



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47>

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА

М. С. ЛУШАКОВА, С. И. МАДВЕЙКО, О. И. ТИХОН

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

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния электромагнитной энергии сверхвысокочастотного диапазона на низкочастотную составляющую плазмы комбинированного (сверхвысокочастотного и низкочастотного) разряда. Экспериментально изучены выходные электрические параметры низкочастотного генератора и оптические характеристики плазмы комбинированного разряда среднего вакуума. Определено, что в процессе генерации разряда, сформированного при одновременном воздействии в едином разрядном объеме сверхвысокочастотных и низкочастотных полей при давлении 20–100 Па возможно проявление эффекта контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда. Данный эффект заключается в изменении под действием магнитного поля условий переноса тока в плазменном слое между электродами, что приводит к уменьшению амплитуды выходного напряжения низкочастотного генератора. Установлена зависимость изменения амплитуды напряжения низкочастотного генератора от выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора.

Ключевые слова: низкочастотный генератор, электромагнитная энергия, комбинированный разряд, плазма, интегральное свечение, контрагирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лушакова, М. С. Исследование электрических параметров низкочастотного генератора при формировании комбинированного разряда / М. С. Лушакова, С. И. Мадвейко, О. И. Тихон // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47>.

STUDY OF ELECTRICAL PARAMETERS OF A LOW-FREQUENCY GENERATOR DURING THE FORMATION OF A COMBINED DISCHARGE

MARIA S. LUSHAKOVA, SIARHEI I. MADVEIKA, OLEG I. TSIKHAN

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

Abstract. The article presents the results of a study examining the influence of microwave electromagnetic energy on the low-frequency component of a combined (microwave and low-frequency) discharge plasma. The output electrical parameters of a low-frequency generator and the optical characteristics of a combined medium-vacuum discharge plasma were experimentally studied. It was determined that, during the generation of a discharge formed by the simultaneous action of microwave and low-frequency fields in a single discharge volume at a pressure of 20–100 Pa, a constriction effect of the low-frequency component of the combined discharge may occur. This effect consists of a change in the current transfer conditions in the plasma layer between the electrodes under the influence of a magnetic field, which leads to a decrease in the amplitude of the low-frequency generator output voltage. The dependence of the change in the voltage amplitude of the low-frequency generator on the output power of the microwave generator power source was established.

Keywords: low-frequency generator, electromagnetic energy, combined discharge, plasma, integral glow, contraction.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Lushakova M. S., Madveika S. I., Tsikhan O. I. (2025) Study of Electrical Parameters of a Low-Frequency Generator During the Formation of a Combined Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 39–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-39-47> (in Russian).

Введение

В современной технологии полупроводниковой техники все чаще используются установки, включающие в себя воздействие на обрабатываемые объекты комбинаций различных разрядов, таких как сверхвысокочастотные (СВЧ), низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) [1]. Даные решения более сложные для реализации. Однако они позволяют использовать дополнительное управление параметрами плазменного разряда. Сложности реализации таких технологических систем связаны с наложением различных частот в едином объеме плазменной камеры и с их влиянием друг на друга. Характер взаимодействия в едином плазменном объеме полей разных частот одновременно при создании комбинированного разряда требует дополнительного изучения работы формирующих разряд генераторов и конфигурации камеры, которые могут оказывать влияние на работу каждого генератора в отдельности.

Одной из систем для процессов модификации поверхности и удаления материалов микрэлектроники является устройство на базе комбинации СВЧ- и НЧ-полей в едином плазменном объеме. Устройство позволяет эффективно выполнять направленное воздействие на обрабатываемый материал, управлять энергетическим потоком активных частиц, вследствие чего существует возможность улучшения параметров технологических процессов обработки материалов относительно воздействия самостоятельных СВЧ- и НЧ-разрядов.

Источники низких частот формируют «медленное» переменное поле с возможностью импульсного модулирования. При таких частотах можно эффективно управлять плотностью и энергией частиц в плазме за счет изменения амплитуды и формы сигнала [2, 3]. Источники сверхвысоких частот характеризуются эффективной ионизацией, создавая плотный, высокоэнергетический ионно-электронный газ. Таким образом, поддерживается устойчивая плазма с высокой плотностью электронов [4, 5].

В рамках комбинированного разряда НЧ-разрядная система формирует столб тлеющего разряда. НЧ-разряд ускоряет протекание плазменных процессов в камере, позволяет эффективно управлять энергетическими характеристиками плазмы вблизи поверхности обрабатываемого материала, повышает равномерность распределения плазмы в разрядной камере, улучшает качественные характеристики процесса обработки ввиду использования дополнительного способа управления активными частицами. Основным энергетическим источником активных частиц является вклад плазмы СВЧ-разряда в комбинированный разряд.

В связи с тем, что комбинированный разряд сформирован совместным воздействием в едином плазменном объеме СВЧ- и НЧ-полей, необходимо отметить, что на структуру и свойства тлеющего разряда оказывает значительное влияние сверхвысокочастотная электромагнитная энергия. Конструктивно разрядная система сформирована так, что электромагнитная энергия поступает в камеру в поперечном направлении относительно НЧ-разрядной системы. В замкнутом кольцевом прямоугольном волноводе возникают переменное магнитное и электрическое поля, циркулирующие по кольцу, ввиду чего магнитное поле может оказывать влияние на поведение и стабильность плазмы комбинированного разряда.

В публикациях обычно рассматривается процесс контрагирования при воздействии на тлеющий разряд магнитного поля, который представляется сжатием разрядного тока в цилиндрических разрядных системах ввиду вытеснения нагревающегося газа из приосевой области к периферии разрядной камеры [6]. Также известны исследования относительно влияния продольного магнитного поля на катодные части тлеющего разряда в различных газах [7, 8], где показано, что магнитное поле уменьшает напряжение тлеющего разряда, при этом полная светимость разряда и интенсивность отдельных спектральных линий увеличиваются в 10–12 раз. Однако питание тлеющего разряда в [7, 8] осуществлялось источником постоянного тока. Также в [7] был получен результат при исследовании спектра Не в разряде на переменном токе 50 Гц для единичных экспериментов. Необходимо отметить, что данные результаты относятся к экспериментальным научно-исследовательским разработкам разрядных камер с малым плазменным объемом,

конструкция которых не предполагает использования в технологическом цикле производства полупроводниковых приборов.

Следует отметить, что в опубликованных к настоящему времени научно-технических материалах отсутствует глубоко разработанная и экспериментально подтвержденная универсальная теория взаимодействия СВЧ- и НЧ-полей при формировании комбинированного газового разряда в системах технологического назначения. Это приводит к тому, что разрозненный, часто противоречивый эмпирический материал, содержащийся в литературе, не позволяет однозначно прогнозировать характеристики вновь разрабатываемых плазмотронов.

В данной статье представлено исследование влияния электромагнитной энергии СВЧ-разряда на низкочастотный тлеющий разряд при формировании комбинированного разряда с выявлением аномалии поведения электрических параметров НЧ-генератора.

Методика проведения эксперимента

Создание исследуемого комбинированного разряда осуществлялось одновременным введением в разрядный объем СВЧ- и НЧ-полей. Для создания НЧ- поля использовался маломощный НЧ-генератор частотой 33 кГц, который может функционировать в прерывистом (пачками импульсов по 50 Гц) и непрерывном режимах работы. Источником СВЧ-энергии являлся магнетрон М-112, условия работы которого определялись режимом работы его источника питания. В разрядный объем вводилась СВЧ-энергия через щелевые отверстия кольцевого резонатора волноводного типа пачками однополярных импульсов с частотой 50 Гц.

Эксперименты проводились в среде кислорода и тетрафторида углерода (CF_4) ввиду того, что данные газы чаще всего используются в технологии производства полупроводниковых приборов. В частности, в среде кислорода выполняются операции удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин и очистка материалов, а в среде CF_4 – направленное травление кремния для формирования структуры и рельефа поверхности.

Для оценки электрических параметров НЧ-составляющей комбинированного разряда сигнал с потенциального электрода подавался на один из каналов двухканального осциллографа. В синхронном режиме на второй канал выводились данные с фотоэлектронного умножителя ФЭУ-112 для оценки огибающей интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда, либо данные с шунта – для оценки тока НЧ-генератора. Регистрация спектров НЧ-, СВЧ- и комбинированного разрядов проводилась с помощью спектрометра SL 40-2-2048 ISA. Полученные данные обрабатывались для формирования общих спектральных характеристик.

Результаты исследований и их обсуждение

С использованием осциллографа была проведена синхронная регистрация интегрального оптического свечения комбинированного разряда, зафиксированного ФЭУ, и выходного напряжения НЧ-генератора при различных значениях выходной мощности источника питания СВЧ-генератора (от 450 до 1540 Вт) (рис. 1). Исходная выходная мощность НЧ-генератора устанавливалась на максимальном уровне – 270 Вт. Результаты фиксировались в среде кислорода при давлении $p = 70$ Па.

На рис. 1 временной интервал работы СВЧ-генератора одновременно с НЧ-генератором при формировании комбинированного разряда обозначен как τ_1 , область действия только НЧ-генератора – как τ_2 . Экспериментально установлено, что при увеличении выходной мощности источника питания СВЧ-генератора происходит самопроизвольное снижение амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора, что является нетипичным режимом работы. В течение периода τ_2 амплитуда сигнала выходного напряжения НЧ-генератора остается неизменной. Данный эффект может быть связан с изменениями условий генерации плазмы при формировании комбинированного разряда, отличающимися от обособленного НЧ-разряда. Предполагается, что при увеличении выходной мощности источника питания СВЧ-генератора увеличивается воздействие магнитной составляющей СВЧ- поля на НЧ-разряд, в процессе чего может проявляться эффект контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда, которому соответствует данное уменьшение амплитуды напряжения. Это требует особого внимания при определении мощности источников питания как СВЧ-, так и НЧ-генераторов.

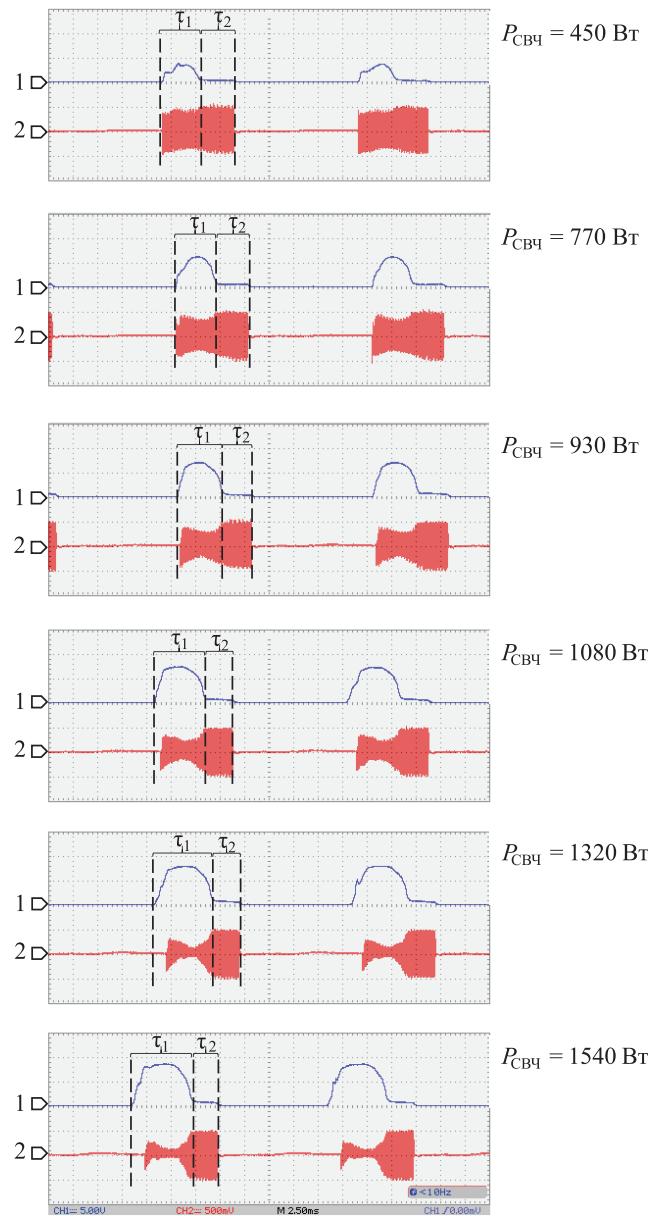


Рис. 1. Осциллографмы интегрального оптического свечения комбинированного разряда (1) и выходного напряжения (2) низкочастотного генератора

при разной выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора

Fig. 1. Oscilloscopes of the integrated optical glow of the combined discharge (1)

and the output voltage (2) of the low-frequency generator

at different output powers of the power source of the ultra-high-frequency generator

На рис. 2 представлены осциллографмы выходного напряжения и тока НЧ-генератора при формировании самостоятельного низкочастотного (рис. 2, а, с) и комбинированного (рис. 2, б, д) разрядов при давлении в разрядной камере 70 и 150 Па. Выходная мощность НЧ-генератора составляла 270 Вт, выходная мощность источника питания СВЧ-генератора – 1320 Вт.

Как показано на рис. 2, б, при давлении 70 Па воздействие электромагнитного поля в процессе формирования комбинированного разряда приводит к изменению значений тока и напряжения низкочастотной составляющей. При включении СВЧ-магнетрона амплитуда пачки импульсов напряжения НЧ-составляющей разряда уменьшается, а амплитуда сигнала тока увеличивается с некоторой временной задержкой. С такими изменениями величина тока остается в рабочем диапазоне функционирования НЧ-генератора и не уменьшается. При давлении 150 Па данный эффект практически не наблюдается (рис. 2, д), в процессе формирования комбинированного

разряда амплитуда пачки импульсов напряжения НЧ-генератора существенно не изменяется и не привязана к импульсам СВЧ-генератора. Небольшое изменение амплитуды напряжения для низкочастотного и комбинированного разрядов при 150 Па может указывать на схемотехнические особенности работы НЧ-генератора, не оказывающие значительных воздействий на формирование комбинированного разряда.

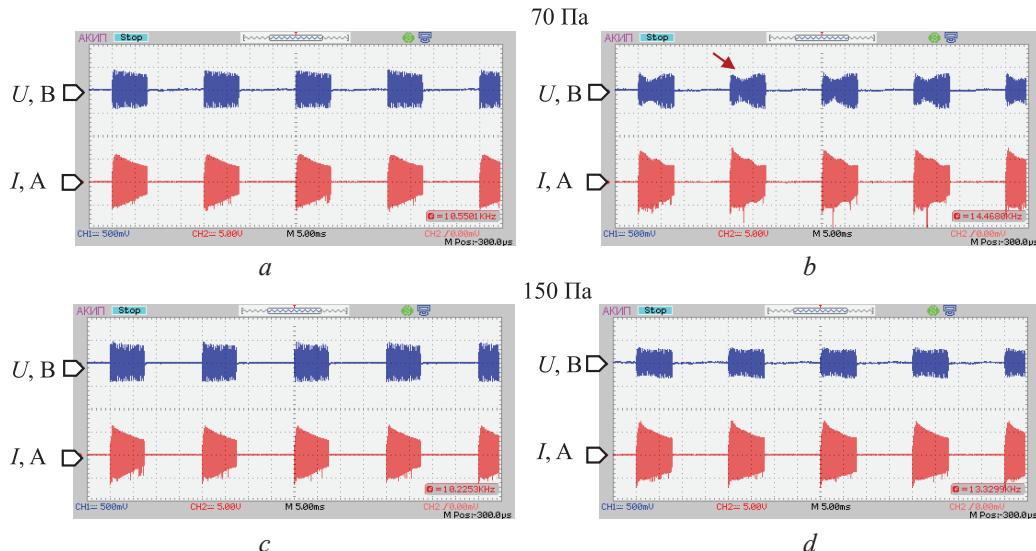


Рис. 2. Осциллографмы выходного напряжения и тока низкочастотного генератора при формировании разряда: a, c – самостоятельного низкочастотного; b, d – комбинированного

Fig. 2. Oscillograms of the output voltage and current of a low-frequency generator during discharge formation: a, c – independent low-frequency; b, d – combined

На рис. 3 представлены осциллографмы выходного напряжения НЧ-генератора и интегрального оптического свечения комбинированного разряда при давлении в разрядной камере 70 и 150 Па. Мощность НЧ-генератора составляла 270 Вт, выходная мощность источника питания СВЧ-генератора – 1320 Вт.

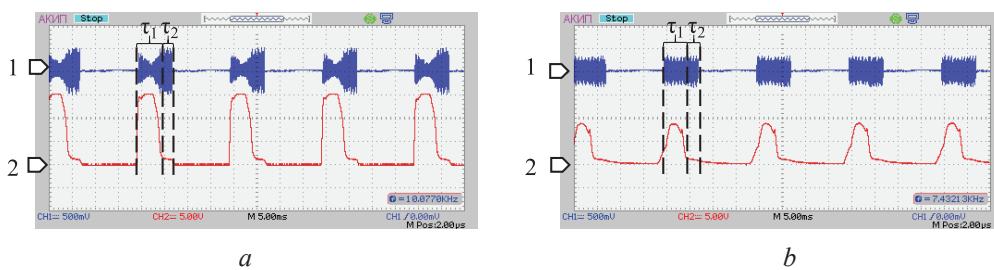


Рис. 3. Осциллографмы выходного напряжения низкочастотного генератора (1) и интегрального оптического свечения комбинированного разряда (2) при давлении, Па: a – 70; b – 150

Fig. 3. Oscillograms of the output voltage of the low-frequency generator (1) and the integrated optical glow of the combined discharge (2) at pressure, Pa: a – 70; b – 150

При анализе представленных данных установлено, что с увеличением мощности источника питания СВЧ-генератора до 1320 Вт при давлении 150 Па на участке импульса τ_1 не происходит значительного изменения амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора (рис. 3, b), как на участке τ_1 при 70 Па (рис. 3, a). Однако амплитуда интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда при давлении 70 Па значительно превышает амплитуду интегрального оптического свечения плазмы комбинированного разряда, сформированного при давлении 150 Па, ввиду изменения условий плазмообразования. Таким образом, самопроизвольное снижение мгновенного выходного напряжения НЧ-генератора при одновременной работе с СВЧ-генератором на плазменную нагрузку при давлении 20–70 Па не может являться результатом схемотехнических особенностей работы НЧ-генератора и указывает на эффект контрагирования низкочастотной оставляющей комбинированного разряда под действием магнитного поля.

По результатам измерений получена зависимость амплитуды выходного напряжения НЧ-генератора при контрагировании разряда (q), рассчитанная относительно амплитуды его выходного напряжения для типичного режима работы, от выходной мощности источника питания СВЧ-генератора ($W_{\text{СВЧ}}$) при давлении 70 и 150 Па (рис. 4).

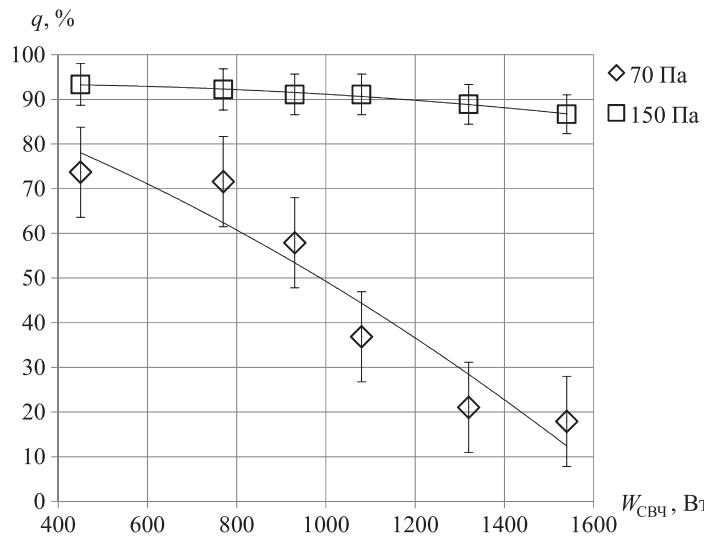


Рис. 4. Зависимость амплитуды выходного напряжения низкочастотного генератора от выходной мощности источника питания сверхвысокочастотного генератора

Fig. 4. Dependence of the output voltage amplitude of a low-frequency generator on the output power of the power source of a microwave generator

При давлении 70 Па зависимость на рис. 4 имеет ярко выраженный нисходящий характер. Увеличение мощности источника питания СВЧ-генератора и, соответственно, мощности, вкладываемой в разряд, усиливает эффект контрагирования. Полученные результаты соотносятся с данными [8, 10], в которых продольное магнитное поле, наложенное только на область отрицательного свечения тлеющего разряда низкого давления (10–70 Па), оказывает значительное влияние на разряд, а именно: светящийся диаметр разряда сжимается в 3–5 раз, общее напряжение на разряде уменьшается примерно в три раза, температура и плотность электронов повышаются на порядок величины.

При давлении 150 Па эффект контрагирования выражен минимально, изменение амплитуды незначительно. Это сопоставимо с результатами [7–10], где с увеличением давления более 150 Па длина положительного столба увеличивается. Также показано, что при давлении в разрядной камере > 150 Па магнитное поле не оказывает значительного влияния на диффузию заряженных частиц и изменение напряжения.

Для исследования интенсивности свечения плазмы комбинированного разряда и отдельных СВЧ- и НЧ-разрядов были изучены их спектральные характеристики (рис. 5, 6) для рабочего давления 70 Па, при котором проявляется эффект контрагирования. Значения на рисунках приведены для отдельных значимых линий спектра, результаты фиксировались в средах CF_4 (рис. 5) и O_2 (рис. 6). На рис. 5 λ – длина волны, которую испускают различные элементы, молекулы, атомы в плазме и формируют плазменное свечение.

Анализ результатов исследований показал, что интенсивность свечения плазмы комбинированного разряда превышает интенсивность свечения отдельных НЧ- и СВЧ-разрядов. Увеличение интенсивности свечения плазмы комбинированного разряда может быть связано с процессом контрагирования НЧ-составляющей комбинированного разряда ввиду воздействия электромагнитных полей. Также увеличение интенсивности свечения может быть следствием более высокой степени ионизации (до 7 %) и плотности плазмы (от 10^{10} до 10^{13} см^{-3}) [11] СВЧ-составляющей комбинированного разряда, по сравнению с НЧ-разрядом. Это обеспечивает сравнительно высокую концентрацию химически активных радикалов и фрагментов молекул в объеме плазмы комбинированного разряда.

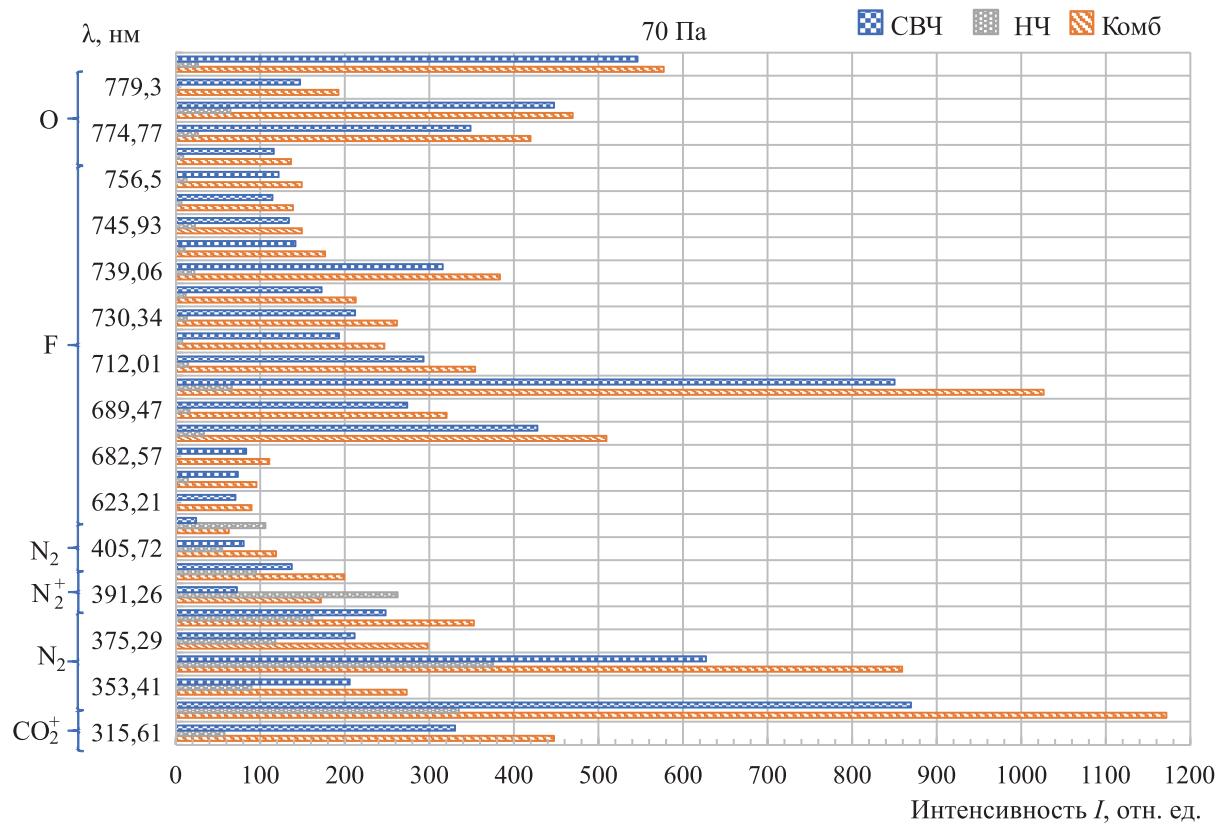


Рис. 5. Спектральные характеристики отдельных линий при давлении 70 Па в среде CF_4
Fig. 5. Spectral characteristics of individual lines at a pressure of 70 Pa in a CF_4 medium

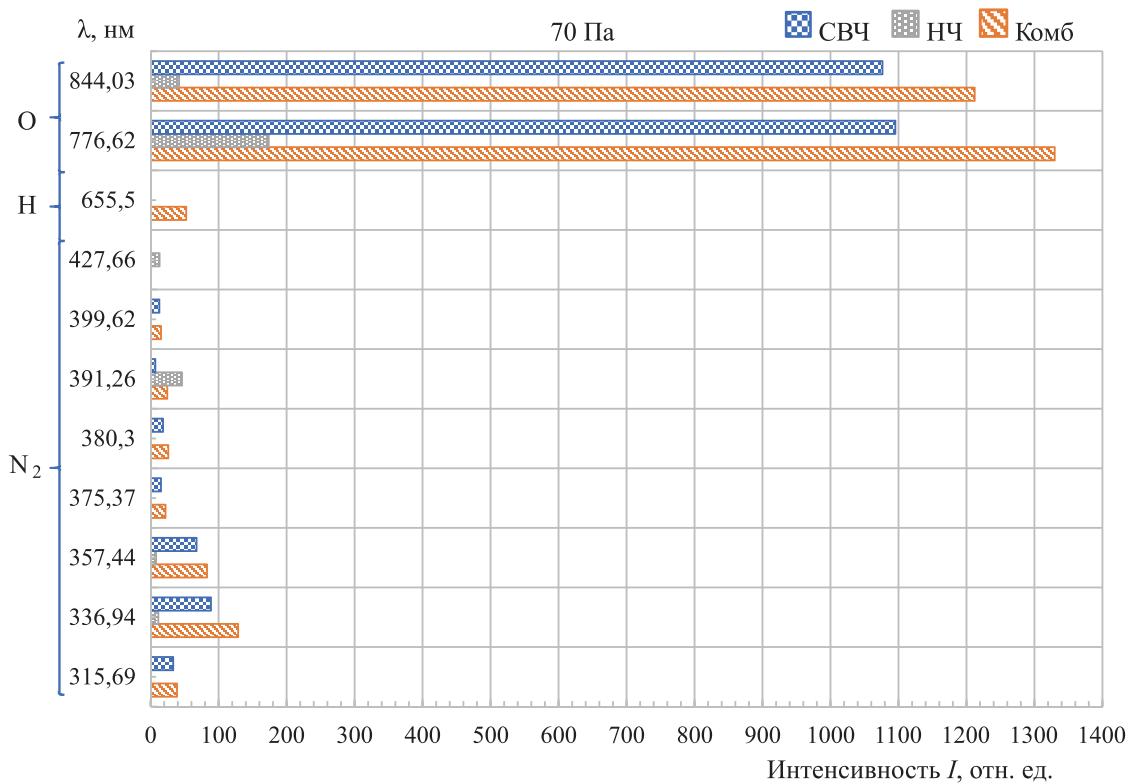


Рис. 6. Спектральные характеристики отдельных линий при давлении 70 Па в среде O_2
Fig. 6. Spectral characteristics of individual lines at a pressure of 70 Pa in an O_2 medium

Необходимо отметить, что для комбинированного разряда данной конфигурации (НЧ + СВЧ) важным параметром является мощность СВЧ-составляющей плазмы комбинированного разряда, так как при увеличении воздействия электромагнитного поля на НЧ-составляющую комбинированного разряда возможен переход контрагированного разряда к дуговому, что неприемлемо для процессов плазмохимической обработки. Результаты данных исследований следует учитывать при проектировании более мощных разрядных устройств комбинированного типа схожей конфигурации.

Заключение

Экспериментально установлено, что в процессе формирования комбинированного разряда при одновременном воздействии в едином реакционно-разрядном объеме сверхвысокочастотных и низкочастотных полей в диапазоне давлений 20–100 Па введение сверхвысокочастотной энергии через щелевые отверстия кольцевого резонатора волноводного типа перпендикулярно емкостной разрядной системе приводит к возникновению эффекта контрагирования низкочастотной составляющей комбинированного разряда, заключающегося в изменении под действием магнитного поля условий переноса тока в плазменном слое между электродами. Данный эффект приводит к уменьшению диффузии заряженных частиц на стенки камеры и увеличению неравномерности их скорости между электродами, что может быть нежелательным, поскольку снижает эффективность проведения процессов ионно-плазменной обработки поверхностей материалов электронной техники.

Список литературы

1. 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, No 5. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/5/053001>.
2. Effect of Low-Frequency Voltage Waveform on Plasma Uniformity in a Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma / S. Rauf [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2022. Vol. 40, Iss. 3. <https://doi.org/10.1116/6.0001732>.
3. Low-Frequency Dependence of Plasma Characteristics in Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma sources / Yang Zhou [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2024. Vol. 124, No 6. <https://doi.org/10.1063/5.0190803>.
4. Characteristics of 2.45 GHz Microwave Plasma by Langmuir Probe Measurements / Sun Choi [et al.] // Solid State Phenomena. 2007. Vol. 124–126. P. 1621–1624. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1621-1624>.
5. Langmuir Probe Diagnostic Studies of Pulsed Hydrogen Plasmas in Planar Microwave Reactors / A. Rousseau [et al.] // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 92, No 7. P. 3463–3471. <https://doi.org/10.1063/1.1497454>.
6. Переход газового разряда в контрагированное состояние / Е. А. Муратов [и др.] // ТВТ. 1975. Т. 13, № 3. С. 654–656.
7. Уланов, И. М. Экспериментальные исследования влияния продольного магнитного поля на катодные части тлеющего разряда в гелии / И. М. Уланов, А. Ю. Литвинцев // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, № 9. С. 32–38.
8. Влияние магнитного поля на ионизующий разряд в воздухе / А. В. Ерофеев [и др.] // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 35, № 3. С. 82–88.
9. Уланов, И. М. Влияние продольного магнитного поля на рекомбинационное излучение тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии / И. М. Уланов, А. Ю. Литвинцев, В. А. Пинаев // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 1. С. 3–12.
10. Уланов, И. М. Исследование непрерывного спектра тлеющего разряда низкого давления в водороде и гелии в продольном магнитном поле / И. М. Уланов, В. А. Пинаев // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 1. С. 30–38. <https://doi.org/10.7868/S0040364414010219>.
11. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С. В. Бордусов. Минск: Бестпринт, 2002.

Поступила 30.09.2025

Принята в печать 27.10.2025

References

1. Lebedev Yu. A. (2015) Microwave Discharges at Low Pressures and Peculiarities of the Processes in Strongly Non-Uniform Plasma. *Plasma Sources Sci. Technol.* 24 (5). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/5/053001>.

2. Rauf S., Tian P., Kenney J., Dorf L. (2022) Effect of Low Frequency Voltage Waveform on Plasma Uniformity in a Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 40 (3). <https://doi.org/10.1116/6.0001732>.
3. Yang Zhou, Kai Zhao, Fang-Fang Ma, Yong-Xin Liu, Fei Gao, Julian Schulze, et al. (2024) Low-Frequency Dependence of Plasma Characteristics in Dual-Frequency Capacitively Coupled Plasma Sources. *Appl. Phys. Lett.* 124 (6). <https://doi.org/10.1063/5.0190803>.
4. Sun Choi, Wataru Minami, Lae Kim, Hee Kim (2007) Characteristics of 2.45 GHz Microwave Plasma by Langmuir Probe Measurements. *Solid State Phenomena*. 124–126, 1621–1624. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1621-1624>.
5. Rousseau A., Teboul E., Lang N., Hannemann M., Rupcke J. (2002) Langmuir Probe Diagnostic Studies of Pulsed Hydrogen Plasmas in Planar Microwave Reactors. *Journal of Applied Physics*. 92 (7), 3463–3471. <https://doi.org/10.1063/1.1497454>.
6. Muratov E. A., Persiantsev I. G., Pismenny V. D., Rakimov A. T. (1975) Transition of a Gas Discharge to a Contracted State. *TVT*. 13 (3), 654–656 (in Russian).
7. Ulanov I. M., Litvintsev A. Yu. (2004) Experimental Study of the Effect of a Longitudinal Magnetic Field on the Cathode Parts of a Glow Discharge in Helium. *Technical Physics*. 49 (9), 1135–1141. <https://doi.org/10.1134/1.1800233> (in Russian).
8. Erofeev A. V., Zhukov B. G., Lapushkina T. A., Ponyaev S. A., Bobashev S. V. (2009) Effect of a Magnetic Field on Ionizing Electric Discharge in Air. *Technical Physics Letters*. 35 (2), 137–140. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020126> (in Russian).
9. Ulanov I. M., Litvintsev A. Y., Pinaev V. A. (2011) The Influence of Longitudinal Magnetic Field on Recombination Radiation of Low-Pressure Glow Discharge in Hydrogen and Helium. *High Temperature*. 49 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1134/S0018151X11010251> (in Russian).
10. Ulanov I. M., Pinaev V. A. (2014) Study of the Continuous Spectrum of a Low Pressure Glow Discharge in Hydrogen and Helium in a Longitudinal Magnetic Field. *High Temperature*. 52 (1), 26–34. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14010209> (in Russian).
11. Bordusov S. V. (2002) *Plasma Microwave Technologies in the Production of Electronic Devices*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).

Received: 30 September 2025

Accepted: 27 October 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лушакова М. С., ст. преп. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мадвейко С. И., канд. техн. наук, доц., зав. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Тихон О. И., мл. науч. сотр. Центра «Ионно-плазменные системы и технологии», БГУИР

Information about the authors

Lushakova M. S., Senior Lecturer at the Department of Technique and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Madveika S. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Technique and Technology, BSUIR

Tsikhan O. I., Junior Researcher at the “Plasma Processing Research Center”, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-88
E-mail: lushakova@bsuir.by
Лушакова Мария Сергеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-88
E-mail: lushakova@bsuir.by
Lushakova Maria Sergeevna