

С повышением температур полосы излучения могут смещаться и расширяться. Например, при повышении температуры люминофоров наблюдается [4]: расширение спектра излучения и смещения максимума в длинноволновую область ($ZnS \cdot Ag$, $ZnS \cdot CdS \cdot Ag$), смещение спектра излучения в коротковолновую область ($MgWO_4$), перераспределение интенсивности свечения отдельных полос [$(Zn, Be)_2SiO_4 \cdot Mn$]. В зависимости от температуры интенсивность излучения может изменяться по различным закономерностям. Для люминофора ZnS установлено увеличение интенсивности излучения при $T < 500$ К и её уменьшение при дальнейшем повышении температуры до 700 К [5]. Увеличение интенсивности может быть связано с очисткой поверхности в начале нагрева и уменьшением концентрации центров тушения, а её уменьшение вызвано локализацией возбужденных носителей заряда на дефектах.

Поэтому можно предположить, что установленное в настоящих исследованиях тушение люминесценции в видимой области спектра с увеличением температуры фотолюминофора ФЛЖ-7-11, подчиняющееся экспоненциальной зависимости, может свидетельствовать об относительной его чистоте и небольшой концентрации примесей и других дефектов, выступающих в роли гасителей излучения.

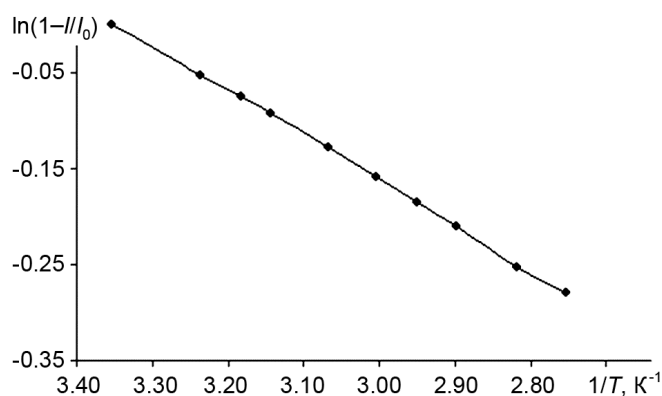


Рис. 2. Зависимость интенсивности люминесценции полосы при 570 нм люминофора ФЛЖ-7-11 от температуры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Технические характеристики люминофоров [Электронный ресурс], 2011. – Режим доступа: http://www.neon-kamensk.ru/content/luminofor_svoystva.html. – Загл. с экрана, дата обращения: 01.03.2013г.
3. Михайлов М.М., Веревкин А.С., Лапин А.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4. – С. 113–114.
4. Gergely Gy., Adam J., and Bauer Gy. T. // J. Phys. Chem. Solids. – 1963. – V. 24. – No. 5. – P. 687–691.
5. Хайрулина А.С. Эффективность белого свечения гетероструктур на основе твердого раствора $InGa_n$, с люминофором: автореф. дис. ... к.х.н. – Ульяновск, 2008. – 24 с.

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
E-mail: membrana2010@mail.ru

Поступило в редакцию 07.03.14,
после доработки – 10.02.15.

Михайлов Михаил Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. радиационного и космического материаловедения.
Юрьев Семен Александрович, аспирант;
Лапин Алексей Николаевич, ст. науч. сотр.

УДК 533.9.08

В.Л. ДЕМКИН*, Г. КИНГМА**, Р. ВАН ДЕ БЕРГ**, С.В. МЕЛЬНИЧУК*, О.В. ДЕМКИН*,
М.-С. ХЕРАДС**, В.С. РИПЕНКО*, К.А. СИТНИК*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПУЧКОВОГО ТИПА ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ¹

Ключевые слова: плазма, плазменная медицина, диагностика, моделирование.

Использование низкотемпературной плазмы для биомедицинских исследований и применения ее в медицинской практике является на сегодня объектом пристального внимания междисциплинарных групп исследователей. Это связано, прежде всего, с высокой эффективностью методов плазменной терапии и разработкой источников плазмы с заданными параметрами активных частиц [1].

Традиционно плазма в биомедицине имеет две области применения: 1) использование материалов, инструментов или приборов для обработки или операций с биообъектами; 2) применение плазмы для получе-

¹ Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

ния терапевтических эффектов при взаимодействии плазмы с живыми тканями, клетками или органами (так называемая плазменная медицина) [2].

В последнем случае в качестве источника плазмы используются газоразрядные приборы (плазмотроны) [3, 4] или приборы на основе разряда с диэлектрическим барьером [5], обеспечивающие необходимую концентрацию активных частиц в факеле плазмы.

В работах [6, 7] описан газоразрядный источник для создания импульсной плазмы, создаваемой «убегающими» электронами, генерирующимися в ускоряющем зазоре. Химический состав газа можно изменять в широких пределах, тем самым создавая среду химически активных частиц для взаимодействия и модификации поверхности вещества или живой ткани.

Для понимания процессов, происходящих на поверхности вещества при взаимодействии с плазмой, необходимо проводить детализированный анализ кинетики частиц плазмы в зависимости от химического состава газа и электрофизических параметров разряда. Наиболее распространенными методами в этом случае являются методы, основанные на решении уравнений Больцмана, или методы статистического моделирования [8, 9].

В настоящей работе рассмотрен метод определения электрофизических параметров в нестационарной плазме высоковольтного импульсного разряда с использованием метода статистического моделирования с применением суперкомпьютерных технологий.

Несмотря на широкое внедрение плазменных методов и технологий в медицинскую практику, ряд проблем, связанных с генерацией активных частиц и механизмом их воздействия на живые биологические ткани, определением «плазменных доз» и их зависимостью от кинетики активных частиц в воздушной среде, остается нерешенными. Для решения этих задач необходим комплексный подход в изучении физических закономерностей в динамике плазмы с заданными свойствами, исследовании физико-химических процессов, обеспечивающих эффективную генерацию активных частиц, влияющих на биологические объекты. Немаловажным при этом является сравнительный анализ источников и типов плазмы для биомедицинских применений, анализ генерированных плазмой активных компонент и оценка эффективности воздействия плазмы на биологические объекты. Эти данные служат основой для разработки детализированной физико-математической модели неравновесной плазмы с заданными свойствами для биомедицинских приложений. Сочетание методов моделирования с методами диагностики химического состава плазмы и кинетики ее активных компонент позволяет решить задачу управления воздействием плазмы на биологические объекты.

Традиционным подходом при описании плазмохимических процессов является подход, основанный на системе уравнений:

- Больцмана [8] для описания кинетики частиц

$$(\partial(n \cdot f) / \partial t + \mathbf{v} \cdot \text{grad}(n \cdot f) + (Z \cdot e / m) \{ \mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{H}] / c \} \text{grad}_{\mathbf{v}}(n \cdot f) = \delta(n \cdot f) / \delta t ; \quad (1)$$

- баланса

$$dN_i / dt = \sum_j A_{ij} - \sum_k B_{ik} , \quad (2)$$

где n – концентрация заряженных частиц; f – их функция распределения по скоростям \mathbf{v} ; Z – заряд частиц; e – заряд электрона; m – масса частицы; c – скорость света; N_i – концентрации химически активных компонент плазмы. Под A_{ij} и B_{ij} понимаются все процессы, приводящие к образованию (A) и гибели (B) частиц сорта N_i с соответствующими константами скоростей плазмохимических реакций, величина которых зависит от вида $f(x, t)$.

Для определения $\mathbf{E}(x, t)$, $\mathbf{H}(x, t)$ – напряженностей электрического и магнитного полей – используются уравнения Максвелла с соответствующими материальными соотношениями.

Для решения системы (1) и (2) используются упрощенные численные модели, такие, например, как [10, 11]. Основной сложностью при этом является отыскание вида $n(x, t) \cdot f(x, t)$ заряженных компонент. Особенностью плазмы, применяемой в биомедицинских целях, является повышенный диапазон давлений газа и, как следствие, наличие условий, приводящих к неравновесному состоянию плазмы, что значительно усложняет задачу анализа плазмохимических процессов.

Другим подходом решения данной задачи, более эффективным для неравновесной плазмы, является подход, развиваемый авторами и основанный на сочетании методов спектроскопической диагностики плазмы и методов численного моделирования кинетики частиц [9].

Среди методов спектроскопической диагностики используются метод эмиссионной спектроскопии плазмы, позволяющий по интенсивности спектральных линий судить о кинетике столкновительных процессов электронов с атомами плазмы, и метод штарковской спектроскопии по определению вида электрических полей в плазме [9, 12].

При моделировании динамических характеристик электронной и ионной компонент плазмы наиболее эффективным является метод Монте-Карло [13], который в качестве параметра использует распределение электрического поля в пространстве. Применение данного метода дает возможность определять не только динамические характеристики заряженных компонент плазмы, но и пространственное распределение заселенности электронных состояний атомов в результате их столкновений с электронами плазмы.

Таким образом, сравнивая пространственно-временное поведение интенсивностей диагностических спектральных линий, измеренных экспериментально, с рассчитанными в результате численного моделирования заселенностями верхних состояний соответствующих спектральных переходов, можно решить обратную задачу о распределении электрического поля в неравновесной плазме. Такая самосогласованная модель дает возможность корректировать вид функции распределения заряженных частиц и качество столкновительной модели.

В качестве примера в данной работе при условиях разряда, представленных в [14], проведено численное моделирование методом Монте-Карло пространственной динамики интенсивности $I(x)$ линии He(5015 Å) в зависимости от расстояния до катода вдоль оси x высоковольтного импульсного разряда в гелии. Для этого был выбран момент времени импульса тока ($t = 0.42$ мкс), соответствующий значительному электрическому полю в дрейфовом пространстве, которое не диагностируется прямыми измерениями, но проявляется в характерной временной динамике $I(x)$, описанной в [14]. $I(x)$ определялось из расчета функции распределения электронов по энергиям $f(\epsilon)$ вдоль оси разряда x . Статистическое моделирование кинетики неравновесной плазмы при средних давлениях [15] требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому все расчеты проводились на суперкомпьютере с использованием облачных технологий.

На рис. 1 представлены результаты расчетов $f(\epsilon)$ в потоке вдоль положительного направления x при давлении гелия $p = 27$ Торр. Кривая 1 показывает $f(\epsilon)$ электронов, покидающих межэлектродный промежуток $x = d = 1$ мм. Кривая 2 показывает $f(\epsilon)$ для электронов, прошедших 7 мм в дрейфовом пространстве ($x = 8$ мм). Статистическая выборка при построении этих графиков составила 10^4 пусков электронов с катода, с включением «историй» всех вторичных электронов. Распределение электрического поля для этих расчетов на интервале d взято из [14] для $t = 0.42$ мкс. В дрейфовом пространстве оно полагалось однородным ($E = -500$ В/см для кривой 2). Распределение (кр. 2) на этом рисунке сформировано из распределения (кр. 1) при действии тормозящего поля и влиянии неупругих ударов электронов с атомами гелия. Осцилляции кривой 2 обусловлены нехваткой статистики из-за ухода электронов из области $\epsilon > 100$ эВ в область меньших энергий в результате неупругих ударов. Эта же причина формирует отличие вида $f(\epsilon, x)$ кривых 1 и 2 в области наибольших энергий электронов. Пик на кривой 1 в области максимальной энергии электронов соответствует частицам, прошедшим d без столкновений. Неупругие удары приводят к деградации энергетического спектра этих электронов, что выражено изменением вида этого пика на кривой 2.

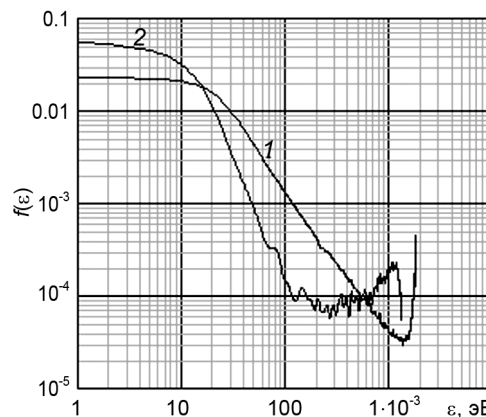


Рис. 1. Зависимость распределения f электронов по энергиям ϵ вдоль оси разряда для положения x от катода: кр. 1 – $x = 1$ мм, кр. 2 – $x = 8$ мм

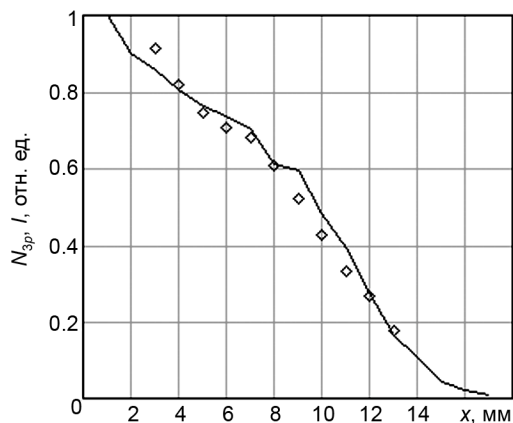


Рис. 2. Рассчитанная зависимость числа возбуждений N_{3p} атомов He электронным ударом в состояние $3p^1P^0$ от x (сплошная кривая); относительная интенсивность $I(x)$ оптического перехода He($2s^1S-3p^1P^0$) с $\lambda = 5015$ Å в дрейфовом пространстве для $t = 0.42$ мкс (ромбики)

проектировании плазмохимического реактора для получения активных частиц, взаимодействующих с клеточными структурами биологических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graves David B. // Phys. Plasmas. – 2014. – V. 21. – P. 080901-12.
2. Von Woedtke Th., Reuter S., Masura K., and Weltmann K. D. // Phys. Rep. – 2013. – V. 530. – P. 291–320.

3. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009. – V. 37. – No. 4. – P. 586–592.
4. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – V. 40. – No. 11. – P. 2837–2842.
5. Von Woedtke Th., Metelmann H-R., and Weltmann K.D. // Contrib. Plasma Phys. – 2014. – V. 54(2). – P. 104–117.
6. Демкин В.П., Мельничук С.В., Семухин Б.С. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11. – С. 33–36.
7. Демкин В.П., Мельничук С.В., Семухин Б.С. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 7. – С. 57–63.
8. Голант В.У., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – Атомиздат, 1977. – 384 с.
9. Demkin V.P., Melnichuk S.V., Borisov A.V., et al. // Phys. Plasmas. – 2013. – V. 20. – P. 123501-6.
10. Шахтаров В.А., Гордеев О.А. // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. – Вып. 12. – С. 56–68.
11. Lebedev Yu.A. and Epstein I.L. // Plasma Phys. Rep. – 2007. – V. 33. – No. 1. – P. 63–71.
12. Demkin V.P., Melnichuk S.V., Borisov A.V., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 55. – No. 10. – P. 1222–1228.
13. Boeuf J.P. and Marode E. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1982. – V. 15. – P. 2169–2187.
14. Демкин В.П., Мельничук С.В. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 10. – С. 135–136.
15. Demkin V.P. and Melnichuk S.V. // Phys. Plasmas. – 2015. – V. 22. – P. 023510-10.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
**Университет Маастрихта, г. Маастрихт, Нидерланды
E-mail: demkin@ido.tsu.ru; osbereg@yandex.ru

Поступило в редакцию 11.11.14,
после доработки – 12.03.15.

Демкин Владимир Петрович, д.ф.-м.н., профессор каф. общей и экспериментальной физики;
Кингма Герман, профессор, доктор факультета здоровья, медицины и наук о жизни Медицинского центра;
Ван де Берг Рэймонд, науч. сотр. лаб. моделирования физических процессов в биологии и медицине;
Мельничук Сергей Васильевич, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;
Демкин Олег Владимирович, науч. сотр. лаб. моделирования физических процессов в биологии и медицине;
Херардс Мари-Сесиль, технический специалист вестибулярной лаборатории в департаменте Медицинского центра университета Маастрихта, мл. науч. сотр. лаб. моделирования физических процессов в биологии и медицине;
Рипенко Василий Сергеевич, аспирант;
Ситник Кирилл Александрович, аспирант.