

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Аунг Мьят Хеин

«Гибридная плазма газовых смесей как инструмент комбинированного воздействия на полимерные материалы с целью повышения их биосовместимости», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

### **Актуальность работы**

В настоящее время неравновесная низкотемпературная плазма достаточно широко используется в различных технологических процессах, включая модификацию поверхности термически нестойких полимерных материалов, обработку питьевой воды и загрязненных промышленных стоков, создание новых материалов и т.д., при этом спектр ее потенциальных приложений постоянно расширяется. Одним из наиболее динамично развивающихся современных приложений низкотемпературной плазмы является плазменная медицина, т.е. применение неравновесной низкотемпературной плазмы для инактивации болезнетворных микроорганизмов, антибактериальной обработки живых тканей, достижения биосовместимости поверхностей различных имплантатов и т.д. Следует отметить, что для эффективного решения задач в каждой конкретной области практических приложений, в том числе, и плазменной медицине требуются свой, специфический набор оптимальных условий генерации плазмы, определение которых априори весьма затруднительно. В этой связи тема данной диссертации, направленная на разработку научных и технических основ генерации гибридной неравновесной низкотемпературной плазмы с использованием двух независимых ионизаторов, а именно, пучка быстрых электронов и высокочастотного разряда, с целью создания на ее основе эффективного инструмента обработки полимерных материалов для биомедицинских приложений, является актуальной.

### **Научная новизна**

В данной работе впервые создан гибридный плазмохимический реактор на основе пучка электронов высокой энергии и высокочастотного газового разряда, позволяющий проводить комплексные исследования процессов генерации неравновесной низкотемпературной плазмы и возможностей ее использования для модификации свойств полимерных материалов биомедицинского назначения. Впервые получены новые экспериментальные данные по формированию гидрофильно- гидрофобных свойств у ряда полимерных материалов, которые широко используются в практической медицине для изготовления различных имплантов, при их обработке в гибридной плазме газовых смесей разного состава. Изучена эволюция во времени приобретенных гидрофильно- гидрофобных свойств обработанных материалов. Впервые получены количественные закономерности, описывающие степень повышения биосовместимости полимерных материалов, модифицированных воздействием гибридной плазмы, в зависимости от параметров плазмы и условий протекания плазмохимических процессов.

### **Практическая значимость**

Как показано в настоящей диссертации, созданный гибридный плазмохимический реактор на основе пучка электронов высокой энергии и высокочастотного газового разряда



является высокоэффективным инструментом целенаправленной модификации полимерных материалов, позволяющим достигать их высокую биосовместимость с тканями человека. Разработанные алгоритмы управления параметрами гибридной неравновесной низкотемпературной плазмы открывают широкие перспективы ее использования в различных областях фундаментальной и практической клинической медицины, а также в смежных областях науки и практики.

### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения (выводов). Список литературы включает 273 наименования. Объем диссертации 123 страницы, в том числе 37 рисунков и 6 таблиц.

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, приведены цели и задачи работы, указана её научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, указан личный вклад автора.

**Первая глава** диссертации является, по сути, подробным литературным обзором, посвященном описанию основных методов и подходов, используемых при модификации поверхностных свойств полимерных материалов с помощью низкотемпературной плазмы. Автор детально анализирует различные виды газовых разрядов, которые широко используются в настоящее время в плазменных технологиях, а также механизмы и физико-химические процессы, протекающие при плазмохимической модификации полимерных материалов. В конце первой главы автор на основе материалов обзора делает выводы об актуальности выбранной темы исследований диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена описанию физико-химических и механических свойств и характеристик полимерных материалов, выбранных для модификации в гибридной плазме, а также обоснованию выбора состава плазмообразующих газовых смесей. Подробно описаны использованные в работе методы диагностики пространственной структуры, элементного химического состава и биологических свойств поверхности обработанных полимерных материалов.

**В третьей главе** приведено детальное описание принципа работы и конструкции основных функциональных узлов созданного плазмохимического реактора гибридного типа. Подробно описаны системы контроля, управления и автоматизации рабочими параметрами эксперимента, а также диагностический комплекс для измерения различных параметров гибридной плазмы. Производит хорошее впечатление широкий набор современной диагностической аппаратуры, использованный диссертантом при проведении экспериментальных исследований.

**В четвертой главе** представлены результаты численного моделирования электрофизических, тепловых и физико-химических процессов, протекающих в реакционном объеме гибридного плазмохимического реактора и на поверхности обрабатываемого образца. Выполненное математическое моделирование процесса модификации поверхности полимерных материалов позволило установить распределение температуры по поверхности образца в процессе обработки, рассчитать концентрации и потоки химически активных частиц плазмы, падающих на поверхность образца в разных положениях внутри плазмохимического реактора, определить возможности управления температурой образца и потоками активных частиц на его поверхность путем



регулирования внешних рабочих параметров плазмы. Результаты численного моделирования показали, что распределение температуры по поверхности образца, а также концентрации и потоки химически активных частиц, падающих на поверхность образца, могут существенно зависеть от положения образца внутри плазмохимического реактора, что может приводить к неоднородной обработке полимерных материалов. Диссертантом убедительно показано, что эффективными способами управления пространственным распределением энерговклада в плазму и, соответственно, распределением температуры и концентраций химически активных частиц, являются варьирование рабочего давления плазмообразующего газа и режима сканирования пучка электронов. С целью верификации результатов численного моделирования были проведены физические эксперименты по измерению распределения температуры по поверхности реакционных камер. Для ряда выбранных конструкций камер получено хорошее качественное и количественное совпадение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям компонентного состава гибридной плазмы методами масс-спектрометрии и оптической эмиссионной спектроскопии для различных составов плазмообразующей газовой смеси. Информация о составе химически активных частиц на всех стадиях процесса обработки полимерных материалов имеет важное значение для установления механизмов, ответственных за целенаправленную модификацию поверхностного слоя обрабатываемых образцов. Одним из принципиальных вопросов, решаемым в ходе этих экспериментов, являлся вопрос о степени загрязнения исходной рабочей газовой смеси газообразными продуктами, выделяющимися из полимерного образца в процессе обработки. Эти продукты могут изменить компонентный состав гибридной плазмы и оказать существенное влияние на конечный результат модифицирования поверхности. Важный результат проведенных исследований заключается в том, что в исследованном диапазоне рабочих параметров гибридной плазмы химический состав плазмообразующей среды не изменяется в процессе обработки полимерных материалов. В данной главе методом оптической эмиссионной спектроскопии проведено исследование взаимного влияния электронного пучка и высокочастотного разряда друг на друга и появления синергетических эффектов в гибридной плазме при одновременном совместном воздействии на плазмообразующий газ электронного пучка и ВЧ разряда. Обнаружено, что концентрации ряда химически активных частиц (возбужденных атомов и молекул) в гибридной плазме заметно выше, чем их сумма в электронно-пучковой плазме и плазме ВЧ разряда.

**В шестой главе** приведены результаты исследований по использованию гибридной плазмы для модификации поверхности полимерных материалов, широко применяемых в практической медицине, с целью повышения их биосовместимости с тканями организма человека. В качестве обрабатываемых материалов были выбраны образцы из полиметилметакрилата (ПММА) и силиконовой резины, которые широко используются в стоматологическом протезировании и сосудистой хирургии для изготовления протезов, дренажных трубок, катетеров и т.д. Установлено, что в зависимости от состава плазмообразующей газовой смеси плазменная модификация поверхности указанных полимеров может приводить как к повышению, так и к понижению их биосовместимости и биологической активности. Проведено сравнение эффективности модификации полимеров с использованием электронно-пучковой плазмы, плазмы ВЧ разряда и гибридной (комбинированной) плазмы. Показано, что обработка полимеров в



гибридной плазме придает их поверхности наибольшую биосовместимость. Дано качественное объяснение полученным закономерностям. Высокая эффективность использования гибридной плазмы для повышения биосовместимости образцов из ПММА с тканями организма человека была продемонстрирована на реальном пациенте, который использовал съемные зубные протезы.

**В Заключение** автор кратко формулирует наиболее существенные результаты проведенных исследований.

### **Достоверность**

Обоснованность и достоверность защищаемых положений и выводов подтверждается использованием диссертантом современного экспериментального и диагностического оборудования, а также соответствием результатов численного моделирования и физического эксперимента.

Изложенные в диссертации результаты опубликованы в 12 научных трудах, в том числе в 7 научных статьях в рецензируемых журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, а также многократно докладывались на всероссийских и международных и конференциях. Публикации полностью отражают все основные положения диссертационной работы и позволяют подтвердить личный вклад Аунг Мьят Хеин.

**К числу наиболее важных и интересных результатов**, полученных автором, следует отнести следующие:

1. Впервые обнаружено возникновение синергетических эффектов в гибридной плазме при одновременном совместном воздействии на плазмообразующий газ электронного пучка и ВЧ разряда. Установлено, что концентрации ряда химически активных частиц (возбужденных атомов, молекул, ионов) в гибридной плазме заметно выше, чем их сумма в электронно-пучковой плазме и плазме ВЧ разряда.
2. Впервые установлены закономерности, связывающие свойства биосовместимости, приобретенные в результате модификации поверхности полимерных материалов в гибридной плазме, с параметрами плазмы и условиями протекания плазмохимических процессов.

**В качестве замечаний** по диссертации можно отметить следующее:

1. При описании принципа работы созданного плазмохимического реактора гибридного типа (Глава 3) следовало бы привести данные по энерговкладу в плазму за счет электронного пучка и ВЧ разряда. Эти данные позволили бы более четко оценить вклад каждого ионизатора в процесс генерации гибридной плазмы.

2. В диссертации нет убедительного обоснования выбора высокочастотного разряда как второго ионизатора в комбинированной (гибридной) схеме. По каким соображениям (причинам) выбран именно ВЧ разряд? Почему, например, не диэлектрический барьерный разряд или высоковольтный импульсный разряд и т.д.?

3. Текст диссертации не лишен ряда опечаток и погрешностей. Так, например, на стр.76 стоит «...представлены масс-спектры кислорода и аргона, атомная масса которых

составляет 32 а.е.м.». Атомная масса аргона равняется 40 а.е.м. На стр. 77 подписи к рис. 5.1.2. и рис. 5.1.3. перепутаны местами.

Отмеченные недостатки имеют частный характер и не снижают общий высокий уровень диссертационной работы.

Диссертация Аунг Мьят Хеин является законченной научно-квалификационной работой, новизна и достоверность работы не вызывают сомнений.

Диссертационная работа Аунг Мьят Хеин отвечает всем требованиям ВАК РФ, изложенным в положении ВАК РФ «О присуждении ученых степеней» (утвержденном постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Доктор физико-математических наук  
(специальность - 01.04.08-физика плазмы)  
ведущий научный сотрудник  
Отдела неидеальной плазмы  
АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

 Трушкин Н.И.

Подпись Трушкина Н.И. заверяю  
Учёный секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
кандидат физико-математических наук

 Ежов А.А.  
