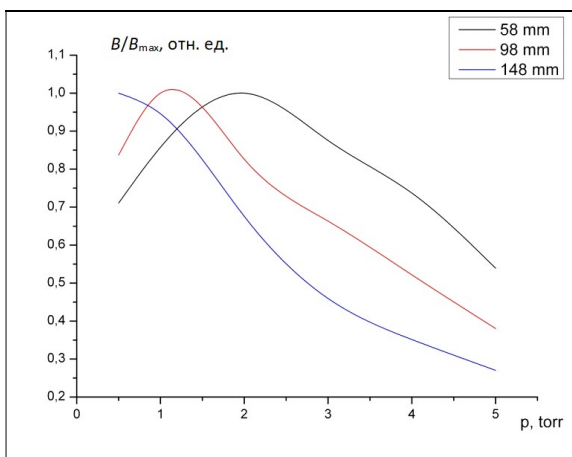


Рис. 9. Зависимость интегральной интенсивности излучения слоя ЭПП, расположенного на различных расстояниях z_0 от выводного окна аргона, как функция давления P_m . Данные получены совместно с Йе Хлаинг Туном.

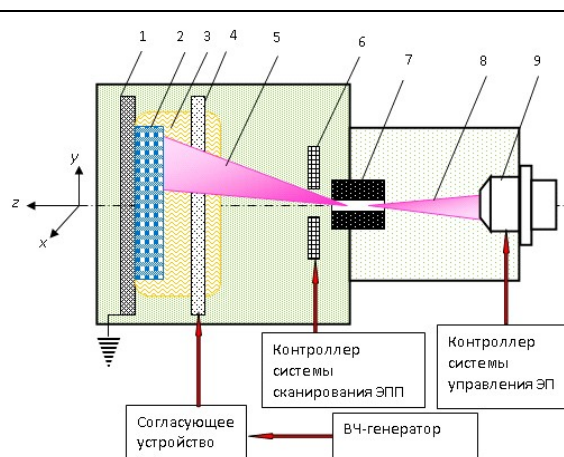


Рис. 10. Постановка эксперимента по обработке изделий сложной геометрии в гибридной плазме: 1 – пассивный ВЧ-электрод, 2 – обрабатываемое изделие, 3 – зона ВЧ-разряда, 4 – активный ВЧ-электрод, 5 – зона ЭПП, 6 – система сканирования облаком ЭПП, 7 – выводное окно, 8 – электронный пучок, 9 – электронно-лучевая пушка.

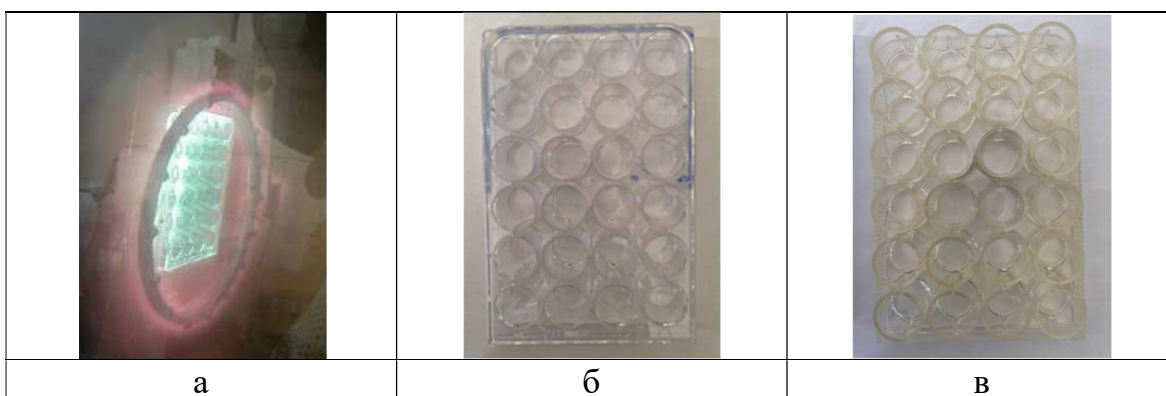
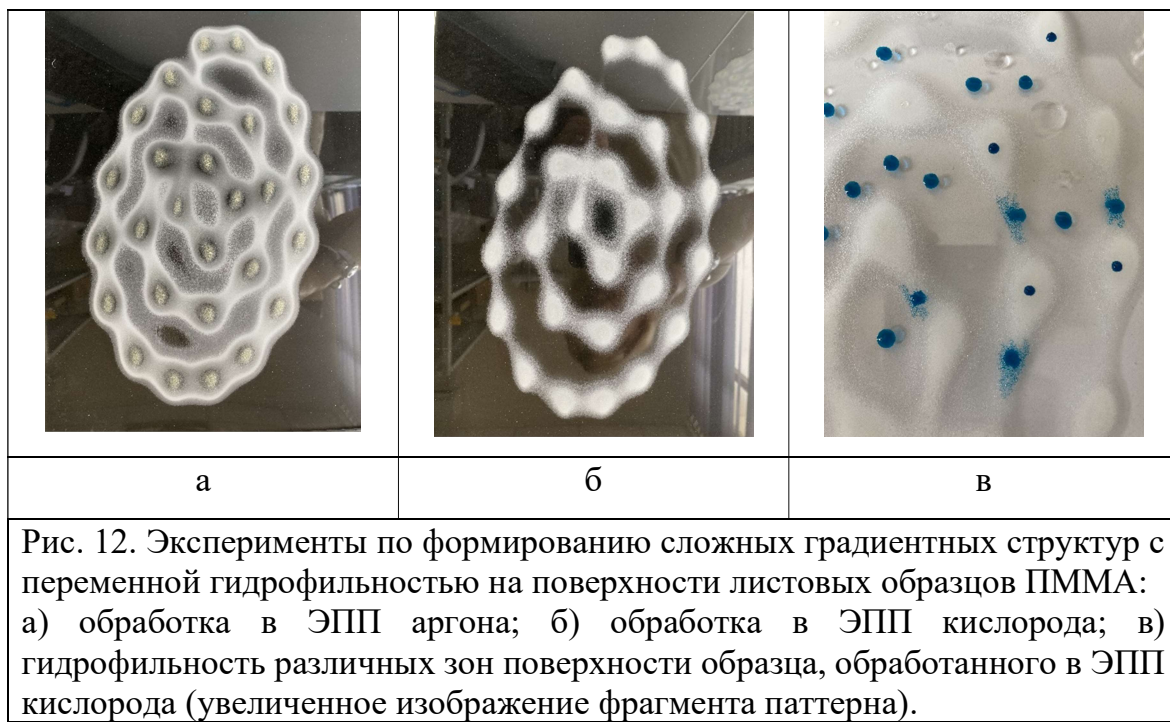


Рис. 11. Обработка полимерных изделий сложной геометрии (культуральный 24-луночный планшет Corning, США) в гибридной плазме, управляемой сканирующим электронным пучком: а) процесс обработки, б) фотография планшета до обработки, в) фотография планшета, обработанного в гибридной плазме.

Рис. 12 иллюстрирует эксперименты по формированию сложных двумерных градиентных структур на поверхности полимерных материалов. В экспериментах с различными плазмообразующими газами в диапазоне давлений $P_m = 1-5$ Торр удалось получить весьма сложные градиентные

паттерны с переменной гидрофильностью. Как было показано в работе [10], гидрофильно-гидрофобные свойства полимерных материалов во многом определяют их биологические свойства, приобретенные в результате пучково-плазменной обработки.



Таким образом, результаты экспериментов, описанных в разделе 5.5, показывают, что на поверхности полимерных изделий двумерной или сложной трехмерной геометрии можно формировать структуры с распределенными, в том числе градиентно-распределенными, свойствами (например – биологической активностью), изменяющимися по определенному закону. Требуемый эффект обработки изделия в плазме выбранного газа может быть достигнут за счет подбора алгоритма сканирования ЭП или параметров, характеризующих импульсно-периодический режим генерации плазмы.

В разделе 5.6 приведены данные анализа химического состава и свойств поверхности полимеров после их обработки в электронно-пучковой и гибридной плазме. Установлено, что в результате обработки в гибридной плазме на поверхности полимеров формируются кислородсодержащие карбонильные и карбоксильные функциональные группы, что и увеличивает гидрофильность поверхности.

При проведении биологических испытаний показан высокий уровень выживаемости клеток для всех образцов плазменно-модифицированного ПЭТ. Такой уровень сопоставим с контрольным образцом – необработанной ПЭТ-пленкой. Статистически значимое снижение выживаемости наблюдалось только после 96 ч инкубации клеток с образцом, обработанным плазмой ВЧ-разряда. В то же время ПЭТ, обработанный в гибридной плазме полностью сохранял свою биологическую совместимость. Следует отметить, что

аналогичный эффект был отмечен и в повторной серии экспериментов: при сравнении ПЭТ, модифицированных в ВЧ-разряде, ЭПП и гибридной плазме, после 120 ч инкубации максимальный процент жизнеспособных клеток оказывался на полимере, обработанном именно в гибридной плазме. Этот результат еще раз демонстрирует преимущества гибридной плазмы в сравнении с ЭПП и плазмой ВЧЕ-разряда в приложениях, связанных с обработкой материалов и изделий медико-биологического назначения.

В **заключении** обобщены основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сформулированы выводы.

ВЫВОДЫ

1. На основе существующего электронно-пучкового плазмохимического реактора создана установка, позволяющая проводить физические и технологические эксперименты с электронно-пучковой и гибридной плазмой в импульсно-периодическом режиме генерации, а также с плазмой, возбуждаемой сканирующим электронным пучком в сводном объеме и внутри диэлектрических контейнеров.
2. Получены экспериментальные данные об эволюции во времени электронной плотности в распадающейся ЭПП аргона в зависимости от параметров генерации ЭПП, а также данные о времени высвечивания распадающейся ЭПП. На основании полученных данных установлены характерные времена различных фаз распада ЭПП.
3. Экспериментально обнаружено свечение потока удаленной плазмы, истекающего из контейнера, заполненного ЭПП аргона. Измерение времени полного высвечивания удаленной плазмы позволяет сделать предположение о существовании долгоживущих электронно-возбужденных состояний в ЭПП аргона в форвакуумном диапазоне давлений. В переходных режимах работы пучково-плазменного реактора с изменяющимся давлением плазмообразующего газа в потоке удаленной плазмы могут наблюдаться периодические структуры, подобные стратам.
4. Предложены способы управления реакционным объемом с помощью задания специальных алгоритмов сканирования импульсно-периодического электронного пучка. Это позволяет контролировать интегральную дозу воздействия химически активных частиц плазмы на материал в каждой локальной зоне обрабатываемой поверхности и, тем самым, обеспечивать требуемый результат пучково-плазменной обработки, а также исключить радиационное и термическое повреждение материала.
5. Показана возможность получения в плазме, управляемой импульсно-периодическим или сканирующим электронным пучком, материалов с заданным распределением поверхностных свойств. Таким способом были получены биосовместимые градиентные полимерные материалы для работы с клеточными культурами, в том числе изделия, имеющие сложную

пространственную геометрию, а также одномерные и двумерные паттерны.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. *Зау Йе Мьинт, Кхин Маунг Хтау, Хтет Вэй Ян Чжо, Хтет Ко Ко Зау, Т. М. Васильева.* Модификация тонких пленок хитозана в электронно-пучковой плазме // **Прикладная физика**. – 2019. – №. 1 - С. 71 – 76. (Статья)
2. *Хтет Ко Ко Зау, Зау Йе Мьинт, Т.М. Васильева.* Пучково-плазменные технологии получения хитоолигосахаридов с фитостимулирующими свойствами // **ТРУДЫ МФТИ**. 2019. Том 11, № 1. С. 140 – 145. (Статья)
3. *Васильева Т.М., Васильев М. Н., Гараева В.В., Злобин И.С., Зау Й. М., Кхин Маунг Хтау, Хтет В. Я., Хтет Ко Ко Зау.* Гибридная плазма - перспективы применения для медицины и биологии // **Изв. вузов. Физика**. № 11. С. 123–131. DOI: 10.17223/00213411/62/11/123. 2019. (Статья)
4. *T.M. Vasilieva., I.K. Naumova., O.V. Galkina., E.V. Udoratina., L.A. Kuvshinova., M.N. Vasiliev, Khin Maung Htay., Htet Ko Ko Zaw.* Electron-Beam Plasma for Biopolymers Modification // **IEEE Trans. Plasma Sci.** 2020.V. 48. P. 1035–1041. DOI: 10.1109/TPS.2020.2980200.(Статья)
5. *Васильева Т.М., Кудасова Е.О., Кочурова Е.В., Акасов Р.А., Васильев М.Н., Хтет Ко Ко Зау, Хтет Вэй Ян Чжо.* Применение низкотемпературной плазмы пониженного давления в клинической медицине и фармацевтике // **НАНОИНДУСТРИЯ**, С. 220-227.DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.2s.220.227.2020. (Статья)
6. *Зау Йе Мьинт, Хтет Ко Ко Зау, Т.М.Васильева.* Электронно-пучковая плазменная обработка порошков и растворов хитозана: возможности и технологические подходы // **ТРУДЫ МФТИ**. 2020. Том 12, № 2. С. 36-43. (Статья)
7. *T. M. Vasilieva., M. N. Vasiliev, V. V. Garaeva, I. S. Zlobin, ZawYeMint, Khin Maung Htau., Htet Wai Yan Kyaw., Htet Ko Ko Zaw.* Hybrid Plasma – Prospects for Application in Medicine and Biology // **Russian Physics Journal**, Vol. 62, No. 11, pp. 2092–2100. DOI: 10.1007/s11182-020-01951-6. March, 2020. (Статья)
8. *Хтет Ко Ко Зау, Т.М.Васильева, Аунг Чжо У, Йе Хлаунг Тун, Васильев М.Н., Виноградов М.И., Макаров И.С.* Комбинированная плазма в процессах обработки волокон // **НАНОИНДУСТРИЯ**, С. 251-264.DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.6s.251.264. 2021. (Статья)

9. Хлаинг Тун Йе, Чжо У Аунг, Васильев М. Н., **Хтет Ко Ко Зау**, Мин Маунг Зин, Зар Аунг Яр. Управление электростатической зарядкой твердых тел в каналах, заполненных электронно-пучковой плазмой // **ТРУДЫ МФТИ**. 2021. Том 13, № 1. С. 65-70. (Статья)
10. **Хтет Ко Ко Зау**, Т.М. Васильева, Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Т.Г. Шикова. Сравнение химического состава и гидрофильных свойств поверхности органических полимеров, обработанных в различных видах низкотемпературной плазмы // **Химия высоких энергий**. 2021. Том. 55, № 4. С. 303–309. (Статья)

Тезисы докладов

1. Зау Йе Мьинт, Кхин Маунг Хтау, **Хтет Вэй Ян Чжо**, **Хтет Ко Ко Зау**, Т.М.Васильева. Пучково-плазменные технологии переработки природных полимеров // VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, Россия, 2018, 100-103.
2. **Хтет Ко Ко Зау**, Зау Йе Мьинт, Т.М. Васильева. Пучково-плазменные технологии получения хитоолигосахаридов с фитостимулирующими свойствами // 61-я Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2018, 216-217.
3. **Хтет Вэй Ян Чжо**, Кхин Маунг Хтау, Зау Йе Мьинт, **Хтет Ко Ко Зау**, Т.М. Васильева. Возможности применения неравновесной низкотемпературной плазмы, генерируемой при пониженном давлении, для переработки природных полимеров // 14-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва, 2019, 88-92.
4. Т.М. Vasilieva, I.K. Naumova, O.V. Galkina, **Htet Ko Ko Zaw**. Electron-Beam Plasma for Agriculture: Production of Chitosan Oligomers with Crop-Stimulating Properties // Conference 12th International Conference on “Plasma Assisted Technologies”, Yalta, Russian Federation, 2019, 40-43.
5. Васильева Т.М., Кудасова Е.О., Кочурова Е.В., Акасов Р.А., Васильев М.Н., **Хтет Вэй Ян Чжо**, **Хтет Ко Ко Зау**. Применение низкотемпературной плазмы пониженного давления в клинической медицине и фармацевтике // XXVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», г. Судак, ТОК «Судак», 2019, 220-227.
6. **Хтет Ко Ко Зау**. Получение биосовместимых медицинских полимерных материалов в низкотемпературной гибридной плазме // II Ежегодный Саммит молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки», г. Сочи, Россия, 2019 г, 100-101.
7. Зау Йе Мьинт, **Хтет Ко Ко Зау**, Т.М. Васильева. Электронно-пучковая плазменная обработка порошков и растворов хитозана: возможности и

технологические подходы // 62-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2019, 223-224.

8. *Хмет Ко Ко Зау, Т.М. Васильева, Аунг Чжо У, Йе Хлаинг Тун, Васильев М.Н., Виноградов М.И., Макаров И.С.* Комбинированная плазма в процессах обработки волокон // 27-я научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», г. Судак, ТОК «Судак», 2020, 133-140.
9. *Хмет Ко Ко Зау, Т.М. Васильева.* Перспективы модификации органических полимерных материалов в пучково-плазменных системах // 63-я Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2020, 288-289.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Naebe, K. Shirvanimoghaddam. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties // *Applied Materials Today*. – 2016. V. 5. – P. 223–245.
2. A.V. Chumaevskii, T.A. Kalashnikova, A.O. Panfilov et al. The formation of bimetallic materials by the electron-beam additive manufacturing // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – V. 1079. – P. 042014doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042014
3. K.N. Kalashnikov, K.S. Osipovich, T.A. Kalashnikova. The regularities of copper-aluminum system polycrystalline samples manufacturing by the additive electron-beam technology// *Materials Science Forum*. – 2020. - V. 992. – P. 517-522.
4. М.Н. Васильев. Применение электронно-пучковой плазмы в плазмохимии // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Под ред. В.Е. Фортова. Т. XI. М.: Наука, 2001. С. 436-445.
5. P. Favia, R. d'Agostion Plasma treatment and plasma deposition of polymers for biomedical applications // *Surf. Coat. Technol.* – 1998. - V. 98., N 1-3. – P. 1102-1106.
6. H. Biederman Plasma polymers and some biomedical applications // *European Cells and Materials* – 2003. – V. 6., Suppl. 1. – P. 28.
7. M. Vasiliev, T. Vasilieva, Aung Miat Hein. Hybrid plasma chemical reactors for bio-polymers processing // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2019. - V. 52. N 33 – P.335202 doi:10.1088/1361-6463/ab222a
8. М.Н. Васильев. Экспериментальное исследование генерации и приложений неравновесной низкочастотной электронно-пучковой плазмы // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва - 1998 г.
9. С.Л. Лысенко. Численное моделирование электронно-пучковой плазмы в объеме, ограниченном твердыми стенками // диссертация на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва - 2005 г.

10.Т.М. Васильева. Получение биоактивных соединений и материалов на основе процессов, стимулированных пучково-плазменным воздействием на вещество // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва - 2016 г.

11.Ю.П. Райзер. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

Хтет Ко Ко Зау

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР С ПОВЕРХНОСТНО-
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ В ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛАХ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ РЕАКТОРАХ
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

Автореферат

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика
в типографии "Переплетофф"

Адрес: г. Долгопрудный, ул. Циолковского, 4.

Тел: 8(903) 511 76 03. www.perepletoff.ru

Формат 148 x 210 мм. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Тираж 20 экз.

Твердый (мягкий) переплет.

Заказ № _____. 04.10.21 г.