

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕТРОНА НА РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ СВЧ РАЗРЯДА

О.И. Тихон, С.И. Мадвейко, **С.В. Бордусов**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

THE STUDY OF THE MICROWAVE MAGNETRON PULSE POWER SUPPLY ELECTRICAL PARAMETERS INFLUENCE ON THE MICROWAVE DISCHARGE PLASMA GENERATION MODES

O.I. Tsikhan, S.I. Madveika, **S.V. Bordusau**

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Аннотация. Изучено влияние электрических режимов управляемого импульсного инверторного источника электропитания СВЧ магнетрона на условия генерации плазмы СВЧ разряда большого объема (около 9000 см³) в крупногабаритной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа. Исследовано влияние параметров анодного тока в цепи электропитания СВЧ магнетрона на оптические характеристики СВЧ разряда. Проведен сравнительный анализ оптических характеристик формируемого в импульсном и непрерывном режиме генерации СВЧ разряда в зависимости от выходной мощности источника электропитания СВЧ магнетрона. Установлено, что уменьшение скважности между пачками импульсов анодного тока и последующий переход к постоянному режиму приводит к непропорциональному увеличению энергозатрат в плазму СВЧ разряда.

Ключевые слова: СВЧ разряд, СВЧ магнетрон, непрерывный режим работы, оптическое свечение плазмы.

Для цитирования: Тихон, О.И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания свч магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О.И. Тихон, С.И. Мадвейко, **С.В. Бордусов** // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 42–47. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42. – EDN: EKYZCG

Abstract. The influence of the electrical modes of the controlled microwave magnetron pulsed inverter power supply on the conditions of large-volume microwave discharge plasma (about 9000 cm³) generation in a large-sized chamber of a resonator-type microwave magnetron has been studied. The influence of anode current parameters in the power supply circuit of the microwave magnetron on the microwave discharge optical characteristics has been researched. A comparative analysis of the optical characteristics of the microwave discharge formed in the pulsed and constant generation modes depending on the power output of the microwave magnetron power supply has been carried out. It has been established that a decrease in the duty factor between pulses of anode current and the subsequent transition to a constant mode leads to a disproportionate increase in the energy input into the microwave discharge plasma.

Keywords: microwave discharge, microwave magnetron, continuous operating mode, optical plasma luminescence.

For citation: Tsikhan, O.I. The study of the microwave magnetron pulse power supply electrical parameters influence on the microwave discharge plasma generation modes / O.I. Tsikhan, S.I. Madveika, **S.V. Bordusau** // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 42–47. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42 (in Russian). – EDN: EKYZCG

Введение

Возбуждаемая энергией сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ) неравновесная плазма находит широкое применение в технологии изготовления современных полупроводниковых приборов [1]–[3]. Большая степень ионизации СВЧ плазмы и ее плотность, по сравнению с традиционными ВЧ разрядами, обеспечивают сравнительно высокую концентрацию химически активных радикалов и фрагментов молекул в объеме плазмы [4]. Преймущества СВЧ разрядов и специфика взаимодействия СВЧ электромагнитных полей с полупроводниковыми материалами

обеспечивают возможность использования данного типа плазмы для решения практически важных задач электронной промышленности. Однако постоянно растущие требования к параметрам плазменных технологических процессов обработки полупроводниковых пластин, увеличение степени интеграции требуют совершенствования как плазменных технологических процессов, так и модернизации существующего или разработки нового СВЧ плазменного технологического оборудования.

Для формирования СВЧ разряда большого объема, позволяющего выполнять обработку

полупроводниковых пластин диаметром более 200 мм, особый интерес представляет использование в составе плазмотронов объёмных резонаторных систем, обеспечивающих возбуждение и поддержание плазмы за счёт энергии «стоячих» волн [5]–[7]. В качестве источников энергии для такого типа плазмотронов технологического назначения могут быть применены бытовые малогабаритные сверхвысокочастотные магнетроны, способные обеспечить стабильный и устойчивый режим работы без использования систем стабилизации на частоте автоколебания и устройств защиты от переотражённой СВЧ мощности [8]–[10].

Бытовые СВЧ магнетроны средней мощности запитываются напряжением отрицательной полярности (4–5 кВ), а режимы их работы зависят от параметров импульсов тока (формы, амплитуды, частоты следования) в анодной цепи источника питания СВЧ магнетрона [5].

Для питания СВЧ магнетронов, как правило, используются блоки питания, в основу которых входит работающий в режиме насыщения высоковольтный трансформатор и схема удвоения напряжения. Такая упрощённая схема может обеспечить частоту следования импульсов анодного тока 50 или 100 Гц скважностью не менее 2. Несмотря на простоту работы и высокую надёжность источника питания на базе такой схемы, его основными недостатками, применительно к условиям генерации энергии для возбуждения и поддержания плазмы СВЧ разряда в рабочем объёме СВЧ плазмотрона, являются большие габариты, масса, невозможность обеспечения плавной регулировки в широком диапазоне выходной мгновенной мощности СВЧ магнетрона и, следовательно, вводимой в СВЧ резонатор мощности.

Подводимая к СВЧ разряду мощность является одним из ключевых параметров, изменение которого оказывает влияние на электро-физико-химические характеристики плазмы. Управление установленным амплитудным значением анодного тока СВЧ магнетрона позволяет контролировать генерируемую мощность СВЧ магнетрона и, следовательно, режим обработки материалов в объёме СВЧ плазмы. Это может позволить реализовать многоступенчатую регулировку мгновенной мощности СВЧ магнетрона в течение одной технологической операции в зависимости от параметров обратных связей или по заданной программе.

Для управляемого регулирования генерируемой СВЧ магнетроном мощности возможно использование высоковольтного импульсного источника питания, построенного на основе инверторного блока [11]. При работе такого источника входное напряжение переменного тока выпрямляется мостовым выпрямителем, после чего напряжение постоянного тока подаётся на схему IGBT переключения и преобразуется в сигнал с

частотой 20–40 кГц [12]. Это напряжение поступает на первичную обмотку относительно небольшого высоковольтного трансформатора, который является элементом резонансного контура генератора и вырабатывает на одной вторичной обмотке напряжение ~ 2 кВ, на второй вторичной обмотке переменного тока в цепи накала – напряжение 3–3,3 В. Необходимое для работы магнетрона анодное напряжение $\sim 3\div 4$ кВ формирует двухполупериодный выпрямитель с удвоением напряжения. В подобных схемах источника питания контроль и регулировка выходной мощности осуществляются путём изменения скважности управляющего широтно-импульсного модулированного (ШИМ) сигнала, генерируемого микропроцессором в схеме цифрового программатора.

Использование таких современных схемотехнических решений источников питания СВЧ магнетронов даёт возможность улучшить массогабаритные характеристики генераторов, входящих в состав СВЧ плазменных установок, с обеспечением требуемых условий плазмообразования. Однако задача повышения энергоэффективности процесса СВЧ плазменной обработки полупроводниковых материалов требует проведения дополнительных исследований в части обеспечения условий формирования устойчивого СВЧ разряда с возможностью регулирования как подводимой к нему мощности, так и режима возбуждения и поддержания плазмы СВЧ разряда.

Целью исследования является изучение влияния электрических режимов управляемого импульсного инверторного источника электропитания СВЧ магнетрона на условия генерации плазмы СВЧ разряда большого объёма (около 9000 см³) в крупногабаритной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа и сравнительный анализ оптических характеристик формируемого в импульсном и непрерывном режимах генерации СВЧ разряда в зависимости от выходной мощности источника электропитания СВЧ магнетрона.

1 Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на базе СВЧ вакуумно-плазменной установочной резонаторного типа, реакционно-разрядная система которой схематически представлена на рисунке 1.1 [13].

Внутри объёмного прямоугольного резонатора располагается выполненная из кварцевой трубы вакуумируемая разрядная камера. Формирование плазмы СВЧ разряда в рабочем объёме СВЧ плазмотрона осуществляется в условиях вакуума при подаче электромагнитной энергии в резонатор от СВЧ генератора через волноводный тракт. В состав СВЧ генератора входят СВЧ магнетрон 2М261 и импульсный источник питания. Величина давления при проведении экспериментов

составляла 133 Па, используемые рабочие газы – воздух, кислород.

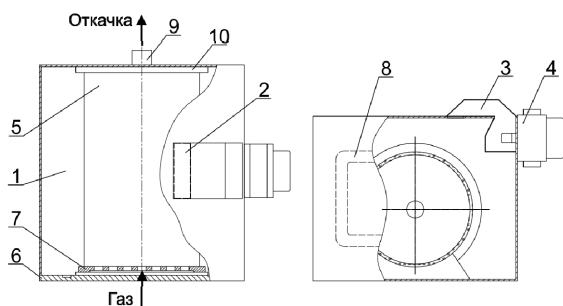


Рисунок 1.1 – Реакционно-разрядная система СВЧ плазменной установки

- 1 – резонатор;
- 2 – отверстие связи;
- 3 – волновод;
- 4 – СВЧ магнетрон;
- 5 – реакционно-разрядная камера;
- 6 – передняя стенка резонатора;
- 7 – фронтальная крышка камеры;
- 8 – смотровое окно;
- 9 – патрубок для откачки;
- 10 – тыльная крышка камеры

Работающий от трёхфазной сети источник питания собран на базе трёх инверторных блоков бытовых микроволновых печей Panasonic. Схема подключения инверторных блоков представлена на рисунке 1.2.

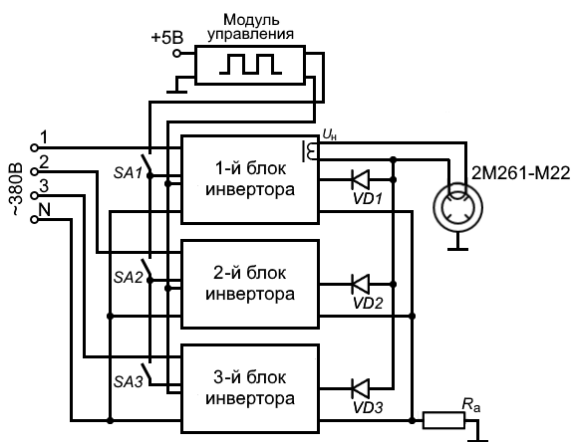


Рисунок 1.2 – Схема подключения блоков импульсного источника питания в составе СВЧ генератора

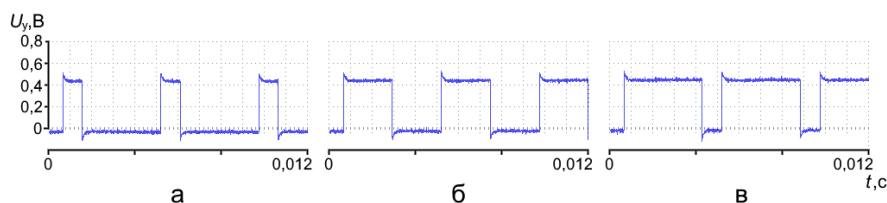


Рисунок 1.3 – Осциллограммы управляющего ШИМ сигнала при различных значениях коэффициента заполнения: а – 20%; б – 50%; в – 80%

Питание каждого блока в составе импульсного источника питания осуществляется от отдельной фазы трехфазной сети 380 В с общим нулём. Импульсный источник питания предусматривает возможность обеспечения работы магнетрона как от отдельного инверторного блока, так и при синхронной совместной работе 2 или 3 блоков одновременно. Управление амплитудным значением выходной мощности СВЧ магнетрона обеспечивается за счет изменения ширины импульсов управляющего ШИМ сигнала в модуле управления. Величина коэффициента заполнения управляющего сигнала устанавливалась в условных процентах. В качестве примера на рисунке 1.3 приведены осциллограммы управляющего сигнала с коэффициентом заполнения 20%, 50% и 80%. Для проведения исследований экспериментально был выбран диапазон значений 15 – 88%, при которых наблюдалась устойчивая генерация плазмы СВЧ разряда.

Одними из основных индикаторов энергетических параметров формируемого СВЧ разряда являются его оптические характеристики. Площадь под огибающей сигнала регистрируемого интегрального оптического свечения плазмы связана с величиной, вкладываемой в разряд СВЧ мощности [8].

При проведении экспериментов с помощью цифрового двухканального осциллографа синхронно регистрировались сигналы анодного тока и интегрального оптического свечения плазмы. Источником сигнала, форма и амплитудное значение которого пропорционально анодному току СВЧ магнетрона, являлся расположенный в цепи заземления источника питания низкоомный резистор R_a (рисунок 1.2), а источником сигнала оптического свечения плазмы СВЧ разряда – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-112.

2 Результаты и их обсуждение

Анализируемые осциллограммы интегрального оптического свечения плазмы регистрировались при различных режимах электропитания СВЧ магнетрона: 1) частота пачек импульсов тока в анодной цепи 100 Гц и их скважностью $S \approx 2$; 2) частота пачек импульсов тока в анодной цепи 100 Гц и их скважностью $S \approx 1,15$; 3) непрерывный режим генерации тока. Указанные

Таблица 2.1 – Значения потребляемой от сети СВЧ генератором мощности в зависимости от выбранного режима электропитания и коэффициента заполнения управляющего ШИМ сигнала модуля управления

Сквозность сигнала тока в анодной цепи	Коэффициент заполнения ШИМ сигнала, %								
	15	20	30	40	50	60	70	80	88
	Потребляемая мощность, Вт								
$S \approx 2$	570	680	860	1030	1220	1380	1560	1770	1860
$S \approx 1,15$	1080	1290	1650	2000	2370	2690	3060	3470	3660
непрерывный режим	1590	1890	2450	2970	3520	4000	4550	5170	5450

режимы получены при включении одновременно в анодную цепь источника питания согласно схеме (рисунок 1.2) одного, двух и трех импульсных блоков соответственно.

С помощью цифрового измерителя мощности фиксировались показания уровня общей потребляемой СВЧ генератором мощности (таблица 2.1).

Пример осциллограммы пачки импульсов сигнала тока в анодной цепи источника питания приведён на рисунке 2.1.

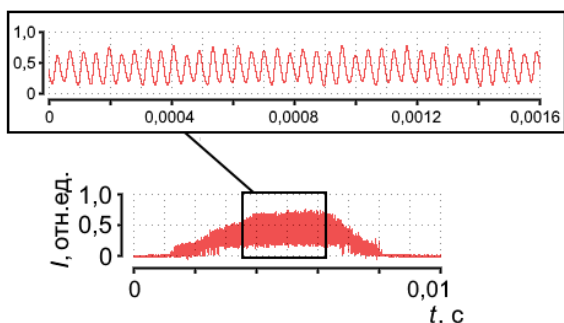


Рисунок 2.1 – Пачка импульсов ($f = 25$ кГц) сигнала тока в анодной цепи импульсного инверторного источника электропитания СВЧ магнетрона

Осциллограммы синхронно зарегистрированных сигналов анодного тока СВЧ магнетрона и интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда при различных значениях потребляемой СВЧ генератором мощности представлены на рисунке 2.2.

Показано, что следование импульсов сигнала анодного тока с высокой частотой (используемый диапазон 20...40 кГц) является достаточным условием для формирования плазменного разряда в непрерывном режиме. Экспериментально полученные результаты показали, что для исследуемого импульсного режима относительно высокое значение мгновенной мощности, обеспечиваемое за короткий промежуток времени, позволяет получить напряжённость электрического поля выше пороговой и достаточную для формирования плазменного разряда. Результаты исследования коррелируют с результатами, полученными в работе [14], где было установлено, что импульсный режим формирования плазменного разряда может характеризоваться наличием задержки процесса рекомбинации ионно-электронных пар.

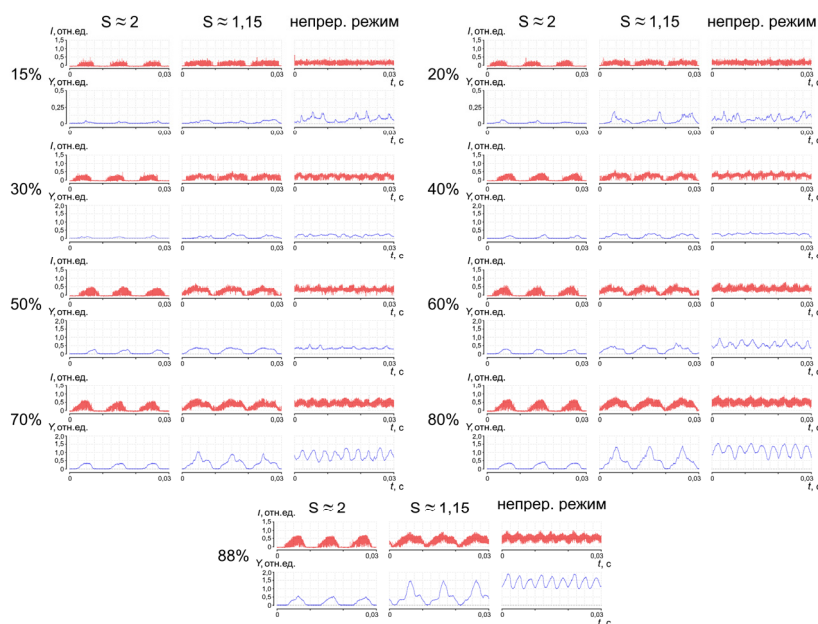


Рисунок 2.2 – Осциллограммы регистрируемых сигналов анодного тока I и оптического свечения плазмы Y при разных значениях потребляемой СВЧ генератором мощности для различных режимов электропитания СВЧ магнетрона

Из представленных результатов видно (рисунок 2.2), что частота генерации пачек импульсов сигнала оптического свечения плазмы для всех режимов работы источника питания соответствует частоте следования пачек импульсов сигнала тока в анодной цепи.

Включение одновременно трёх инверторных блоков импульсного источника питания обеспечивает непрерывный режим анодного тока для всех значений контролируемых мощностей. Сигнал оптического свечения плазмы СВЧ разряда в данном режиме работы имеет при этом постоянную составляющую. При потребляемых мощностях более 2970 Вт постоянная составляющая оптического сигнала более выражена (рисунок 2.2) (отсутствует на отдельных временных интервалах уменьшение уровня сигнала до нулевого значения). Обеспечение подобного непрерывного режима свидетельствует о стабильности генерации плазмы СВЧ разряда.

На основании полученных данных была построена зависимость усредненного амплитудного значения сигнала тока в анодной цепи СВЧ магнетрона от потребляемой СВЧ генератором мощности (рисунок 2.3).

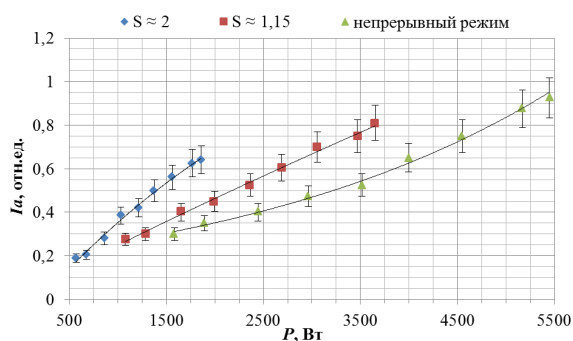


Рисунок 2.3 – Усреднённые амплитудные значения уровня сигналов анодного тока магнетрона для разных значений потребляемой СВЧ генератором мощности

Полученные зависимости (рисунок 2.3) показывают, что с ростом потребляемой мощности наблюдается закономерное увеличение уровня амплитудного значения анодного тока для всех режимов работы импульсного источника питания. Рассматриваемые зависимости имеют характер близкий к линейному.

Для СВЧ магнетронов величина анодного тока связана с величиной генерируемой СВЧ электромагнитной энергии [15]. Амплитудное значение и площадь под огибающей сигнала оптического свечения плазмы, характеризующие степень энерговклада в плазму СВЧ разряда [8], согласно рисунку 2.2, увеличиваются с повышением аналогичных параметров сигнала анодного тока для всех рассматриваемых режимов работы импульсного источника питания. Зависимости усреднённых амплитудных значений уровня оптического сигнала от величины потребляемой

СВЧ разрядной системой мощности представлены на рисунке 2.4. Зависимость усреднённого значения площади (в отн.ед.) под огибающей уровня сигнала оптического свечения плазмы на временном интервале 0,01 сек для всех рассматриваемых величин потребляемых мощностей и режимов работы импульсного источника питания представлены на рисунке 2.5.

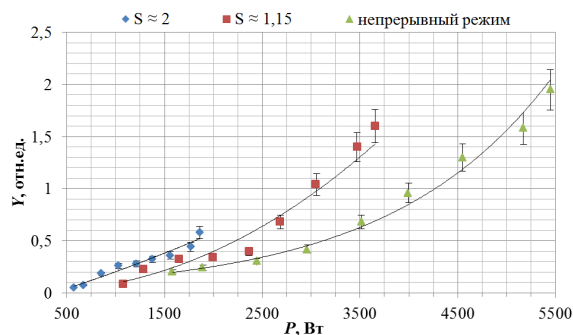


Рисунок 2.4 – Усреднённые амплитудные значения уровня сигналов интегрального оптического свечения плазмы для разных значений потребляемой СВЧ генератором мощности

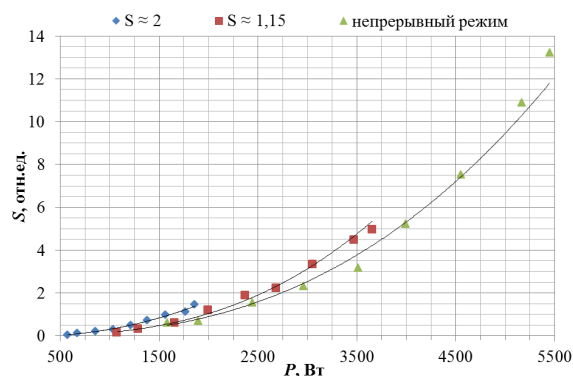


Рисунок 2.5 – Зависимости усреднённого значения площади под огибающей за период 0,01 с от величины потребляемой СВЧ генератором мощности

Согласно представленным на рисунке 2.4 экспериментальным данным увеличение потребляемой СВЧ генератором мощности приводит к увеличению усреднённого амплитудного значения уровня сигнала интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда. Для режимов работы источника питания СВЧ магнетрона со скажностью сигнала тока в анодной цепи $S \approx 1,15$ и в непрерывном режиме при мощностях выше ≈ 2700 Вт и ≈ 4000 Вт соответственно, зависимости приобретают ярко выраженный экспоненциальный характер, наблюдается значительное увеличение уровня исследуемого сигнала интегрального оптического свечения плазмы. При этом для режима работы с использованием одного инверторного блока, обеспечивающего скажностью $S \approx 2$, полученная зависимость близка к линейной.

Как видно из рисунков 2.2 и 2.5 для непрерывного режима работы после значения мощности ≈ 2500 Вт наблюдается значительное увеличение величины площади под огибающей сигнала оптического свечения плазмы. Увеличение данного показателя при анализе представленных зависимостей с ростом потребляемой СВЧ генератором мощности наблюдается и для других режимов работы импульсного источника питания, что может указывать на существенное увеличение энерговыклада в плазму СВЧ разряда.

Заключение

Экспериментально установлена возможность формирования и устойчивого поддержания плазмы СВЧ разряда большого объёма (около 9000 см^3) в крупногабаритной камере СВЧ плазмотрона резонаторного типа в импульсном и непрерывном режиме её генерации при питании СВЧ магнетрона средней мощности от импульсного источника электропитания. Использование импульсного источника электропитания СВЧ магнетрона позволяет улучшить массогабаритные характеристики СВЧ плазменных установок и обеспечить регулировку мгновенной мощности в широком диапазоне значений. Установлено, что уменьшение скважности между пачками импульсов анодного тока и последующий переход к постоянному режиму приводит к увеличению энерговыклада в плазму СВЧ разряда. Этот эффект может быть связан с наличием ионизированных частиц, предположительно не успевающих исчезать между пачками импульсов в результате рекомбинации, прилипания и диффузии частиц на стенки разрядной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. *Microwave plasma emerging technologies for chemical processes* / J.F. de la Fuente [et al.] // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 2017. – Vol. 92, № 10. – P. 2495–2505.
3. Яфаров, Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. – Москва: Физматлит, 2009. – 216 с.
4. Lebedev, Yu.A. Microwave discharges at low pressures and peculiarities of the processes in strongly non-uniform plasma / Yu.A. Lebedev // Plasma Sources Sci. Technol. – 2015. – Vol. 24, № 5. – 39 pp.
5. Диденко, А.Н. СВЧ-энергетика / А.Н. Диденко, Б.В. Зверев. – Москва: Наука, 2000. – 262 с.

6. Ganachev, I. Advanced large-area microwave plasmas for materials processing / I. Ganachev, H. Sugai // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174–175. – P. 15–20.

7. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. – Москва: Мир, 1971. – Т. 1: Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике. – 247 с.

8. Мадвейко, С.И. Схемотехнические особенности источника питания СВЧ-магнетрона непрерывного режима генерации для работы в составе плазменного технологического оборудования / С.И. Мадвейко, С.В. Бордусов // Доклады БГУИР. – 2010. – Т. 6, № 52. – С. 30–34.

9. *A large volume microwave plasma source* / J.H. Bowles [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67, № 2. – P. 455–461.

10. Meiners, L.G. Simple low-cost microwave plasma source / L.G. Meiners, D.B. Alford // Rev. Sci. Instrum. – 1986. – Vol. 57, № 2. – P. 164–168.

11. Рогожин, К.В. Особенности работы магнетрона с инверторным блоком питания в микроволновых промышленных установках / К.В. Рогожин // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 510–514.

12. *Panasonic Microwave Ovens with Inverters Technical Manual* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.manualslib.com/manual/764833/Panasonic-Microwave-Ovens-With-Inverters.html>. – Дата доступа: 07.05.2021.

13. Tsikhan, O.I. Study of pulsed and continuous modes of microwave discharge plasma generation on a resonator-type plasmatron / O.I. Tsikhan, S.I. Madveika, S.V. Bordusau // High Temperature Material Processes. – 2021. – Vol. 25, № 2. – P. 65–75.

14. *Large area, low temperature nano crystalline diamond coating technology with microwaves: Linear coaxial antenna approach – an alternative to slotted antennas* / Semantic Scholar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Large-area%2C-low-temperature-nano-crystalline-with-%E2%80%93-Liehr/bdb7fe32e595a3058ca0a1c73f857e6806ed75b6#related-papers>. – Дата доступа: 08.11.2021.

15. Pueschner, H. Heating with microwaves: fundamentals, components and circuit technique / H. Pueschner – Eindhoven, the Netherlands: Philips Technical Library, 1966. – 320 p.

Поступила в редакцию 30.06.2022.

Информация об авторах

Тихон Олег Игоревич – инженер

Мадвейко Сергей Игоревич – к.т.н., доцент

Бордусов Сергей Игоревич – д.т.н., профессор