

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ И АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ НА ФОРМУ ИМПУЛЬСА АНОДНОГО ТОКА МАГНЕТРОНА

С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 3 декабря 2009

Представлены результаты исследований работы магнетрона технологического назначения среднего уровня мощности М-105 на плазменную и активную нагрузку. В одной группе экспериментов нагрузкой являлась низкотемпературная неравновесная плазма самостоятельного СВЧ-разряда с находящимися в ней пластинами монокристаллического кремния, во второй — в качестве активной нагрузки использовалось различное количество воды и кремниевые пластины. По результатам проведенных экспериментов изучено влияние различного типа нагрузки, расположенной в объеме резонатора СВЧ-плазмотрона, на характер формы импульса анодного тока магнетрона.

Ключевые слова: плазма, магнетрон, плазменная и активная нагрузка, анодный ток магнетрона.

Введение

Качественное описание принципа работы СВЧ-магнетрона как генератора электромагнитных колебаний сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн известно давно [1–3], строгой теории с подробным количественным анализом динамики электронного потока с учетом такого важного фактора, как зависимость изменения внутренних электрических параметров от различной нагрузки, до сих пор не существует. Это объясняется, в первую очередь, недостаточной изученностью ряда физических эффектов, связанных с нестационарным режимом работы магнетрона как электровакуумного прибора.

Поэтому экспериментальное изучение режимов работы СВЧ-магнетронов применительно к их использованию в составе различных устройств, в частности технологического оборудования для плазменной обработки материалов, представляет как научный, так и практический интерес и является актуальной задачей.

Применительно к анализу эксплуатационных характеристик работы магнетрона непрерывного режима генерации форма и величина амплитуды импульсов анодного тока магнетрона, которые достаточно просто визуализируются и измеряются, позволяют получать текущую информацию как об условиях его работы, так и о характере и степени влияния нагрузки на режимы генерации [4, 5].

Методика эксперимента

Исследования проводились с использованием СВЧ-разрядного модуля технологического назначения на базе резонатора прямоугольной формы. В качестве источника СВЧ-энергии использовался магнетрон М-105, питание которого производилось по однополупериодной схеме выпрямления с умножением напряжения.

В одной группе экспериментов нагрузкой являлась возбуждаемая этим магнетроном низкотемпературная неравновесная плазма самостоятельного СВЧ-разряда с находящимися

в ней пластинами монокристаллического кремния, во второй — в качестве активной нагрузки использовалось различное количество воды и кремниевые пластины.

Зарегистрированные в ходе обоих групп экспериментов формы импульсов анодного тока магнетрона имели примерно одинаковый вид и показаны на рис. 1. На этом рисунке видно, что на кривой формы тока явно выделяются два пика.

По результатам зафиксированных значений и формы импульсов анодного тока магнетрона во второй группе экспериментов произведен анализ изменения отношения значений вершин $\max 1$, $\max 2$ и \min (рис. 1) для экспериментов с различным количеством воды в объеме камеры СВЧ-модуля. Расчетные зависимости представлены на рис. 2. На этом же рисунке представлены расчетные данные для огибающей протектированных СВЧ-сигналов утечки из резонаторной камеры СВЧ-плазмотрона, зафиксированных установленной вне камеры антенной.

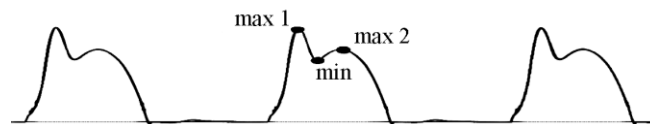


Рис. 1. Форма импульсов анодного тока СВЧ-магнетрона М-105

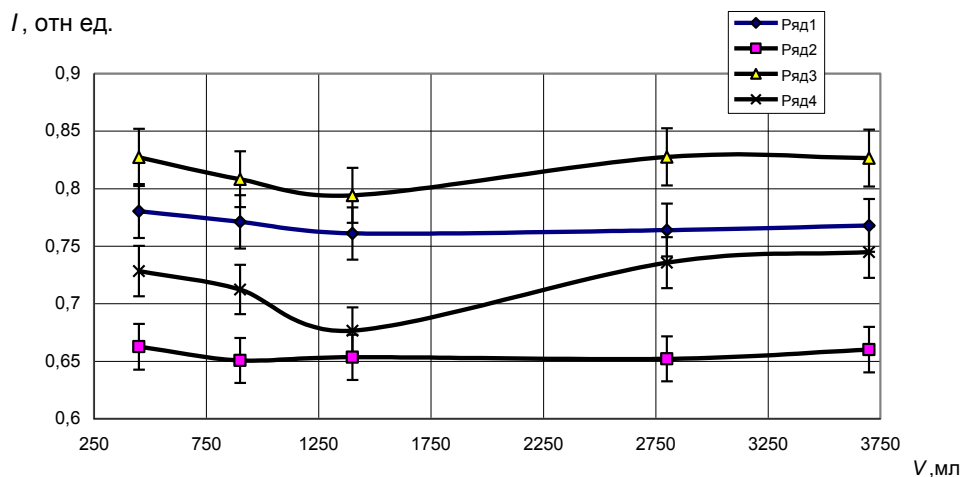


Рис. 2. Зависимости отношения от количества жидкости для случая водяной нагрузки для $\max 1$ и $\max 2$: 1 — анодный ток магнетрона; 3 — огибающая СВЧ-сигнала; для $\max 1$ и \min : 2 — анодный ток магнетрона, 4 — огибающая СВЧ-сигнала

В экспериментах на плазменную нагрузку в случае наличия в объеме плазмы единичных кремниевых пластин различной толщины (от 0,3 мм до 12,4 мм) значения отношений величин вершин импульсов сигнала тока магнетрона $\max 1$, $\max 2$ и \min для пластин разной толщины оставались неизменными.

Анализ изменения отношения величин вершин огибающей сигнала тока при различном количестве кремниевых пластин одинаковой толщины (0,3 мм), в экспериментах с плазменной нагрузкой показал на изменение этих значений в зависимости от количества пластин (рис. 3). При этом указанные зависимости имеют сложный характер, что по нашим предположениям является следствием сильного обратного влияния характеристик плазмы на электрические характеристики работы магнетрона.

В таблице приведены значения отношений величин выступов и впадин сигналов анодного тока магнетрона и огибающей СВЧ-сигналов утечки из резонаторной камеры СВЧ-плазмотрона в случае наличия в ней кремниевых пластин, материал которых для СВЧ-излучения с частотой $f=2,45$ ГГц является хорошей активной нагрузкой.

Как показали эксперименты, наличие в резонаторной камере СВЧ-плазмотрона плазмы приводит к существенному искажению формы огибающей СВЧ-сигнала утечки из резонаторной камеры (рис. 4, 5), что указывает на наличие ярко выраженной нестационарности во взаимодействии возбуждающего разряд СВЧ-поля и плазмы.

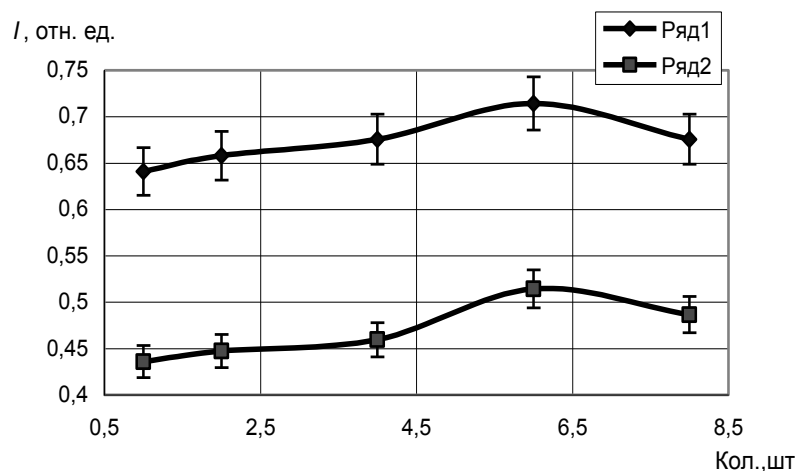


Рис. 3. График зависимости величины отношения вершин формы сигнала анодного тока магнетрона от количества кремниевых пластин одинаковой толщины в экспериментах с плазменной нагрузкой: 1 — отношение max 1 и max 2; 2 — отношение max 1 и min

Отношения значений экстремумов для формы сигналов анодного тока магнетрона и огибающей СВЧ-сигналов утечки при активной нагрузке в виде кремниевых пластин

Количество пластин, шт.	Отношение			
	max 1 и max 2 импульс тока	max 1 и min импульс тока	max 1 и max 2 импульс СВЧ	max 1 и min импульс СВЧ
0	0,68	0,48	0,88	0,89
20	0,78	0,67	0,91	0,76

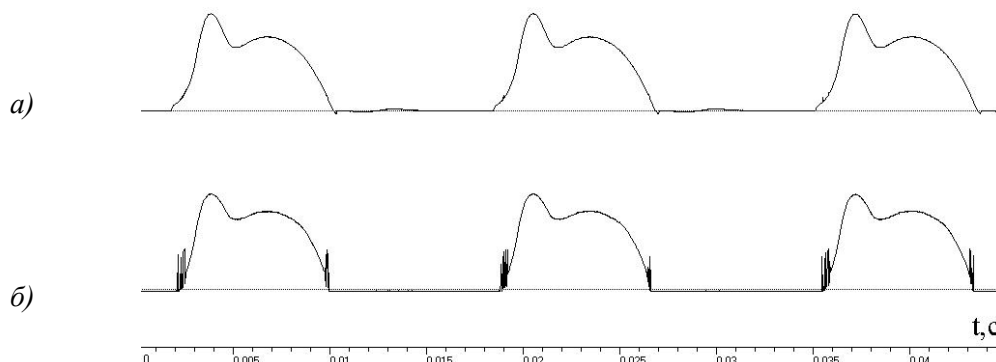


Рис. 4. Форма сигналов анодного тока магнетрона и огибающей СВЧ-сигнала утечки камеры плазматрона для случая активной нагрузки в виде кремниевых пластин: *a* — анодный ток; *b* — огибающая СВЧ-сигнала

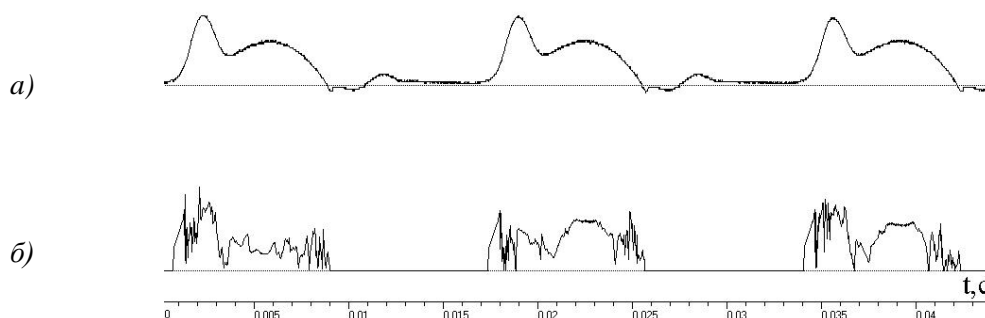


Рис. 5. Форма сигналов анодного тока магнетрона и огибающей СВЧ-сигнала утечки камеры плазматрона для случая плазменной нагрузки: *a* — форма анодного тока; *b* — огибающая СВЧ-сигнала

Заклучение

Таким образом, представленные экспериментальные результаты указывают на то, что в объеме плазмы СВЧ-разряда протекают сложные явления, связанные с формированием и поддержанием разряда, приводящие к существенной нестационарности СВЧ-поля в области плазмообразования. При этом не установлено явно выраженного влияния характера нагрузки на форму импульсов анодного тока магнетрона М-105 в условиях работы с аппликатором резонаторного типа СВЧ-плазмотрона. Это указывает на возможность длительной и устойчивой работы СВЧ-магнетронов такого типа в составе СВЧ-плазменного технологического оборудования, использующего СВЧ-плазмотроны с аппликаторами резонаторного типа и частичным заполнением плазмой объема резонаторной камеры.

RESEARCH INFLUENCE OF PLASMA AND ACTIVE LOAD ON THE FORM OF THE MAGNETRON ANODE CURRENT IMPULSE

S.V. BORDUSOV, S.I. MADVEYKO

Abstract

Results of researches and operation of the average power level microwave magnetron M-105 on plasma and active load are presented. In one group of experiments a low-temperature nonequilibrium plasma of self-sustained microwave discharge without and with plates of monocrystal silicon in it was used as a load. In another group of experiment various amount of water or silicon plates were used as an active load. According to the spent experiments influence of different type of located in the volume of microwave plasmatron resonator load on character of the form of magnetron anode current impulses was studied.

Литература

1. *Пюшнер Г.* Нагрев энергией сверхвысоких частот. М., 1968.
2. *Хлопов Ю.Н.* Магнетрон. М., 1967.
3. *Кураев А.А.* Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров. М., 1986.
4. *Шарков Г.А., Пипко А.И., Андреев С.А.* // Применение СВЧ энергии в энергосберегающих технологических процессах: тез. докл. 5-й науч.-техн. конф. Саратов, 1986. С. 13.
5. *Диденко А.Н., Зверев Б.В.* СВЧ-энергетика. М., 2000.