

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРА ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕТРОНА НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ РАЗРЯДА

Современный технологический процесс изготовления изделий микро- и нанoeлектроники включает ряд операций, выполняемых с использованием вакуумно-плазменного оборудования. Одним из способов реализации процессов плазменной обработки полупроводниковых материалов является применение неравновесной сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы.

В качестве источников энергии, обеспечивающих формирование и поддержание плазмы, в составе установок СВЧ-плазменной обработки на базе плазмотронов резонаторного типа находят применение СВЧ магнетроны. Питание таких магнетронов во многих случаях осуществляется по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения, где в роли первичного преобразователя напряжения выступает работающий в режиме насыщения высоковольтный трансформатор, способный обеспечить генерацию прямоугольных импульсов напряжения [1, с. 315]. Генерация плазмы при этом происходит в пульсирующем режиме с частотой, равной частоте следования импульсов анодного тока. Величина и форма этих импульсов определяют характер работы магнетрона и генерации им СВЧ энергии [2, с. 19]. Поскольку длительность импульсов анодного тока тесно связана с длительностью импульсов генерации СВЧ энергии магнетроном, актуальной задачей, применительно к процессу СВЧ плазмохимической обработки материалов, является исследование режима работы СВЧ магнетрона при непрерывной генерации им СВЧ энергии.

Для проведения исследований использовался источник постоянного тока на базе схемы микроволнового генератора [3]. Целью экспериментов являлось изучение влияния характера питания СВЧ магнетрона на оптические характеристики СВЧ разряда.

В состав СВЧ генератора входит водоохлаждаемый магнетрон ОМ75Р(31) с паспортной выходной мощностью  $P_{\text{вых}} \approx 1$  кВт и источник питания постоянного тока [4, с. 135], способный обеспечить пиковое анодное напряжение  $U_a \approx 4$  кВ (рисунок 1). В схеме источника питания для формирования анодного напряжения используются три повышающих трансформатора ( $TV1$ ,  $TV2$ ,  $TV3$ ), работающих в режиме насыщения. На первичные обмотки трансформаторов подаётся напряжение с разных фаз 380 В сети питания с одним нулём. Подача напряжения накала  $U_n = 3,2$  В осуществляется с накальной обмотки трансформатора  $T1$ .

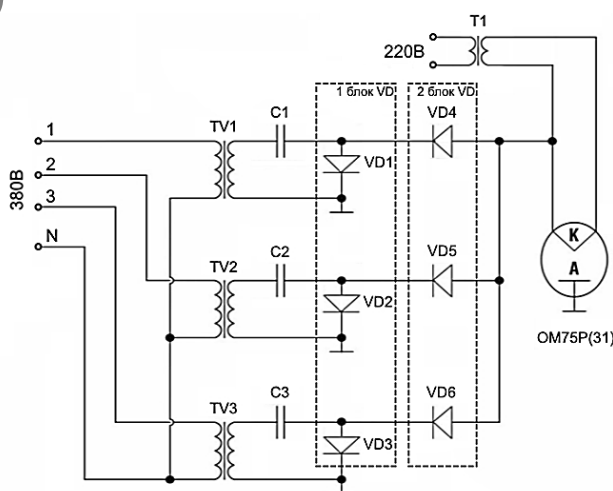
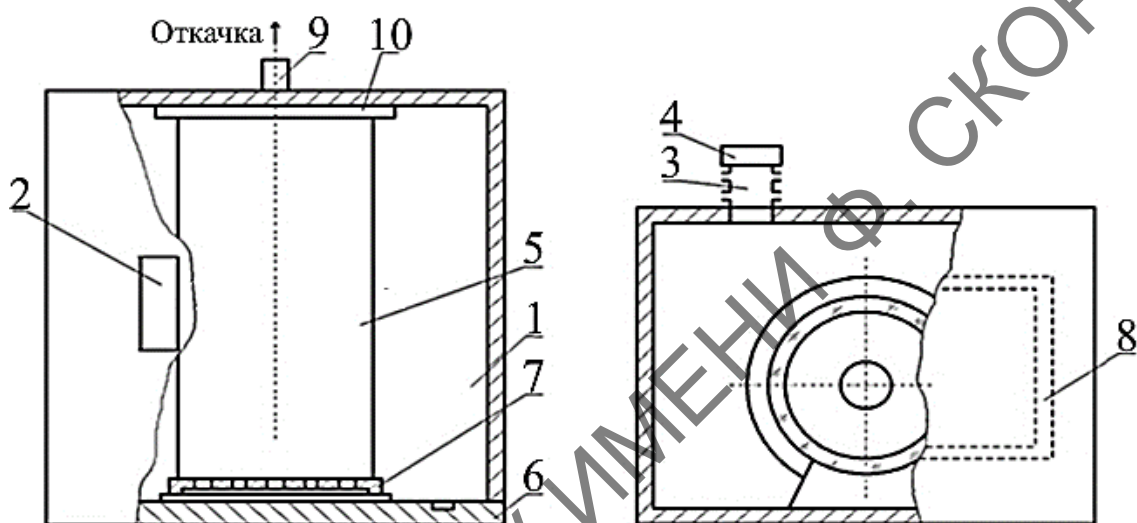


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная СВЧ генератора с источником питания постоянного тока

Задачами исследования являлось сравнение формы и уровня питающих импульсов анодного тока и напряжения, а также сигналов СВЧ переизлучения и характеристик плазмы СВЧ разряда при питании магнетрона по упрощенной схеме с удвоением напряжения и источником питания постоянного тока. В качестве контролируемой характеристики плазмы был выбран уровень оптического сигнала её свечения, связанный с уровнем энергии, вкладываемой в плазму.

Для изучения характеристик СВЧ разряда использовалась экспериментальная СВЧ плазменная установка резонаторного типа, схематически изображенная на рисунке 2. Формирование плазмы СВЧ разряда осуществляется в объеме кварцевого туннельного реактора объемом около  $9000 \text{ см}^3$ , расположенного в прямоугольной резонаторной камере размером  $40 \times 40 \times 30 \text{ см}$ . Откачка рабочего объема до требуемого уровня вакуума осуществляется пластинчато-роторным насосом, величина давления регулируется вакуумным натекателем.

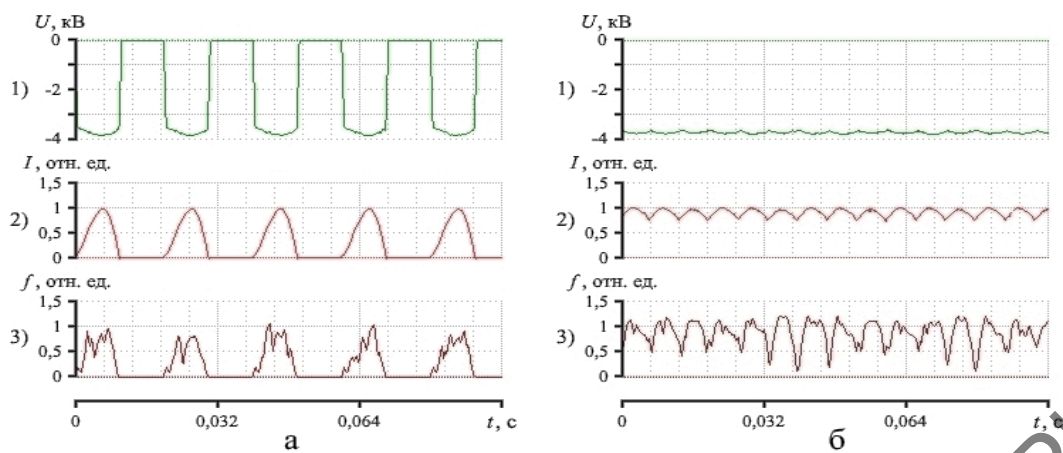


- 1 – резонатор; 2 – отверстие связи; 3 – волновод; 4 – магнетрон;  
 5 – реакционно-разрядная камера; 6 – передняя стенка резонатора;  
 7 – передняя крышка камеры; 8 – смотровое окно; 9 – патрубок для откачки;  
 10 – задняя крышка камеры

Рисунок 2 – Реакционно-разрядная система СВЧ плазменной установки

При проведении экспериментов с помощью аналого-цифрового преобразователя ЛА-1,5 РС1 осуществлялась одновременная регистрация четырёх сигналов: осциллограммы анодного напряжения магнетрона через делитель 1:1000; сигнала анодного тока с токосъёмного резистора; уровня СВЧ электромагнитного переизлучения на границе резонаторной камеры; импульсов оптического интегрального свечения СВЧ разряда, поступающего на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Величина давления в реакционно-разрядной камере – 70 Па, рабочий газ – воздух. Экспериментальные данные представлены на рисунках 3 и 4.

Согласно представленным результатам измерений использование собранного по упрощенной схеме источника питания СВЧ магнетрона обеспечивает генерацию пачек импульсов сигнала электромагнитной энергии, следующих с частотой импульсов анодного тока в 50 Гц (рисунок 3а). При работе СВЧ магнетрона от трёхфазного источника постоянного тока наблюдается переход к непрерывному режиму генерации (рисунок 3б). Работа источника постоянного тока в составе СВЧ генератора обеспечивает относительно постоянный уровень сигналов анодного напряжения и тока при сравнении с показаниями, снятыми в случае питания магнетрона по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения. Анодное напряжение и ток в обоих случаях сохраняют среднее амплитудное значение.



1 – анодное напряжение СВЧ магнетрона; 2 – анодный ток СВЧ магнетрона;  
3 – сигнал СВЧ переизлучения на границе резонаторной камеры

Рисунок 3 – Регистрируемые сигналы при питании СВЧ магнетрона по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения (а) и от источника постоянного тока (б)

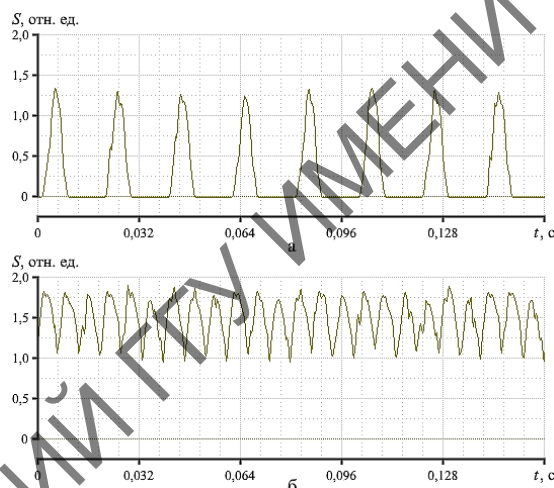


Рисунок 4 – Осциллограммы оптического сигнала свечения плазмы при питании магнетрона по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения (а) и от источника постоянного тока (б)

Представленные на рисунке 4 данные демонстрируют закономерное изменение характера оптического сигнала свечения плазмы, связанное с непрерывным режимом генерации энергии магнетроном. Происходит переход от импульсного режима к непрерывному свечению плазмы, сопровождаемому ростом амплитудного значения регистрируемого оптического сигнала на ~30 %. Оценка площади сигнала оптического свечения на выбранном временном интервале показывает её увеличение при переходе к питанию СВЧ магнетрона от источника постоянного тока. В случае непрерывного режима генерации не наблюдается отсутствие плазмы между моментами погасания и зажигания разряда для каждого импульса, что позволяет уменьшить энергозатраты на ионизацию газа, а также свидетельствует о повышении вкладываемой в газовый разряд СВЧ мощности.

Результаты исследований показали, что работа магнетрона в режиме непрерывной генерации позволяет увеличить энергоклад в плазму СВЧ разряда. Использование СВЧ генераторов, работающих в таком режиме, может способствовать реализации более эффективных плазмохимических процессов.

## Список использованных источников

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 Хлопов, Ю. Н. Магнетрон / Ю. Н. Хлопов. – Москва : Знание, 1967. – 50 с.

3 Микроволновой генератор : пат. 2480890 РФ : МПК7 Н 03 В 1/02 / В. Н. Тихонов, Д. В. Пугашкин, Я. А. Четокин – Опубл. 27.04.2013.

4 Тихон, О. И. Исследование электрических режимов работы СВЧ магнетрона в составе плазменного технологического оборудования / О. И. Тихон (науч. Рук. С. И. Мадвейко) // Актуальные вопросы физики и техники [Электронный ресурс] : материалы IX Республ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 23 апр. 2020 г.) : в 2 ч. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Электр. текст. данные (12,5 МБ). – Гомель, 2020. – Ч. 1. – С. 134–136.