

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЪЁМЕ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

*Барковская К.Н.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к. т. н., доцент, зав. кафедрой ЭТТ*

**Аннотация.** Проведено компьютерное моделирование электронной плотности аргоновой плазмы в объёме СВЧ резонатора призматической формы (ширина 267 мм, длина 270 мм, высота: 188 мм) при частоте  $f = 2,45$  ГГц. Исследование проводилось при подводимой СВЧ мощности  $P = 1,5$  кВт в течение 0,01 секунды.

**Ключевые слова:** плазма, резонатор, плазмотрон, СВЧ, электронная плотность.

**Введение.** Электронная плотность (плотность плазмы) является ключевым параметром при определении количества заряженных частиц в плазме. Данная характеристика отражает концентрацию несущих заряд электронов и ионов внутри объёма плазмы [1].

Скорость реакций в плазме зависит от плотности частиц реагентов. Более высокая плотность плазмы увеличивает вероятность столкновения частиц реагентов и протекания химических реакций, что приводит к увеличению скорости реакции. Аналогично, ионный поток, который представляет собой поток ионов на подложке, прямо пропорционален плотности плазмы [1].

Плотность плазмы влияет на поведение и характеристики заряженных частиц в плазме, тем самым оказывая влияние на следующие технологические процессы:

Плотность плазмы влияет на скорость травления, селективность и однородность поверхности в процессах плазменного травления. Контроль плотности позволяет точно удалять материал и модифицировать поверхность, что дает возможность изготавливать микроэлектронные устройства и интегральные схемы.

1 Плазменное травление. Плотность плазмы влияет на скорость травления, селективность и однородность поверхности в процессах плазменного травления. Контроль плотности позволяет точно удалять материал с поверхности, что дает возможность изготавливать микроэлектронные устройства и интегральные схемы.

2 Осаждение плёнок. В процессах химического осаждения из паровой фазы с усилением плазмы (PECVD) и напыления плотность плазмы влияет на скорость роста, состав и качество пленки. Оптимизация плотности плазмы обеспечивает желаемые характеристики осажденных тонких пленок для полупроводников, оптических покрытий и солнечных элементов.

3 Плазменная обработка поверхности. Плотность плазмы играет решающую роль в процессах очистки, активации и функционализации поверхности. Она влияет на эффективность таких плазменных технологий, как плазменная очистка, активация поверхности для улучшения адгезии и плазменная полимеризация для функционализации поверхности [2].

Более высокая плотность плазмы приводит к увеличению количества ионов, бомбардирующих подложку, что оказывает влияние на скорость травления и осаждения. Исследование электронной плотности плазмы позволяет оптимизировать плазменные процессы (например, плазмохимическое травление), контролировать скорости реакций и подбирать режимы технологических процессов (например, подбирать скорость травления или осаждения) в соответствии с конкретными требованиями [1].

В данной статье представлены результаты компьютерного моделирования электронной плотности аргоновой плазмы в объёме СВЧ плазмотрона резонаторного типа. На базе предложенной модели изучена зависимость электронной плотности плазмы от времени.

**Основная часть.** Проводилось моделирование процесса формирования плазмы аргона внутри кварцевой камеры резонатора призматической формы. Исследование проводилось при подводимой мощности  $P = 1,5$  кВт в течение 0,01 секунды.

На рисунке 1 представлен результаты моделирования электронной плотности аргоновой плазмы в начальный момент плазмообразования.

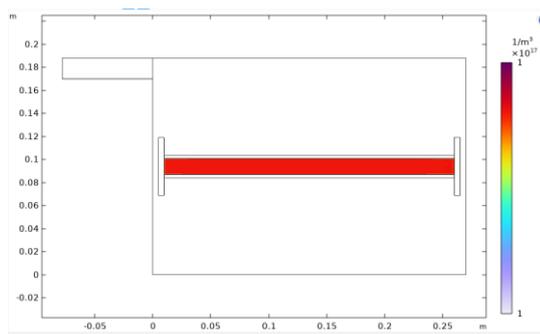


Рисунок 1 – Электронная плотность плазмы в начальный момент времени

В начальный момент электроны и ионы внутри плазмы распределены равномерно, о чём свидетельствует данная модель, где значение электронной плотности в камере в каждой точке одинаковое.

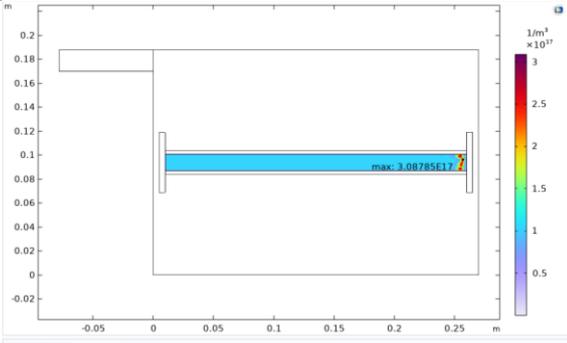
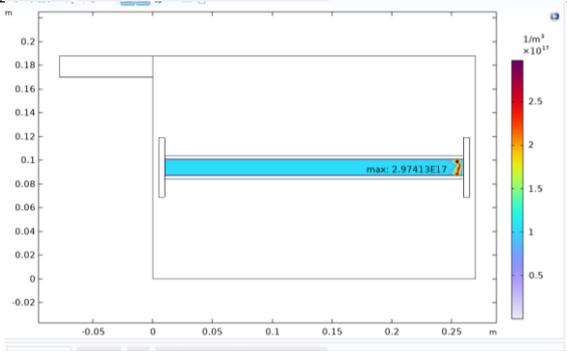
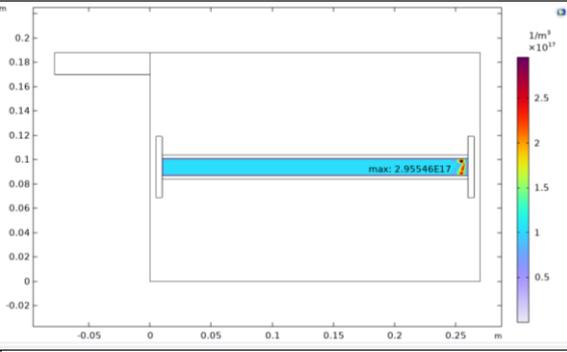
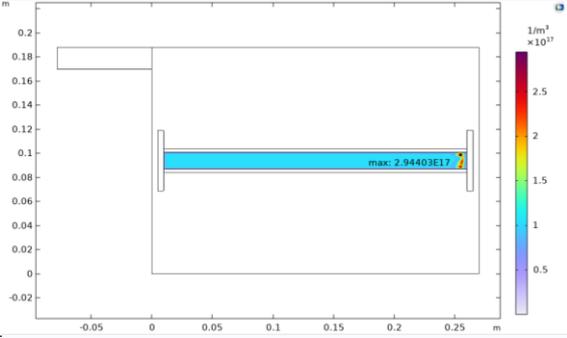
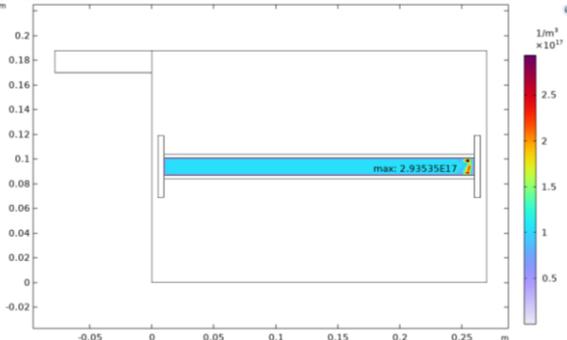
В таблице 1 представлены полученные модели электронной плотности плазмы в различные промежутки времени.

Таблица 1 – Результаты моделирования электронной плотности в течение 10 секунд

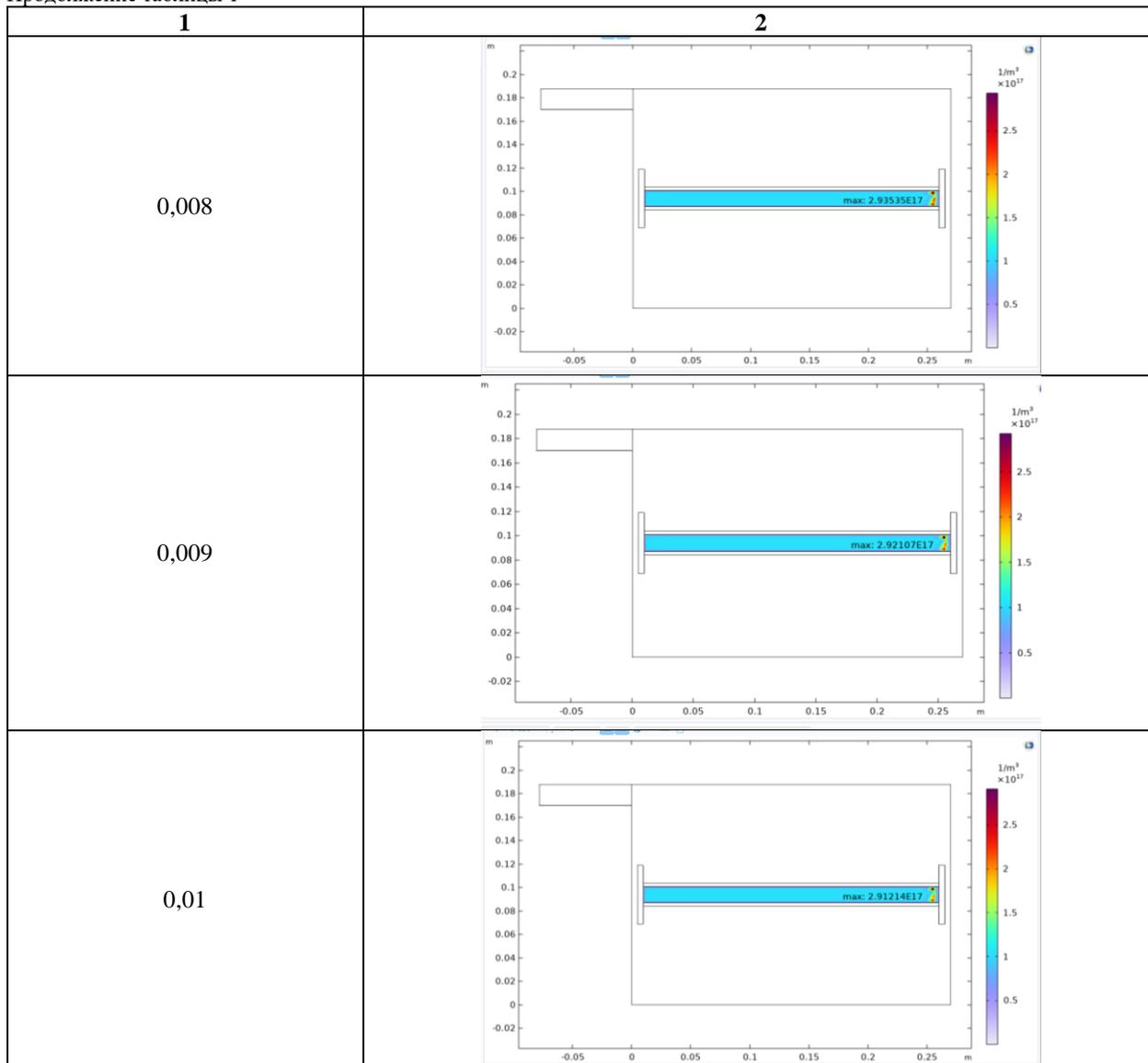
| Время, с       | Полученная модель                           |
|----------------|---|
| 1<br><br>0,001 | <p style="text-align: center;"><b>2</b></p> |
| 0,002          |   |

# 61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов

Продолжение таблицы 1

| 1     | 2  |
|-------|--|
| 0,003 |    |
| 0,004 |    |
| 0,005 |   |
| 0,006 |  |
| 0,007 |  |

Продолжение таблицы 1



В таблице 2 представлены результаты расчётов максимальных значений электронной плотности плазмы в течение 0,01 секунды.

Таблица 2 – Максимальные значения электронной плотности плазмы в зависимости от времени

| Время, с | Максимальное значение электронной плотности, $1/m^3$ |
|----------|--|
| 0        | $1 \cdot 10^{17}$                                    |
| 0,001    | $4,21415 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,002    | $3,60754 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,003    | $3,08785 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,004    | $2,97413 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,005    | $2,95546 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,006    | $2,94403 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,007    | $2,93535 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,008    | $2,92803 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,009    | $2,92107 \cdot 10^{17}$                              |
| 0,01     | $2,91214 \cdot 10^{17}$                              |

На рисунке 2 изображён график зависимости максимальных значений электронной плотности плазмы от времени.

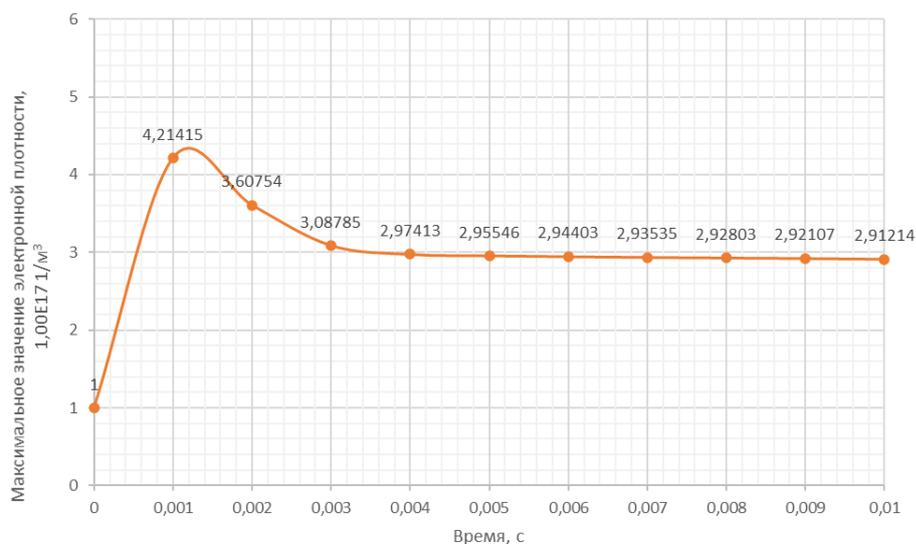


Рисунок 2 – Зависимость максимального значения электронной плотности от времени

Данная зависимость показывает, что во временном промежутке от 0,0012 секунды до 0,01 секунды время и электронная плотность обратно пропорциональны: с увеличением времени значение электронной плотности уменьшается. Стоит отметить, что в течение 0,0012 секунды значение электронной плотности резко возрастает.

**Заключение.** В результате выполнения компьютерного моделирования электронной плотности аргоновой плазмы внутри объёмного СВЧ резонатора призматической формы получены модель при подводимой мощности  $P$ , равной 1,5 кВт, в течение 0,01 секунды. По моделям и зависимостям, представленным в данной статье, можно сделать вывод, что в начале процесса плазмообразования максимальное значение электронной плотности плазмы резко возрастает, после чего оно уменьшается обратно пропорционально времени.

### Список литературы

1. PLASMA PARAMETERS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.impedans.com/docs/plasma-parameters/>. Дата доступа: 18.03.2025.
2. PLASMA DENSITY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.impedans.com/docs/plasma-density/>. Дата доступа: 29.03.2025.

UDC 621.7-4

## COMPUTER MODELLING ELECTRON DENSITY OF ARGON PLASMA IN THE VOLUME OF RESONATOR-TYPE MICROWAVE PLASMATRON

*Barkouskaya K.M.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Madveika S.I. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of ETT*

**Annotation.** Computer modeling of the electron density of argon plasma in the volume of a microwave resonator of prismatic shape (width 267 mm, length 270 mm, height: 188 mm) at frequency  $f = 2.45$  GHz has been carried out. The study was carried out at an input power  $P$  equal to 1.5 kW for 0.01 seconds.

**Keywords:** plasma, resonator, plasmatron, microwave, electric field.