

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494>

УДК 621.387.143

Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазматрона резонаторного типа

О. И. Тихон¹⁾, канд. техн. наук, доц. С. И. Мадвейко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Изучено влияние электрических характеристик импульсного источника питания сверхвысокой частоты (СВЧ) магнетрона на условия формирования СВЧ разряда, определяемые режимом работы СВЧ генераторной системы в целом. Формирование плазменного разряда осуществлялось в вакуумируемом реакционно-разрядном объеме, расположенном внутри прямоугольной резонаторной камеры. В зависимости от режимов работы источника электропитания СВЧ магнетрона проведены исследования для трех режимов генерации плазмы СВЧ разряда (импульсный режим со скажностью $S \approx 2$; импульсный режим со скажностью $S \approx 1,15$; непрерывный режим). Выполнены зондовые измерения величины мощности СВЧ в объеме плазмы СВЧ разряда и ее локальной проводимости. В работе представлены зависимость мощности СВЧ энергии в центральной области реакционно-разрядной кварцевой камеры СВЧ плазматрона от величины потребляемой СВЧ магнетроном мощности, а также распределение электрической составляющей плазмы СВЧ разряда по длине и плоскости сечения рабочего объема. Установлено, что для всех исследуемых режимов работы источника питания с повышением потребляемой мощности СВЧ генераторной системой характерно увеличение СВЧ мощности, регистрируемой в центральной области плазменного разряда. Для непрерывного режима генерации свойственно снижение неравномерности распределения электромагнитной энергии по оси разрядной камеры. Показано, что переход от импульсного к непрерывному режиму формирования плазменного СВЧ разряда при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется снижением величины регистрируемой СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный разряд, сверхвысокочастотный магнетрон, импульсный источник питания, мощность сверхвысокой частоты, локальная проводимость плазмы

Для цитирования: Тихон, О. И. Влияние электрических характеристик импульсного источника питания СВЧ магнетрона на условия формирования плазмы в вакуумной камере плазматрона резонаторного типа / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 487–494. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494>

Influence of the Electrical Characteristics of Pulsed Microwave Magnetron Power Supply on the Conditions for Plasma Formation in the Vacuum Chamber of Resonator-Type Plasmatron

O. I. Tsikhan, S. I. Madveika

¹⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the research results of the influence of the electrical characteristics of a pulsed microwave magnetron power supply on the microwave discharge generation conditions, determined by the operating mode of the microwave

Адрес для переписки

Мадвейко Сергей Игоревич
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: kritgar@bsuir.by

Address for correspondence

Madveika Siarhei I.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovka str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: kritgar@bsuir.by

generating system as a whole. Plasma was formed in a vacuumized reaction-discharge volume located inside a rectangular resonator chamber. Depending on the operating modes of the microwave magnetron power supply, studies have been conducted for three modes of microwave discharge plasma generation: pulsed mode with a duty factor $S \approx 2$; pulsed mode with a duty factor $S \approx 1.15$; continuous mode. Probe measurements of the microwave power in the microwave discharge plasma volume and its local conductivity have been carried out. The paper presents the dependence of the power of microwave energy in the central area of the reaction-discharge quartz chamber of a microwave plasmotron on the amount of power consumed by the microwave magnetron, as well as the distribution of the electrical component of the microwave discharge plasma along the length and cross-sectional plane of the working volume. It has been established that for all studied modes of operation of the power source, with an increase in the power consumption of the microwave generator system, an increase in the microwave power recorded in the central region of the plasma discharge is characteristic. The continuous generation mode is characterized by a decrease in the uneven distribution of electromagnetic energy along the axis of the discharge chamber. It is shown that the transition from a pulsed to a continuous mode of microwave plasma discharge generation at the same level of power consumption by the generating system is characterized by a decrease in the value of the registered microwave power in the microwave discharge plasma volume and an increase in its local conductivity in particular areas of the reaction-discharge volume.

Keywords: microwave discharge, microwave magnetron, pulsed power supply, microwave power, local plasma conductivity

For citation: Tsikhan O. I., Madveika S. I. (2023) Influence of the Electrical Characteristics of Pulsed Microwave Magnetron Power Supply on the Conditions for Plasma Formation in the Vacuum Chamber of Resonator-Type Plasmatron. *Science and Technique*. 22 (6), 487–494. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-487-494> (in Russian)

Введение

Новые задачи и постоянно растущие требования субмикронной микро- и наноэлектроники стимулируют поиск новых способов направленного плазменного воздействия на обрабатываемые конденсированные среды. Актуальной задачей остается повышение эффективности реализуемых и создание новых технологических процессов. С точки зрения энерго- и ресурсосбережения, особое внимание уделяется многократно повторяющимся операциям в одном технологическом цикле, к которым относится сверхвысокочастотное (СВЧ) плазмохимическое удаление фоторезистивных покрытий с поверхности полупроводниковых пластин, реализуемых с использованием плазмотронов технологического назначения [1, 2].

Практический интерес представляет обеспечение возбуждения и поддержания СВЧ плазмы большого объема в плазмотронах, разработанных на базе объемных резонаторов, позволяющих выполнять плазмохимическую обработку полупроводниковых материалов большой площади при использовании в качестве источников энергии малогабаритных бытовых СВЧ магнетронов средней мощности. Ввиду особенностей работы СВЧ магнетрона на нестационарную нагрузку большое внимание необходимо уделять выбору его источника питания, который позволил бы обеспечить эффективную работу магнетрона на плазменную нагрузку при сохранении его надежности и долговечности.

Известно, что одним из ключевых параметров, влияющим на электро- и физико-химические характеристики формируемой плазмы, является вводимая в разряд мощность [3]. Режим работы магнетрона, а следовательно, и режим генерации плазмы при этом зависят от параметров тока в анодной цепи источника питания СВЧ магнетрона [4, 5].

Разработанное и используемое при проведении исследований техническое решение импульсного источника питания СВЧ магнетрона [6, 7] позволяет регулировать мгновенную мощность в широком диапазоне за счет управления амплитудой импульсов тока и дает возможность сформировать плазму СВЧ разряда как в импульсном, так и непрерывном режиме генерации.

Вопрос изучения параметров и свойств плазмы СВЧ разряда большого объема, формируемой при различных условиях электропитания СВЧ генераторов с применением разрядных устройств резонаторного типа, в научно-исследовательской литературе пока не нашел глубокой проработки. Потенциальная возможность совершенствования и оптимизации конструктивного исполнения существующих технических решений СВЧ плазмотронов резонаторного типа обосновывает необходимость выполнения качественных исследований, а также разработки методологии и рекомендаций по внедрению данного типа устройств в различные технологические процессы вакуумно-плазменной обработки.

Таким образом, целью проведенного исследования являлось изучение характеристик формируемого СВЧ разряда, определяемых режи-

мом работы СВЧ генераторной системы, путем проведения зондовых измерений величины мощности СВЧ в объеме плазмы и ее локальной проводимости.

Методика проведения экспериментов

Наиболее распространенными методами контроля параметров возбуждаемого СВЧ разряда являются зондовые методы диагностики [8, 9]. Их преимущества заключаются в относительной простоте реализации, локальности и многообразии измеряемых параметров. Применение таких методов измерений позволяет изучить влияние режима генерации электромагнитной энергии при работе СВЧ магнетрона в составе плазмотрона на характеристики СВЧ разряда.

Экспериментальные исследования проводились на базе СВЧ вакуумно-плазменной установки резонаторного типа, схематически представленной на рис. 1 [5].

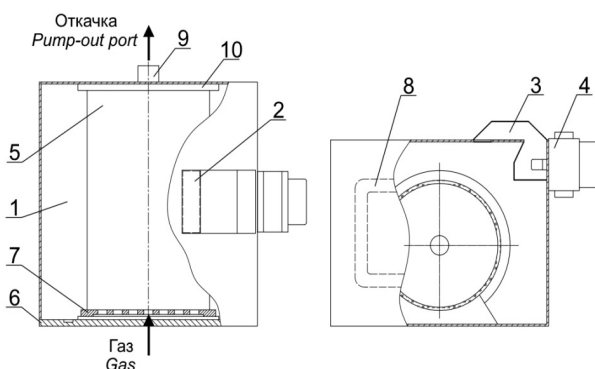


Рис. 1. Схематичное изображение реакционно-разрядной системы сверхвысокочастотной плазменной установки:

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

Fig. 1. Schematic representation of reaction-discharge system of the microwave plasma unit:

- 1 – resonator; 2 – energy input slot; 3 – waveguide;
- 4 – microwave magnetron; 5 – reaction-discharge chamber;
- 6 – front wall of the resonator; 7 – front lid of the chamber;
- 8 – viewing window; 9 – pipe for pumping out;
- 10 – back lid of the chamber

Основным элементом сверхвысокочастотного плазмотрона является прямоугольная резонаторная камера, в объем которой вводится электромагнитная энергия через волноводный тракт.

Источником энергии выступает малогабаритный СВЧ магнетрон средней мощности 2М261, для питания которого был использован трехфазный импульсный источник питания [6]. Внутри объемного резонатора располагается вакуумируемая реакционно-разрядная камера туннельного типа объемом около 9000 см³, выполненная из кварцевого стекла. При проведении экспериментов величина давления в рабочем объеме устанавливалась на уровне 133 Па, оптимальном для проведения процессов СВЧ плазмохимического травления фоторезистивных слоев, в качестве рабочего газа использован воздух.

Исследования проводились при трех режимах работы импульсного источника электропитания СВЧ магнетрона: импульсном режиме работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; импульсном режиме работы со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; непрерывном режиме работы.

Оценка величины мощности СВЧ в объеме плазмы разряда осуществлялась с использованием «активного» СВЧ зонда [10], конструкция которого представлена на рис. 2.

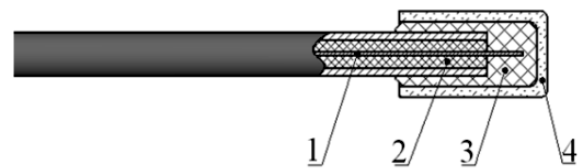


Рис. 2. Внешний вид «активного» зонда:

- 1 – центральная жила; 2 – изоляция зонда;
- 3 – дополнительная фторопластовая изоляция;
- 4 – кварцевый колпачок

Fig. 2. Appearance of the “active” probe:

- 1 – central core; 2 – probe insulation; 3 – additional fluoroplastic insulation; 4 – quartz cap

Зонд вводился в реакционно-разрядный объем через герметичный ввод в торцевой крышке камеры и перемещался по оси рабочей камеры СВЧ плазмотрона в процессе проведения экспериментов (рис. 3). Через высокочастотный разъем посредством 50-омного переходника зонд был подключен к измерителю мощности МЗ-28. В состав измерителя входят высокочастотный переключатель и термисторный мост Я2М-64, способный путем измерения полного сопротивления термистора при поглощении мощности высокочастотных колебаний регистрировать величину мощности СВЧ волны.

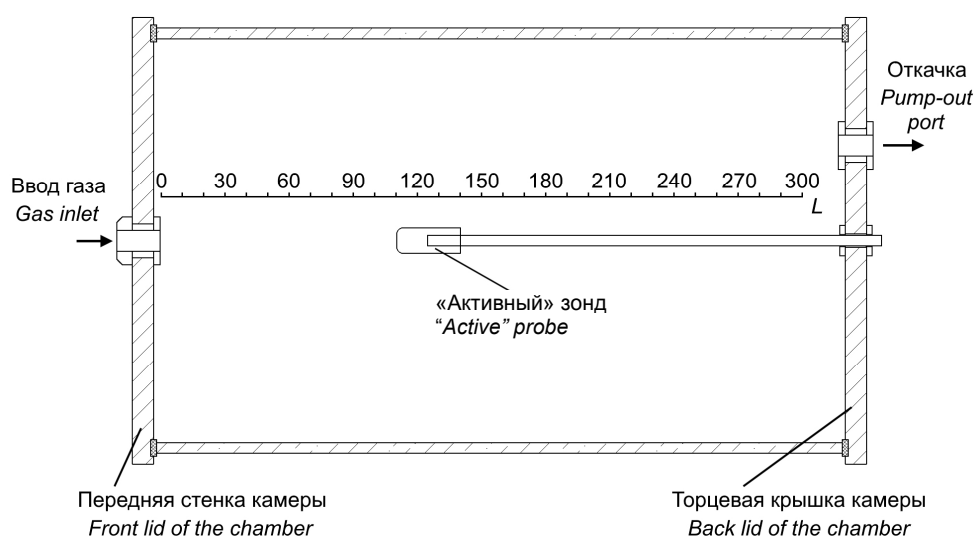


Рис. 3. Схематичное изображение расположения «активного» зонда в объеме рабочей камеры при проведении измерений
 Fig. 3. Schematic representation of the "active" probe position in the reaction chamber volume during the measurements

Величину локальной проводимости СВЧ плазмы измеряли с использованием электрического зонда, представляющего собой плоские электроды из нержавеющей стали размером 5×5 мм, расположенные симметрично на расстоянии 5 мм друг от друга (рис. 4).

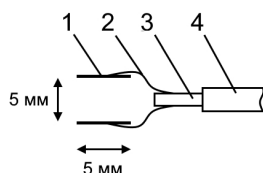


Рис. 4. Внешний вид электрического зонда:
 1 – плоский электрод; 2 – проволочный вывод зонда;
 3 – керамическая трубка; 4 – металлический чехол

Fig. 4. Appearance of the electrical probe:
 1 – flat electrode; 2 – wire lead of the probe;
 3 – ceramic tubing; 4 – metal casing

Проволочные выводы зонда, соединенные с нерабочими сторонами электродов, были пропущены через керамическую трубку, помещенную в металлический чехол из меди. Вакуумно уплотненная с обратной стороны трубка вводилась в рабочую камеру через герметичный ввод в торцевой крышке. Использование подобной конструкции электрического зонда позволило осуществить измерения зондового тока (мА) в различных локальных областях возбуждаемого плазменного разряда путем его перемещения в объеме реакционно-разрядной камеры.

Описанные методики проведения исследований позволили оценить влияние электриче-

ских характеристик импульсного трехфазного источника питания СВЧ магнетрона на величину СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и его локальную проводимость, которая может быть связана с концентрацией электронов, являющейся наиболее важным параметром для процессов удаления материалов с поверхности полупроводниковых пластин.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований величины СВЧ мощности в центральной области рабочей камеры СВЧ плазмотрона для всех исследуемых режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона представлены на рис. 5.

Анализ представленных результатов измерений показывает, что с увеличением мощности питания СВЧ магнетрона для всех режимов работы наблюдается рост мощности СВЧ энергии в объеме плазмы. При переходе от импульсного к постоянному режиму генерации плазмы степень зависимости роста мощности СВЧ энергии в центральной области разрядной камеры от мощности источника питания уменьшается. При работе СВЧ магнетрона от источника питания в непрерывном режиме генерации тока после ≈3500 Вт можно отметить скачок регистрируемой величины мощности СВЧ энергии в камере, который не наблюдался для других режимов работы источника питания.

Данное изменение уровня мощности соотносится с результатами исследований влияния величины электрической мощности и режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона на параметры интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда, где при таких же мощностях отмечается скачок амплитудного значения интегрального оптического свечения плазмы СВЧ разряда [6].

Экспериментально установлено, что при энергопотреблении СВЧ генераторной системой мощности ~ 1850 Вт переход от импульсного к непрерывному режиму генерации плазмы сопровождается уменьшением величины регистрируемой СВЧ мощности в рабочей камере в 2,8 раза (рис. 5).

Для анализа равномерности распределения величины СВЧ мощности в плазме СВЧ разряда регистрировались показания «активного» зонда через определенные промежутки на оси разрядной камеры. Согласно полученным результатам для всех исследуемых режимов работы с увеличением потребляемой мощности СВЧ генераторной системой характерно повышение СВЧ мощности во всех рассмотренных точках рабочей камеры. Для непрерывного режима генерации плазмы СВЧ разряда харак-

терно увеличение равномерности распределения электромагнитной энергии по оси разрядной камеры СВЧ плазмотрона. При этом повышение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ энергии по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы.

Результаты экспериментальных исследований электрической составляющей плазмы СВЧ разряда для всех исследуемых режимов работы импульсного источника питания СВЧ магнетрона при уровне энергопотребления СВЧ генераторной системой ~ 1850 Вт представлены на рис. 6. Электрический зонд при проведении исследований перемещался по оси разрядной камеры. Через определенные промежутки проводилась регистрация показаний электрического зонда.

Полученные данные коррелируют с результатами регистрации процесса формирования СВЧ плазменного разряда (рис. 7). Как видно из представленной фотографии, в верхней части разрядной камеры присутствуют ярко светящиеся области плазмообразования, расположение которых по длине разрядной камеры соответствует экстремумам показаний электрического зонда, представленным на рис. 6.

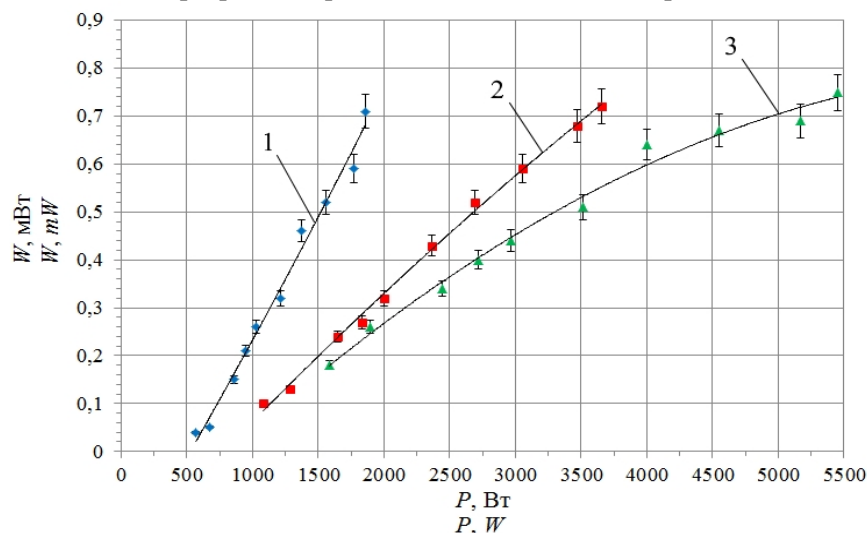


Рис. 5. Зависимость величины мощности сверхвысокочастотной энергии в центральной области рабочей камеры сверхвысокочастотного плазмотрона от величины потребляемой магнетроном сверхвысокочастотной мощности:

1 – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; 2 – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; 3 – непрерывный режим работы

Fig. 5. Dependence of the value of microwave energy power in the reaction chamber central area of the microwave plasma unit on the amount of microwave magnetron power consumption: 1 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$; 2 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1,15$; 3 – a continuous operation mode

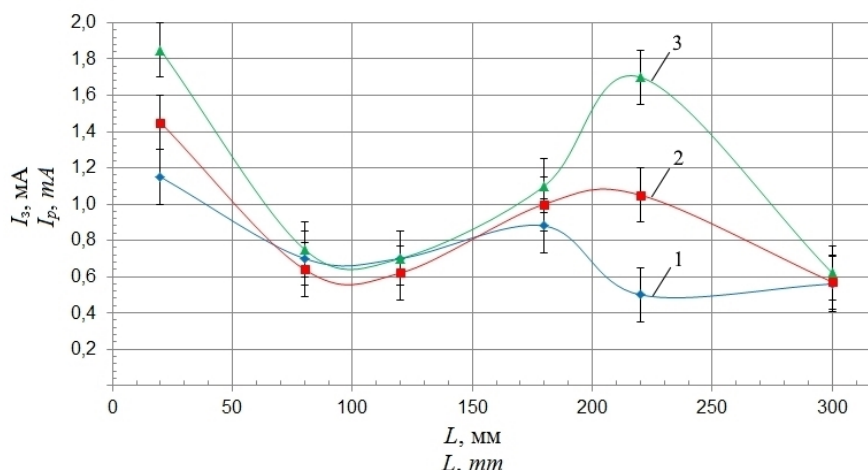


Рис. 6. Показания электрического зонда по длине разрядной камеры (энергопотребление сверхвысокочастотной генераторной системой ~1850 Вт): 1 – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; 2 – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; 3 – непрерывный режим работы

Fig. 6. Electrical probe readings along the length of the discharge chamber (microwave generator system power consumption ~1850 W): 1 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$; 2 – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1.15$; 3 – a continuous operation mode

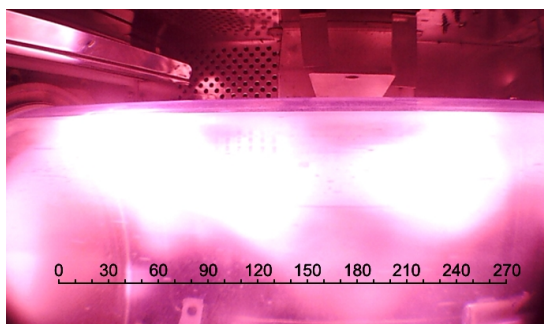


Рис. 7. Кварцевая камера сверхвысокочастотного плазмотрона с находящимся внутри плазменным образованием

Fig. 7. Quartz chamber of the microwave plasma unit with plasma formed inside

Согласно полученным экспериментальным результатам, уменьшение скважности импульсного сигнала анодного тока СВЧ магнетрона и дальнейший переход к непрерывному режиму работы источника питания при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системы характеризуются ростом локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема.

Полученные результаты указывают на наличие неоднородностей плазменного формирования в разрядной камере СВЧ плазмотрона, пространственное распределение которых сохраняется в объеме камеры для всех режимов работы СВЧ генераторной системы.

Влияние режима формирования СВЧ разряда на электрическую составляющую плазмы изучено путем исследования равномерности распределения проводимости плазмы по плоскости сечения плазменного разряда (рис. 8). Измерения проводились на расстоянии 180 мм от передней стенки камеры, электрический зонд перемещался в радиальном направлении.

Полученные показания электрической составляющей плазмы значительно отличаются в разных точках плоскости сечения кварцевого реактора. Значения зондового тока уменьшались при смещении зондов ближе к центру камеры во всех радиальных направлениях. Установлено, что области плазменного образования с наибольшими значениями зарегистрированной электрической составляющей 3,8; 4,2 и 5,2 мА, соответствующими трем режимам работы СВЧ генераторной системы, располагаются в верхней области реактора ближе к отверстию связи резонатора.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что переход от импульсного к непрерывному режиму генерации плазмы при одинаковой потребляемой мощности СВЧ генераторной системой приводит к увеличению значений проводимости плазменного объема.

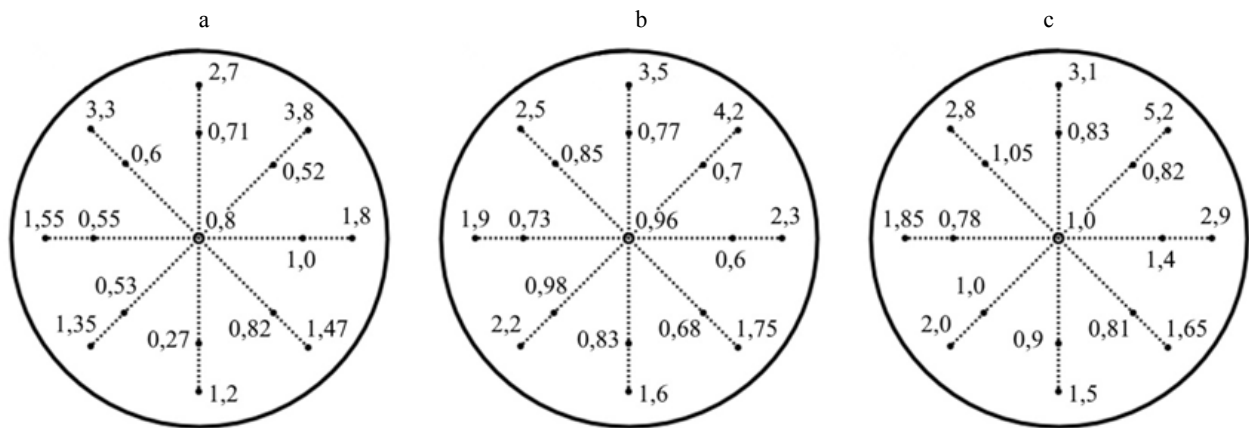


Рис. 8. Распределение электрической составляющей плазмы (mA) в радиальном направлении по плоскости сечения рабочей камеры сверхвысокочастотного плазмотрона: а – импульсный режим работы со скважностью анодного тока $S \approx 2$; б – то же со скважностью анодного тока $S \approx 1,15$; в – непрерывный режим работы

Fig. 8. Distribution of the plasma electric component (mA) in the radial direction over the cross-section plane of the microwave plasma unit reaction chamber: а – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 2$; б – a pulsed operation mode with the anode current duty factor $S \approx 1.15$; в – a continuous operation mode

В отдельных единичных точках на плоскости сечения разрядной камеры значения электрической составляющей плазмы не описываются представленной закономерностью, что может быть связано с разнесением измерений по времени, влиянием положения зонда в объеме камеры на перераспределение параметров плазменного формирования и т.д.

ВЫВОДЫ

1. Переход от импульсного к непрерывному режиму работы источника электропитания СВЧ магнетрона при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется снижением величины регистрируемой СВЧ мощности в объеме плазмы СВЧ разряда и ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема. Полученные результаты можно объяснить тем, что уменьшение скважности импульсов анодного тока источника электропитания СВЧ магнетрона приводит к уменьшению скважности следования импульсов плазменных формирований. Распад плазмы между импульсами плазменных формирований происходит не полностью, и значительная часть электронов и других возбужденных частиц может оставаться в разрядном объеме.

2. Непрерывный режим генерации плазмы СВЧ разряда может характеризоваться нарастанием концентрации электронов в плазменном объеме и, как показали экспериментальные результаты, увеличением равномерности распределения электромагнитной энергии в объеме разрядной камеры СВЧ плазмотрона. При этом увеличение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ энергии по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы.

3. Данный эффект может быть связан с наличием скин-слоя, способствующего переотражению части СВЧ мощности в резонаторной камере, при этом большая часть СВЧ энергии может поглощаться в нем. В этом случае электрофизические свойства плазмы в центральной области плазменного разряда будут характеризоваться энергией электронов, которые вырываются из скин-слоя.

4. Полученные результаты могут быть использованы как при разработке нового плазменного технологического оборудования, так и при модернизации существующего с учетом вопросов энерго- и ресурсосбережения при проведении технологических процессов обработки материалов микро- и нанoeлектроники.

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. Плазменные процессы в производстве электронной техники: в 3 т. / А. П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко. Минск: ФУАинформ, 2001. Т. 3. 244 с.
3. Яфаров, Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р. К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
4. Хлопов, Ю. Н. Магнетрон / Ю. Н. Хлопов. М.: Знание, 1967. 50 с.
5. 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, No 2. P. 65–75. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2021039440>.
6. 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. https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42.
7. Исследование характера изменения величины СВЧ мощности в плазменном объеме при квазипостоянном режиме ее генерации / О. И. Тихон [и др.] // *Приборостроение – 2021: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноября 2021 г.* / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2021. С. 357–358.
8. Алексеев, Б. В. Зондовый метод диагностики плазмы / Б. В. Алексеев, В. А. Котельников. М.: Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
9. Животов, В. К. Диагностика неравновесной химически активной плазмы / В. К. Животов, В. Д. Русанов, А. А. Фридман. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
10. Investigation of the Method of Dynamic Microwave Power Redistribution in a Resonator-Type Plasmatron / S. Madveika [et al.] // *Plasma Physics and Technology*. 2018. Vol. 5, No 2. P. 60.

Поступила 19.05.2023

Подписана в печать 25.07.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Bordusov S. V. (2002) *Plasma Microwave Technologies in the Production of Electronic Equipment*. Minsk, Bestprint Publ. 452 (in Russian).
2. Dostanko A. P., Bordusov S. V., Svadkovskii I. V., Kundas S. P., Bosyakov M. N., Anufriev L. P., Lugscheider E. (2001) *Plasma Processes in the Production of Electronic Equipment. Vol. 3*. Minsk, FUAinform Publ. 244 (in Russian).
3. Yafarov R. K. (2009) *Physics of Microwave Vacuum-Plasma Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ. 216 (in Russian).
4. Khlopov Yu. N. (1967) *Magnetron*. Moscow, Znanie Publ. 50 (in Russian).
5. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2021) Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron. *High Temperature Material Processes*, 25 (2), 65–75. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2021039440>.
6. Tsikhan O. I., Madveiko S. I., Bordusov S. V. (2022) The Study of the Microwave Magnetron Pulse Power Supply Electrical Parameters Influence on the Microwave Discharge Plasma Generation Modes. *Problemy Fiziki, Matematiki i Tekhniki = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 3 (52), 42–47 (in Russian). https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_42.
7. Tikhon O. I., Madveiko S. I., Bordusov S. V., Dostanko A. P., Lyakh A. S., Zhavoronok I. A. (2021) Study of the Nature of Changes in the Magnitude of Microwave Power in a Plasma Volume Under a Quasi-Constant Mode of Its Generation. *Priborostroenie – 2021: Materialy 14-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 17–19 Noyabrya 2021 g.* [Instrumentation – 2021: Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference, Minsk, November 17–19, 2021]. Minsk, 357–358 (in Russian).
8. Alekseev B. V., Kotelnikov V. A. (1988) *Probe Method for Plasma Diagnostics*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 240 (in Russian).
9. Zhivotov V. K., Rusanov V. D., Fridman A. A. (1985) *Diagnostics on Non-Equilibrium Chemically Active Plasma*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 216 (in Russian).
10. Madveika S., Bordusau S., Zemlyakov A., Lushakova M. (2018) Investigation of the Method of Dynamic Microwave Power Redistribution in a Resonator-Type Plasmatron. *Plasma Physics and Technology*, 5 (2), 60.

Received: 19.05.2023

Accepted: 25.07.2023

Published online: 30.11.2023