

## ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СВЧ-ИМПУЛЬСА ГИРОТРОНА ЧЕРЕЗ КВАРЦЕВУЮ ПЛАСТИНУ С ВНЕДРЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛА

© 2023 г. З. А. Заклецкий<sup>a,\*</sup>, Д. В. Малахов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: fiveziggen@gmail.com

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 01.07.2023 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования инициации, развития и поддержания плазменного поверхностного разряда, инициируемого микроволновым (СВЧ) излучением гиротрона (75 ГГц, 300 кВт, 6 мс) в воздушной среде при нормальных условиях на поверхности кварцевой подложки с наличием металлических включений. Показано, что скорость распространения фронта ионизации разряда достигает 40 м/с, что соответствует теплопроводностному механизму распространения. При этом максимальная рассчитанная газовая температура плазмы достигает 5500 К, что приводит к сублимации металлических включений. Впервые приведены параметры плазмы поверхностного микроволнового разряда на металлодиэлектрических мишенях, который использовался в различных аэроплазменных и плазмохимических приложениях.

*Ключевые слова* микроволновый разряд в воздухе, поверхность, кварцевая пластина, металлические включения, скорость фронта ионизации, температура газа, параметры плазмы

DOI: 10.31857/S0367292123600541, EDN: EQJJXE

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно разделяют несколько типов микроволновых (СВЧ) разрядов в свободном пространстве, разделение которых в общем связано с интенсивностью поля электромагнитной волны и давлением газовой среды, в которой распространяется разряд [1, 2]. Нас будет интересовать только разряд при высоких давлениях в случае, когда частота соударений электрона с нейтральными частицами выше частоты излучения  $\nu > \omega$  с пиком интенсивности излучения менее 3 кВт/см<sup>2</sup>, в таком случае разряд будет развиваться диффузионно [3]. Было обнаружено [4], что газовая температура  $T_g$  такого типа разряда может достигать 6500 К в воздухе при атмосферном давлении, что значительно ниже, чем для оптических разрядов, поддерживаемых мощным лазерным излучением [5]. Однако, благодаря теплопроводностному механизму распространения, разряд занимает наибольший объем, соответствующий эффективной площади падающего излучения. Скорость движения фронта разряда составляет от нескольких единиц до десятков м/с, что с учетом газовой температуры позволяет говорить о высокой удельной энтальпии разряда (более

2 МДж/кг) для использования в задачах плазмохимии. Также было отмечено, что данный тип разрядов может быть инициирован в полях интенсивность которых составляет несколько сотен Вт/см<sup>2</sup>, однако для начальной ионизации было необходимо использовать внешний источник, которым может быть как УФ-лампа, так и другой тип разряда, который находится на пути распространения СВЧ-излучения. Кроме этого при малых интенсивностях возбуждение разряда возможно при наличии на пути распространения излучения металлических элементов: винтов в волноводах, клубка проволоки и т.п.

С начала 1990-х гг. в ИОФ РАН было проведено обширное исследование микроволновых разрядов инициируемых у поверхности металлодиэлектрических мишеней, находящихся в атмосфере различных газов [6, 7]. Мишени состояли из набора металлических включений размер которых варьировался от нескольких миллиметров до сотен микрометров, которые случайным образом располагались на поверхности кварцевых стекол. При этом во всех экспериментах выполнялось соотношение между толщиной скин-слоя  $\delta$  в металле, линейным размером включения  $a$  и

длиной волны излучения  $\lambda_f$ :  $\delta \ll a \ll \lambda_f$ . Для инициации разряда мощность  $\Psi$  [Вт/см<sup>2</sup>] и длительность  $\tau_i$  [с] микроволнового излучения должны удовлетворять соотношению  $\Psi\tau_i \geq 0.1$  Дж/см<sup>2</sup>. Для достижения высокой мощности использовались линзовые системы, использование которых уменьшало характерный масштаб взаимодействия излучения с мишенью, при этом длительность импульсов не превышала 1 мс. Все эти ограничения в тот момент позволяли использовать данный тип разряда только в узких приложениях: например, как тепловой источник поджига газобразных взрывчатых веществ [8] или как источник тяги в ракетном двигателе [7], стоит отметить, что подобные исследования ведутся и сейчас [9]. В ряде работ [10, 11] был обнаружен эффект скольжения микроволнового разряда вдоль диэлектрических стенок кварцевых трубок, подобные эффекты были также обнаружены и в экспериментах с металлодиэлектрическими мишенями.

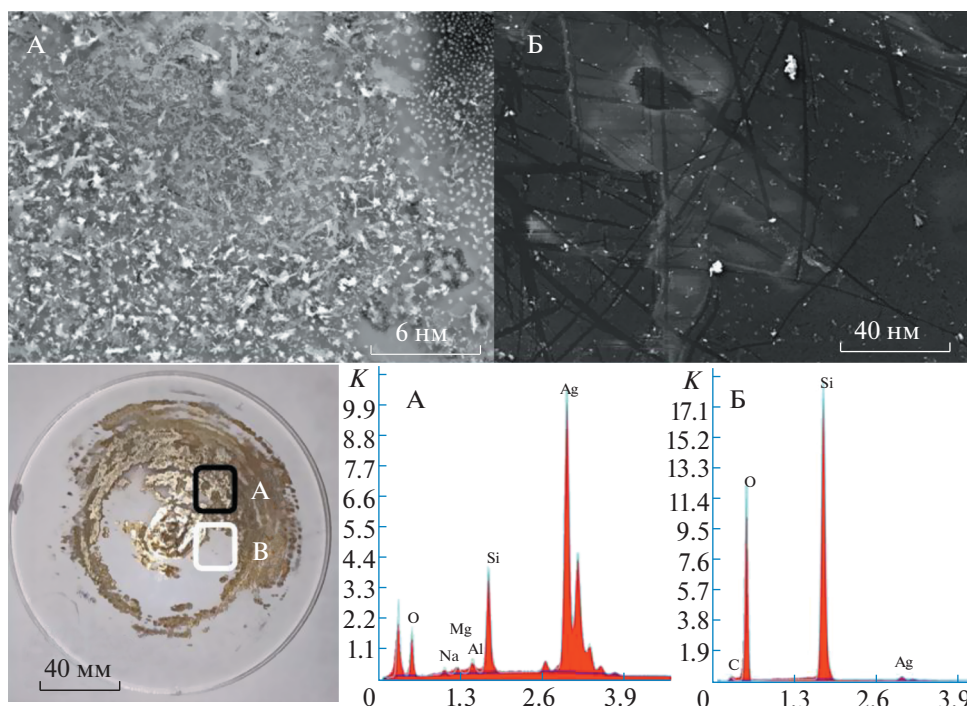
С течением времени были разработаны новые приборы для генерации микроволнового излучения – гиротроны, которые позволяли достигать необходимой для пробоя металлодиэлектрической мишени мощности импульса при длительностях десятки миллисекунд и области взаимодействия пучка с мишенью более 10 см<sup>2</sup>. Такие параметры позволяют рассматривать приповерхностный плазменный разряд как эффективный преобразователь микроволновой энергии в тепловую для частиц. Однако на данный момент не было проведено исследование параметров для поверхностных микроволновых разрядов, иницируемых излучением гиротрона. Из-за этого не было возможности говорить о применимости такого типа разрядов для обработки или модификации поверхности твердых материалов. Однако предпосылки для успеха такой технологии были получены в результате работ, связанных с плазмохимическим синтезом частиц с помощью излучения гиротрона.

В работе [12] было продемонстрировано, что возможна инициация плазменного разряда в воздухе при нормальном давлении с помощью микроволнового излучения в порошковых смесях металлов и диэлектриков, при этом за время поддержания разряда удается синтезировать частицы, которые могут быть использованы в промышленности. После одной из экспериментальных серий по синтезу частиц на кварцевой подложке, на которой располагались порошковые частицы, в которые были внедрены частицы металла, размер которых составлял порядка 1 мкм. При повторном облучении такой подложки произошел пробой с образованием плазменного слоя.

В данной работе мы рассмотрим условия возбуждения поверхностного разряда на металлодиэлектрической подложке при атмосферном давлении, оценим его газовую температуру, скорость движения разряда вдоль подложки. Проведем сравнение данного типа разряда с представленными ранее в литературе, а также проанализируем его применимость для материаловедческих приложений.

## 2. МАТЕРИАЛЫ

В качестве металлодиэлектрической мишени используется цилиндрическая кварцевая подложка марки КУ-1 толщиной 5 мм и диаметром 80 мм в поверхность которой внедрены серебряные микрочастицы субмикронного и микронного (до 1–2 мкм) размера. Данная мишень была получена при облучении 20 последовательными импульсами гиротрона (300 кВт, 6 мс) порошков оксида алюминия и серебра ( $Al_2O_3/Ag$ ) в массовом соотношении 1/5, находящихся на кварцевой подложке. Неоднородность покрытия частиц на подложке связана с несколькими причинами. Во-первых, в порошковых засыпках используются полидисперсные частицы в разных объемных соотношениях, из-за этого не удается добиться равномерного распределения частиц серебра в объеме смеси. Во-вторых, пучок гиротрона имеет неравномерное распределение напряженности электрического поля по своему сечению. В-третьих, в процессе синтеза частицы порошков поднимаются над поверхностью засыпки, при этом на данный момент не установлен процесс определяющий движение частиц в плазмохимическом реакторе [12]. Некоторые частицы из одной области могут покинуть засыпку быстрее, чем из другой, тем самым на поверхности подложки в одних местах могут скапливаться частицы и расплавляться под действием разряда, а в других частицы подняты уже в объем реактора. Несмотря на достаточно сложный механизм распределения внедренных частиц на подложке можно выделить несколько характерных черт: в центре подложки (рис. 1) в максимуме интенсивности пучка гиротрона в большинстве экспериментов образуется область, содержащая расплавленные частицы, и мы связываем это с тем, что в центре подложки разряд возникает намного чаще из-за наибольшей интенсивности микроволнового поля. В результате разряд в центре подложки взаимодействует с частицами порошка намного дольше, что позволяет нагреть как верхние, так и нижние слои засыпки до температуры плавления. Нагрев происходит достаточно интенсивно так, что частицы не успевают подняться и приплавляются к подложке. Вне центральной области расплавленных частиц практически не наблюдается. На данный момент сложно предположить почему это проис-



**Рис. 1.** На рисунке изображена поверхность металлодиэлектрической мишени для которой приведены результаты ЭДС-сканирования двух характерных областей: А – в области микрометаллических образований серебра и Б – область кварцевой подложки.

ходит, поскольку для этого необходимо точно знать механизм разлета частиц при наших условиях. Также отметим, что обнаружен слой частиц по краям подложки. Он образуется аналогично слою в центральной области. Дело в том, что в экспериментах по синтезу частиц на подложке стоит кварцевый стакан, который ограничивает радиальный разлет частиц, в результате после соударения со стенкой стакана частицы падают вдоль них обратно на подложку, тем самым образуя слой вдоль края стенки стакана, который также можно наблюдать на рис. 1. В результате на 7-м или 8-м микроволновом импульсе из-за высокой концентрации металла вдоль цилиндрической стенки реактора в этой области начинает все чаще инициироваться разряд, тем самым время его взаимодействия с порошком становится аналогичным центральной области.

Подложка помещалась в цилиндрическую тefлоновую вставку, стенки которой были выше верхней поверхности подложки. Таким образом, распространяющийся вдоль подложки разряд был также ограничен в радиальном направлении диэлектрическими стенками. На рис. 1 приведено изображение поверхности металлодиэлектрической мишени, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ-изображение), и спектры рентгеновского излучения с

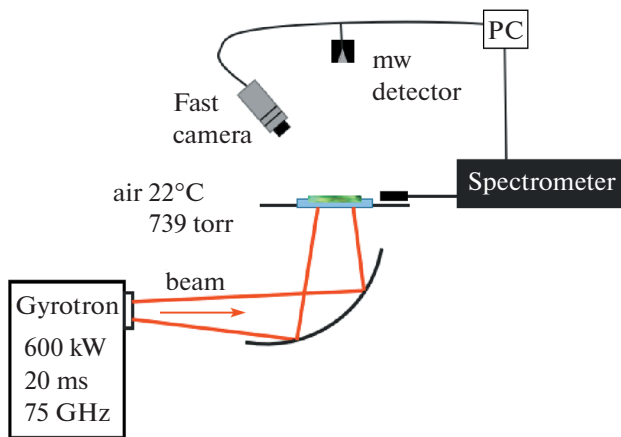
использованием энергодисперсионного рентгеновского анализа поверхности (Energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDS-анализ).

С помощью EDS-анализа регистрируется высокая интенсивность пиков серебра, кремния и кислорода. Также обнаружено, что частицы серебра, в основном, внедрены в приповерхностный слой подложки, который состоит из оксидных соединений алюминия и кремния. Стоит также отметить, что данный оксидный слой можно легко удалить механически, при этом исходная поверхность кварцевой подложки сохраняет свою морфологию.

Распределение металлических частиц по поверхности подложки неравномерно, это связано с тем, что в процессе синтеза частиц, большая их часть поднимается с поверхности подложки и в формировании приповерхностного слоя не участвует.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментах (рис. 2) используется излучение гиротрона (производство ГИКОМ Н. Новгород, Россия) с параметрами: мощность до 600 кВт, длительность импульса до 20 мс, частота микроволнового излучения 75 ГГц. Микроволновой пучок, имеющий на выходе гиротрона гауссовский профиль интенсивности в поперечном



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для исследования поверхностного микроволнового разряда: PC – компьютер, mw detector – микроволновый детектор прошедшей мощности.

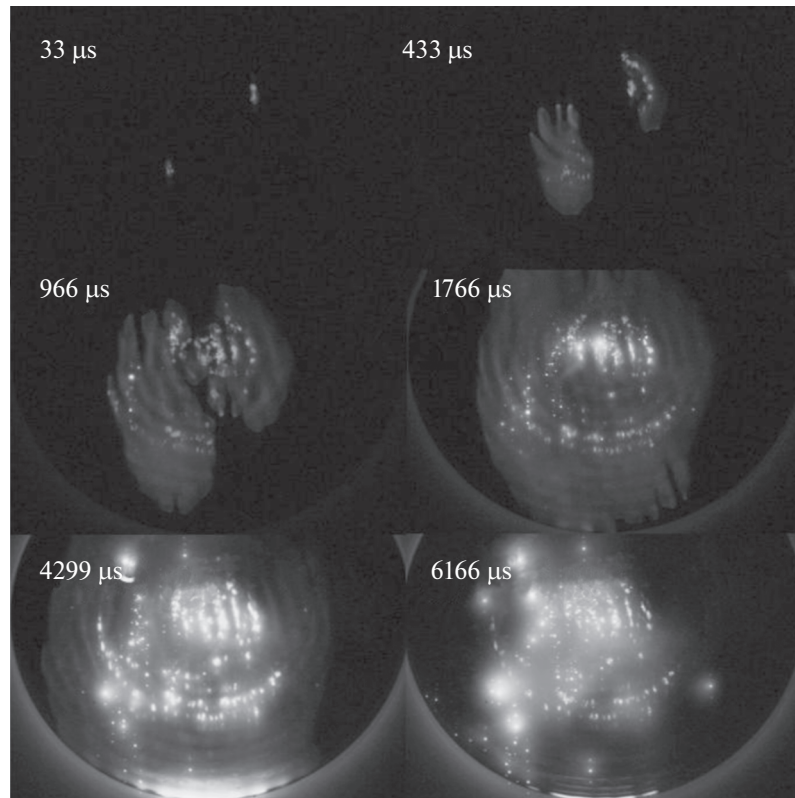
сечении, транспортируется с помощью квазиоптического тракта к реактору и фокусируется в области расположения кварцевой подложки-мишени. Сфокусированный микроволновый пучок на мишени имеет эллиптически вытянутый поперечный профиль с характерной площадью около  $28 \text{ см}^2$ . Пиковая интенсивность излучения составляла  $10 \text{ кВт/см}^2$  при длительности импульса 6 мс. Регистрация развития разряда происходит с помощью быстрой камеры Phantom VEO710 (скорость съемки 7400 кадров в секунду, с разрешением изображения  $1280 \times 800$  пикселей). Камера располагалась в двух положениях: на расстоянии 20 см относительно поверхности мишени под углом 60 градусов и на расстоянии 30 см под углом 5 градусов. Регистрация спектров излучения осуществлялась с помощью спектрометра AvaSpec-DUAL (379–521 нм с оптическим разрешением 0.1 нм, экспозиция 1.7 мс). Оптическое волокно спектрометра находилось на расстоянии 10 см относительно центра подложки мишени под углом порядка 5 градусов. Регистрация прошедшего микроволнового излучения осуществлялась с помощью микроволнового детектора Д-407, частота дискретизации 10 МГц. Детектор располагался на расстоянии 80 см по нормали от поверхности подложки, перед детектором находится отсекающая диафрагма, общий уровень мощности, приходящий на датчик соответствует 0.1% от мощности падающего микроволнового импульса. Спектрометр и высокоскоростная камера были синхронизированы с началом микроволнового импульса. Все эксперименты проводились в воздушной атмосфере при нормальных условиях.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые изображения поверхностного разряда приведены на рис. 3. Начальный этап формирования разряда длится от 10 до 50 мкс. На поверхности мишени наблюдаются только одиночные светящиеся области, которые соответствуют участкам мишени покрытым металлическими включениями. Согласно скейлингу  $\Psi\tau_i \geq 0.1 \text{ Дж/см}^2$  [7] время инициации разряда для металл/диэлектрической мишени при пиковой интенсивности  $10 \text{ кВт/см}^2$  должно составлять 10 мкс, что соответствует длительности наблюдаемой в эксперименте. Отметим, что данный скейлинг выполнялся в независимости от давления среды в диапазоне от  $10^{-3}$  до 760 Торр [7].

Можно отметить, что в ранних экспериментах в диэлектрическую подложку внедрялись достаточно крупные частицы с характерными размерами порядка сотен мкм или длинные нитевидные проволоки субмиллиметрового диаметра и резонансной длиной  $L = \lambda_f$  при использовании микроволновых генераторов с длинами волн  $\lambda_f$  от 1 мм до 10 см. В нашем же случае размер включений был существенно меньше и составлял порядка 1 мкм, что в результате не влияло на условия инициации разряда. Далее на протяжении действия микроволнового излучения в течение порядка 1.5 мс разряд расширяется и в определенный момент начинает соответствовать площади микроволнового пучка с характерной вытянутой эллиптической формой. Можно наблюдать, что распространение фронтов разряда вдоль подложки имеет направленный характер по контуру концентрических окружностей соосных с геометрическим центром мишени. Это в первую очередь связано с эффектами дифракции электромагнитного пучка на круглой мишени, толщина которой  $d = 5 \text{ мм}$  соизмерима с длиной микроволнового излучения  $\lambda_f = 4 \text{ мм}$ . Благодаря этому суммарная интенсивность на поверхности мишени складывается из распределения интенсивности в пучке и радиального бесселевого распределения интенсивности с пиком в центре мишени.

Данная интерференционная картина наблюдается также в пространственной структуре поверхностного разряда, об этом можно судить в первую очередь по изображениям с видеокамеры, где наблюдаются чередующиеся по интенсивности концентрические окружности. Характерное расстояние между окружностями составляет 4 мм. Кроме того, на изображениях наблюдаются участки с повышенной интенсивностью (рис. 3, 1766 мкс), которые расположены строго вдоль одной из концентрических окружностей, которая соответствует интерференционному максимуму. Вдоль данной окружности согласно фотографии подложки (рис. 1) находятся серебряные включения, и, таким образом, мы приходим к выводу,



**Рис. 3.** Изображение свечения микроволнового разряда, развивающегося на поверхности металлодиэлектрической мишени (вид сверху).

что формирование неоднородного распределения серебра по поверхности подложки связано с неоднородной структурой разряда, вызванного дифракцией пучка гиротрона.

Скорость движения фронта разряда вдоль подложки можно оценить из изображений, полученных при съемке мишени сбоку (рис. 4). Фронт ионизации разряда имеет среднюю скорость от 10 до 40 м/с в направлении вектора напряженности электрического поля волны. Таким образом, для того чтобы разряд расширился на площадь эквивалентную площади микроволнового пучка при его инициации в геометрическом центре мишени необходимо не менее 1 мс, что хорошо согласуется с наблюдаемым свечением в эксперименте (рис. 3). После прохождения фронта разряда за ним остается ионизированный слой, поглощающий микроволновое излучение. Толщина плазменного слоя остается постоянной на протяжении микроволнового импульса и имеет субмиллиметровый масштаб. Находящиеся в слое металлические включения нагреваются в среднем за 500 мкс, согласно полученным изображениям.

Для определения поглощенной мощности мы воспользовались методом балансных измерений [13]. Было обнаружено, что на протяжении первых 3 импульсов поглощение составляет порядка

1500 Дж (рис. 5), а в последующих импульсах 1100 Дж. Данный эффект может быть объяснен в первую очередь уменьшением количества центров инициации разряда (рис. 6): так в первых импульсах концентрация металла на подложке максимальна, следовательно при инициации разряд захватывает наибольшую площадь перпендикулярную вектору напряженности электрического поля. В дальнейшем после воздействия 3 микроволновых импульсов концентрация металла падает благодаря испарению и окислению, и для расширения разряда на всю площадь пучка требуется больше времени. В данном случае скорость разряда вдоль вектора напряженности электрического поля микроволнового пучка в разы превышает скорость поперек. Таким образом, несмотря на высокую скорость фронта ионизации для расширения разряда на всю площадь микроволнового пучка ключевую роль играет именно плотность металлических включений в мишени.

Зарегистрированный спектр излучения (рис. 7–8) в момент времени 70–450 мкс содержит набор молекулярных полос нитрида углерода CN для фиолетового перехода ( $B^2\Sigma-X^2\Sigma$  382–389 нм), азота  $N_2$  ( $C^3P_u-B^3P_g$  280–400) и иона молекулы кислорода  $O_2^+$  ( $B^2P_r-X^2P_r$  300–320).

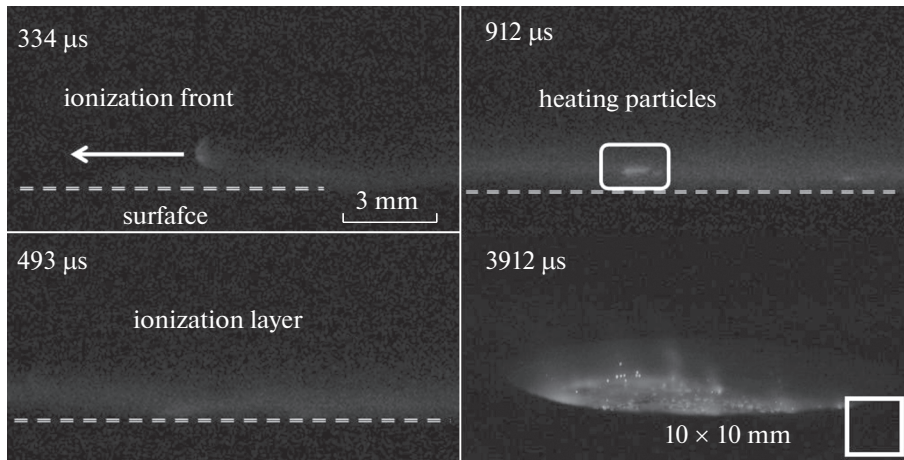


Рис. 4. Изображение свечения микроволнового разряда на поверхности металлодиэлектрической мишени (вид сбоку).

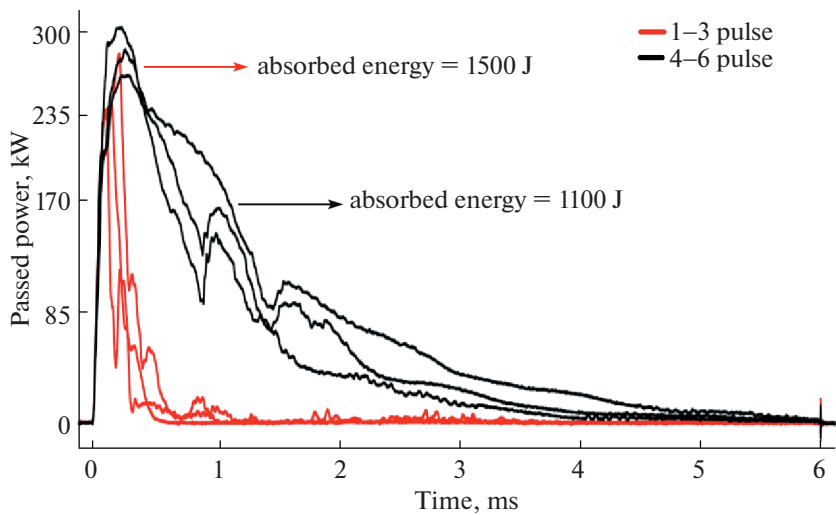


Рис. 5. Зависимость прошедшей мощности микроволнового излучения от длительности импульса для 6 последовательных импульсов.

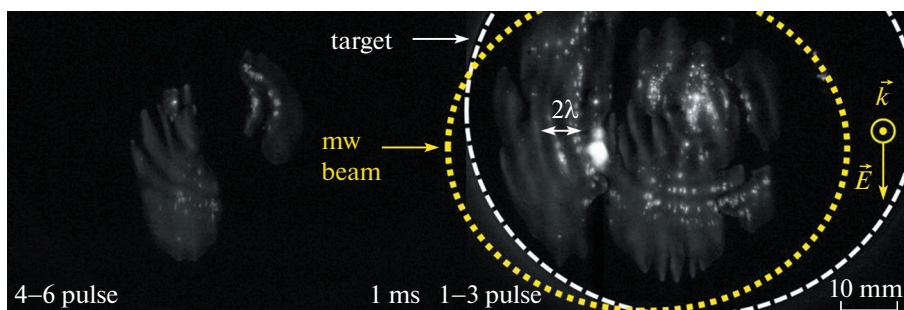


Рис. 6. Характерные изображения поверхностного микроволнового разряда в момент времени 1 мс после начала генерации микроволнового импульса на протяжении 6 последовательных импульсов.

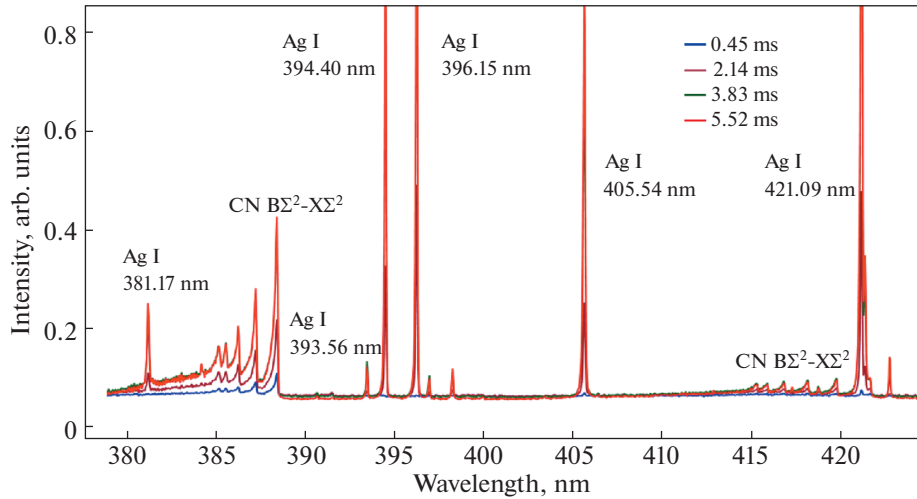


Рис. 7. Обзорный спектр для диапазона длин волн 375–430 нм.

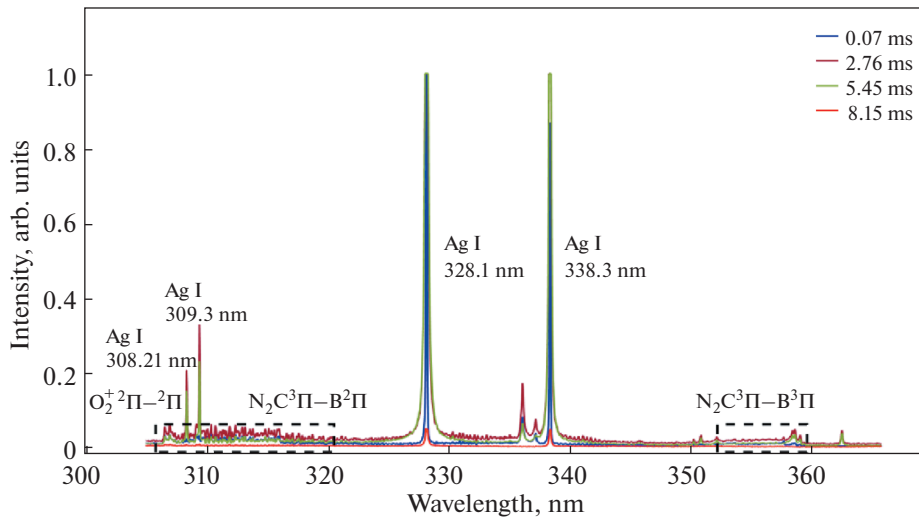


Рис. 8. Обзорный спектр для диапазона длин волн 300–370 нм.

Существенное преобладание по интенсивности молекулярных полос CN в первую очередь связано с наличием в мишени углеродсодержащих элементов, которые являются источником атомарного углерода. Подобный спектральный состав наблюдался в ряде работ по облучению графитовых мишеней азотным плазмотроном [14], температура газа на выходе из сопла составляла порядка 10 кК, а вблизи поверхности мишени (1–2 мм) 7 кК и менее. Было обнаружено, что по интенсивности линий в молекулярной полосе 382–389 нм можно качественно судить о соотношении концентраций CN и ионизованных молекул азота  $N_2^+$ , в нашем случае оно оценивается как 0.9 : 0.1. С учетом этого мы можем оценить вращательную  $T_r$  и колебательную  $T_v$  температуры молекулы CN,

аналогично методу в работе [15], которое составляет порядка 5400–5600 К для  $T_r$  и 6800–7200 К для  $T_v$  (рис. 9). Принимая во внимание, что времена вращательно-поступательной релаксации для микроволнового разряда при высоком давлении существенно меньше времени поддержания разряда  $\tau_{vt} \ll \tau_i$ , поступательная температура газа будет примерно равна вращательной температуре  $T_g \approx T_r$ . Отметим, что на протяжении всего времени поддержания микроволнового разряда, полученные значения температур сохраняются.

В момент времени 2.14 мс на спектре начинают отчетливо идентифицироваться атомарные линии алюминия AlI (308.21 нм, 308.3 нм, 394.40 нм, 396.15 нм, 405.54 нм) и серебра AgI (405.54 нм, 421.09 нм, 447.60 нм, 466.85 нм). Оценка элек-

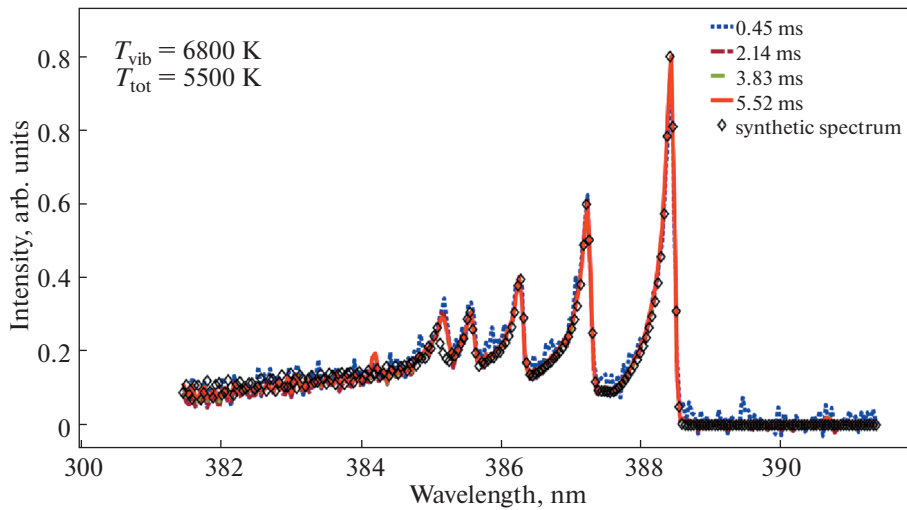


Рис. 9. Полученный экспериментально и рассчитанный спектр излучения молекулы CN.

тронной температуры по линиям атомарного алюминия [4] дает значение  $T_e$  от 7000 до 7500 К, которая сохраняется на протяжении всей длительности импульса.

Для определения плотности электронов  $N_e$  в разряде мы не проводили дополнительных измерений. Данную величину можно оценить из соотношения [16] между глубиной проникновения микроволнового излучения  $\delta_e$ , принятого в нашем случае как толщина ионизированного слоя (рис. 4) и критической плотности электронов  $N_c$ :

$$\delta_e = \frac{c}{\omega} \left( -\frac{N_c}{N_e} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{N_e}{N_c}\right)^2 + \left(\frac{N_e v}{N_c \omega}\right)^2} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

$$N_c = \frac{m_e (v^2 + \omega^2)}{4\pi e^2}. \quad (2)$$

Эффективная частота соударений электронов с молекулами газа  $\nu$  без учета вклада паров металлов можно оценить по формуле [17], учитывающей температуру электронов и отношение концентраций компонент газа:

$$\nu = 2.9 \times 10^{-7} N_{N_2} T_e (1 + T_e^{1/2})^{-1} + 1.6 \times 10^{-8} N_{O_2} T_e^{1/2} (1 + 4.5 T_e^{1/2}), \quad (3)$$

а также по более простой формуле [18]:

$$\nu = \left( 5.3 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{Торр}} \right) P. \quad (4)$$

При наших условиях (при давлении  $P = 739$  Торр концентрация нейтральных частиц

газа  $n_a = 2.36 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при соотношении  $N_{O_2}/N_{N_2} = 1/4$ ) мы получаем (рис. 10) значение частоты соударений по формуле 3 для двух значений температуры электронов в разряде  $\nu(6500 \text{ К}) = 2.1 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$  и  $\nu(7500 \text{ К}) = 2.3 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , а по формуле (4)  $\nu = 3.9 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .

При глубине проникновения  $\delta_e$  от 100 мкм до 1 мм величина электронной плотности  $N_e$  плазмы в разряде, рассчитанная по (1), находится вблизи критической плотности  $N_c \approx 4 \times 10^{14}$ , и при учете частоты соударений (формулы 2 и 3) может превышать ее и составлять величину около  $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Полученные оценки значений электронной плотности  $N_e$  плазмы находятся в диапазоне от  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и согласуются с результатами, которые были получены в ранних работах по микроволновым подпороговым разрядам при их контакте с диэлектрическим экраном [19].

Пока достаточно подробно не исследовано пространственное распределение плотности и температур плазмы в нашем разряде, поэтому мы не можем говорить об однородности разряда по всей площади микроволнового пучка. Кроме этого, на изображениях с камеры (рис. 3, 6) выделяются две области: первая соответствует яркому свечению нагретых металлических частиц, а вторая распространяющемуся ореолу вокруг них. В данном случае мы можем привести прямую аналогию с микроволновыми подпороговыми разрядами в газах [6, 7]. При тех же параметрах излучения и среды данный тип разрядов будет также иметь две характерные области: равновесные плазменные нити, являющиеся самостоятельным разрядом и диффузионный плазменный ореол,

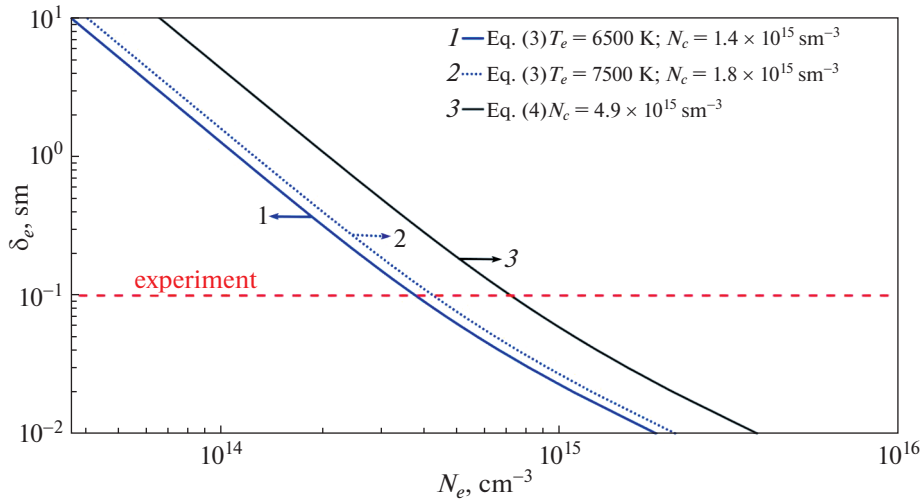


Рис. 10. Зависимость глубины проникновения электромагнитного поля от концентрации электронов в разряде.

являющийся несамостоятельным разрядом, т.к. поддерживается за счет УФ-излучения из первой области. Таким образом, полученные в работе параметры плазмы могут соответствовать как узким плазменным каналам вблизи металлических включений в мишени, так и всему светящемуся ореолу.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование инициации и развития микроволнового разряда, поддерживаемого излучением гиротрона с частотой 75 ГГц и средней интенсивности 10 кВт/см<sup>2</sup> над поверхностью кварцевой подложки с внедренными серебряными микрочастицами. Задержка инициации разряда полностью согласуется с оценкой, выполненной в работах [1, 7, 8] и подтверждает ее универсальность при малых размерах металлических включений (субмикрон). Скорость распространения разряда вдоль подложки оценивается от 10 до 40 м/с, что хорошо согласуется с теплопроводным механизмом распространения подпороговых микроволновых разрядов в свободном пространстве. Полученные значения плотности и газовой температуры плазмы в наших условиях ( $T_g \sim 5 \times 10^3$  К,  $n_e \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) находятся вблизи типичных параметров квазиравновесной плазмы ( $T_g \sim 10^3$ – $10^4$  К,  $n_e \geq 10^{14}$  см<sup>-3</sup>). В совокупности с наблюдаемыми атомарными линиями металлов на спектрах излучения в разряде (рис. 7–8) мы можем полагать, что данный тип микроволновых разрядов можно рассматривать в качестве перспективного метода для материаловедческих приложений, в которых необходимо получать пары металлов для их дальнейшей конденсации на различных поверхностях.

Отмечаем, что многие физические явления в данном разряде оказываются схожими с поверхностными микроволновыми разрядами, распространяющимися вдоль диэлектрических трубок. Однако, высокая газовая температура плазмы в нашем случае существенно расширяет круг возможных технологических применений, что неоднократно отмечалось в предыдущих работах. Полученные параметры плазменного микроволнового разряда, скорости и характера его распространения позволят в дальнейшем проводить численные расчеты и составлять аналитические модели для определения границ применимости разряда в плазмохимии и материаловедении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P., Tarasova N.M.* Plasma Physics and Plasma Electronics / Ed. by L.M. Kovrizhnykh, Commack: Nova Science Publ., 1985. P. 241
2. *Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Семенов В.Е.* СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн. Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 136.
3. *Бродский Ю.Я., Венедиктов И.П., Голубев С.В., Зорин В.Г., Косый И.А.* // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. С. 187.
4. *Kuniyoshi Tabata, Yuki Harada, Yusuke Nakamura, Kimiya Komurasaki, Hiroyuki Koizumi, Tsuyoshi Kariya, Ryutaro Minami* // Journal of Applied Physics. 2020. V. 127. № 6 063301. <https://doi.org/10.1063/1.5144157>
5. *Райзер Ю.П.* Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.

6. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Kossyi I.A., Magunov A.N., Silakov V.P.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 26. P. 11.  
<https://doi.org/10.1051/epjap:2004016>
7. *Batanov G.M., Gritsinin S.I., Kossyi I.A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. 2687
8. *Berezhetskaya N.K., Kop'ev V., Kossyi I.A., Misakyan M., Taktakishvili I.M., Temchin S., Lee Y.D.* // The European Physical Journal. Applied Physics. 2008. T. 42. № 3. С. 327–337.
9. *Masayuki Takahashi & Kimiya Komurasaki* // Advances in Physics. 2018. X, 3:1, DOI: 10.1080/23746149.2017.1417744
10. *Shibkov V.M.* // Moscow Univ. Phys. 2019. V. 74. P. 421.  
<https://doi.org/10.3103/S002713491905014X>
11. *Zhukov V.I., Karfidov D.M., Sergeichev K.F.* // Plasma Physics Reports. 2020. T. 46. № 8. С. 837.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292120080120>
12. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Kossyi I.A., Magunov A.N.* // Plasma Physics Reports. 2006. T. 32. № 6. С. 525.
13. *Zakletskii Z.A., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Malakhov D.V.* // Journal of Physics: Conf. Ser. 2021. V. 2055 (1), 012013,  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012013>
14. *Belevtsev A.A., Kavyrshin D.I., Sargsyan M.A., Chinnov V.F., Efimov A.V., Shcherbakov V.V.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. 484002,  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aadccc>
15. *Иниаков С.И., Скворцов В.В., Шахатов В.А., Кудрявцева Е.Д., Успенский А.А.* // ТВТ. 2022. Т. 60. Вып. 2. P.172.  
<https://doi.org/10.31857/S004036442201029X>
16. *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Radishev D.B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. V. 52. 014001  
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae3a3>
17. *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973.
18. *Schaub S.C., Hummelt J.S., Guss W.C., Shapiro M.A., R.J.* // Physics of Plasmas. 2016. V. 23. № 8. 083512.  
<https://doi.org/10.1063/1.4959171>
19. *Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Bol'shakov E.F., Gorbunov A.A., Dorofeyuk A.A., Konov V.I., Kope'ev V.A., Kossyi I.A., Kostinskii A.Yu.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1993. № 2. 164  
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/2/3/006>