

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ ВНУТРИ СВЧ РЕЗОНАТОРА

К.Н. Барковская,

С.И. Мадвейко, канд. техн. наук, доц.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь*

Представлены результаты моделирования аргоновой плазмы внутри СВЧ резонатора призматической формы. С использованием представленной модели изучены электрическое поле внутри резонатора, электронная плотность, электронная температура, электрический потенциал и резистивные потери плазмы СВЧ разряда.

Ключевые слова: *плазма, СВЧ резонатор, моделирование.*

Плазменные технологии в микроэлектронике играют ключевую роль в производстве полупроводниковых устройств, таких как микрочипы, транзисторы и другие компоненты. Они позволяют проводить точную и контролируемую обработку материалов на микроскопическом уровне [1].

Учитывая актуальность применения плазмы и плазменных технологий в микроэлектронике, возникает необходимость разработки и модернизации существующего СВЧ плазменного технологического оборудования, широко применяемого в технологии микроэлектроники. Для этого не менее важно исследовать поведение плазмы внутри резонатора при определённых условиях.

Проведено исследование следующих характеристик:

1. Электрическое поле – это область пространства, окружающего электрически заряженную частицу или объект, где на электрический заряд действует сила. Электрическое поле существует во всех точках в пространстве и может быть наблюдаться при переносе другого заряда в электрическое поле [2].

2. Электронная плотность – ключевой параметр при определении количества заряженных частиц в плазме. Данная характеристика отражает концентрацию несущих заряд электронов и ионов внутри объёма плазмы [3].

3. Электронная температура – ключевой параметр при изучении кинетики плазмы и поведения электронов. Данная характеристика отражает среднюю кинетическую энергию электронов в плазме [3].

4. Электрический потенциал – основополагающее понятие в физике плазмы, которое играет ключевую роль в различных плазменных процессах. Электрический потенциал плазмы относится к электрическому потенциалу энергии, связанной с распределением заряженных частиц в плазме [4].

5. Резистивные потери – понятие, связанное с потерей энергии в виде тепла, когда электрический ток протекает через проводник из-за присущего ему сопротивления. Этот феномен является ключевым фактором в эффективности электрических систем,

как это может привести к значительным затратам энергии, влияющим на общую производительность и потребление энергии. Исследование резистивных потерь важно для оптимизации конструкции системы и совершенствования энергетической эффективности [5].

Изучение характеристик проведено на базе предложенной модели аргоновой плазмы СВЧ диапазона ($f = 2,45$ ГГц), возбуждаемой в объемном резонаторе призматической формы (ширина 267 мм, длина 270 мм, высота: 188 мм).

В резонаторной камере располагалась трубка, выполненная из радиопрозрачного материала (кварца). Диаметр трубки d принимает следующие значения: 20 мм, 60 мм и 100 мм.

На рисунках представлены результаты моделирования при значениях подводимой мощности 500 Вт и 1000 Вт.

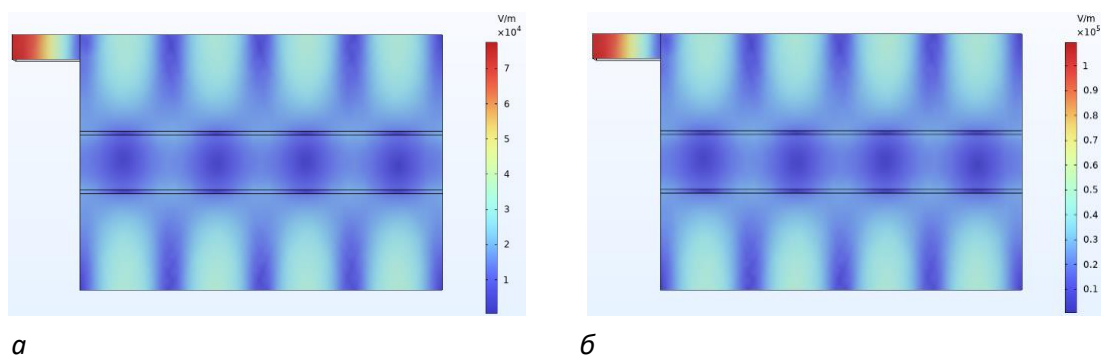


Рисунок 1. – Результат моделирования электрического поля при $P = 500$ Вт (а) и $P = 1000$ Вт (б)

При подводимой мощности равной 500 Вт минимальное значение электрического поля составило 385 В/м, а максимальное значение – $7,74 \cdot 10^4$ В/м. При увеличении подводимой мощности в 2 раза (1000 Вт) значения электрического поля увеличились до 545 В/м (минимальное значение), $1,09 \cdot 10^5$ В/м (максимальное значение).

Представлены результаты представлений при различных размерах кварцевой трубки в разные моменты времени. Значение подводимой мощности принято $P = 500$ Вт.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования электронной плотности аргоновой плазмы.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты моделирования электронной температуры плазмы.

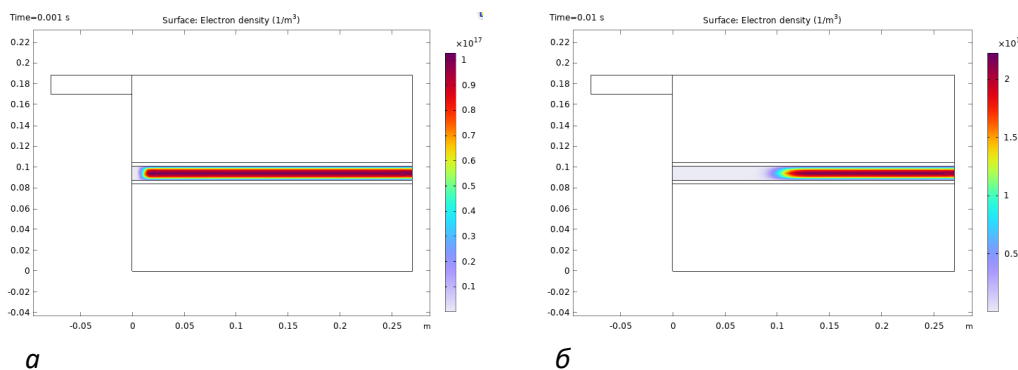
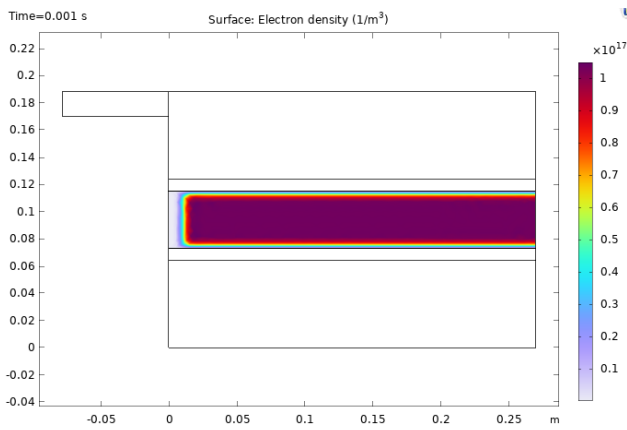
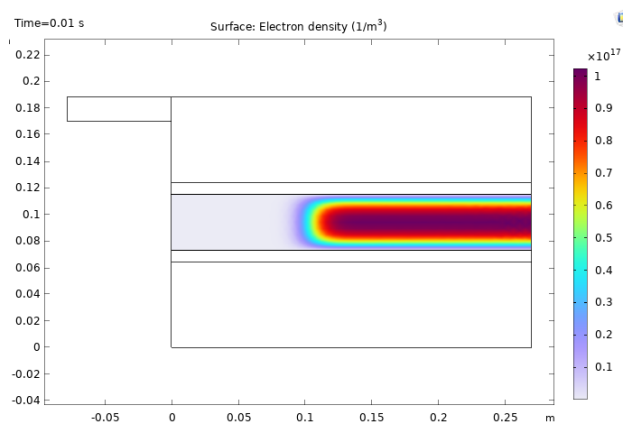


Рисунок 2. – Результат моделирования электронной плотности плазмы ($d = 20$ мм) при 0,001с (а) и 0,01 с (б)

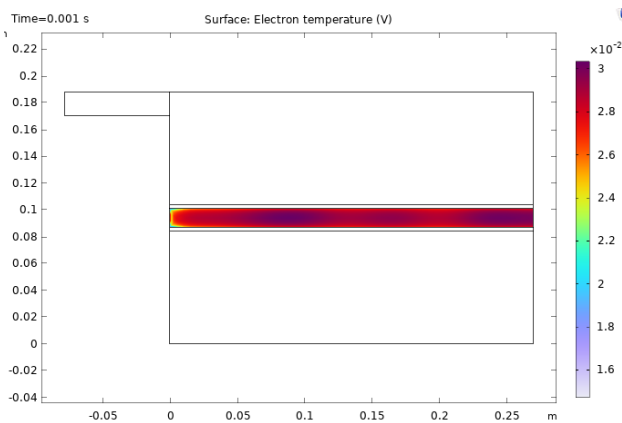


a

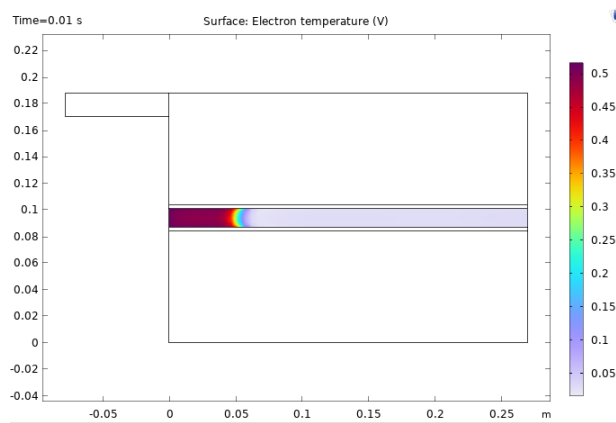


б

Рисунок 3. – Результат моделирования электронной плотности плазмы ($d = 60$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)

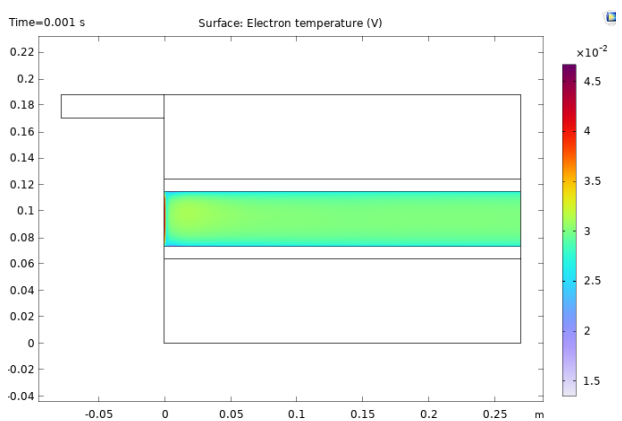


a

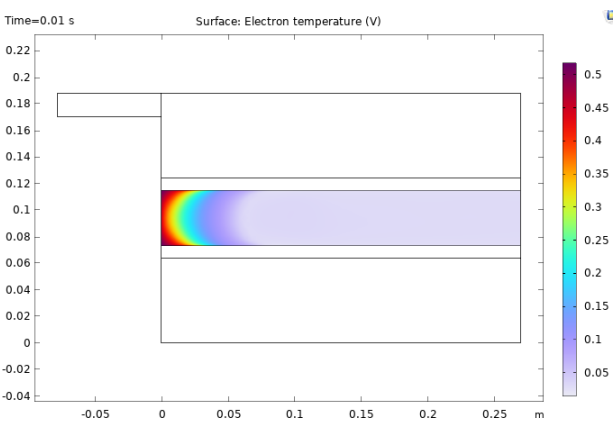


б

Рисунок 4. – Результат моделирования электронной температуры плазмы ($d = 20$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)



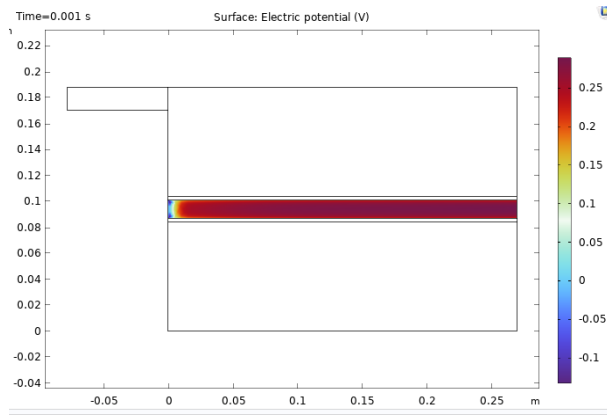
a



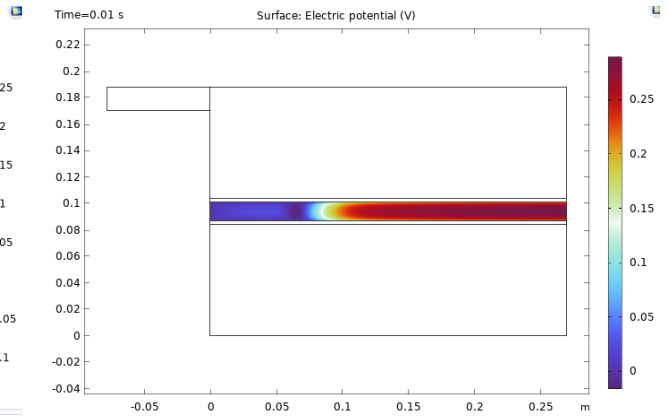
б

Рисунок 5. – Результат моделирования электронной температуры плазмы ($d = 60$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)

На рисунках 6 и 7 представлены результаты моделирования электрического потенциала плазмы.

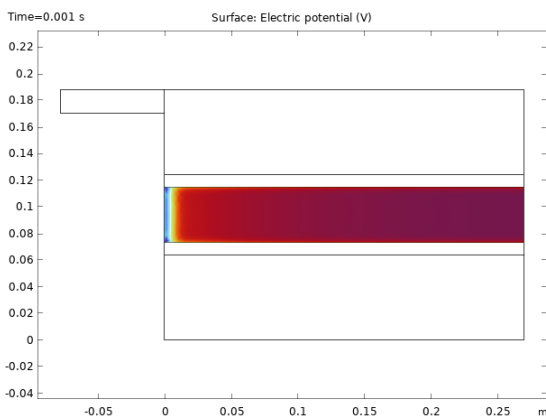


a

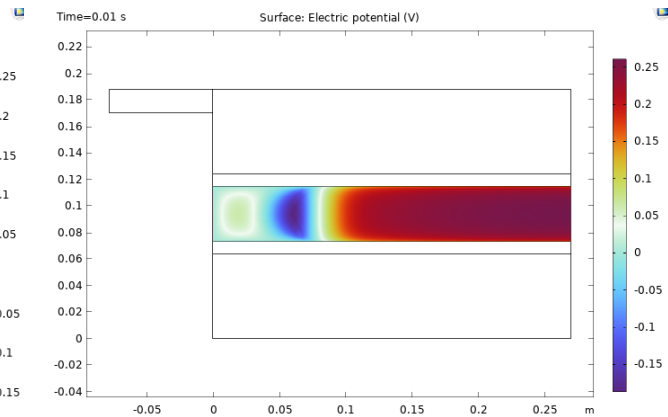


б

Рисунок 6. – Результат моделирования электрического потенциала плазмы ($d = 20$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)



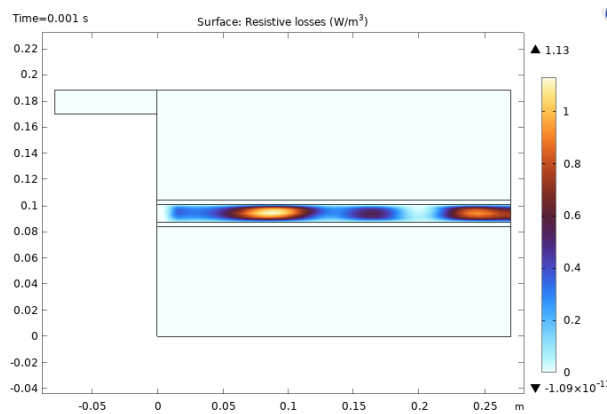
a



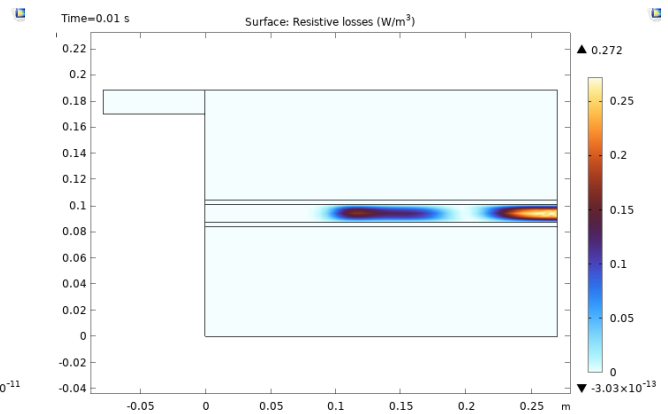
б

Рисунок 7. – Результат моделирования электрического потенциала плазмы ($d = 60$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)

На рисунках 8 и 9 представлены результаты моделирования резистивных потерь плазмы.



a



б

Рисунок 8. – Результат моделирования резистивных потерь плазмы ($d = 20$ мм) при 0,001 с (*a*) и 0,01 с (*б*)

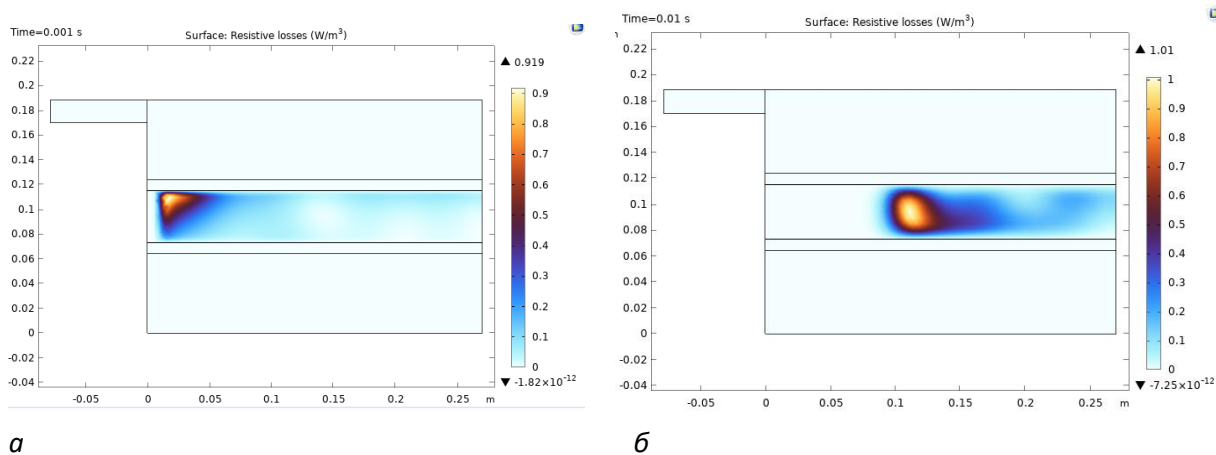


Рисунок 9. – Результат моделирования резистивных потерь плазмы ($d = 60$ мм) при 0,001 с (а) и 0,01 с (б)

Полученные результаты показывают, что при увеличении подводимой мощности, значение электрического поля растёт. К концу процесса плазмообразования значения электронной плотности уменьшаются и электроны локализуются ближе к выходу кварцевой трубки. Также при увеличении диаметра трубки изменения значения электронной плотности менее выразительны. Значение электронной температуры со временем увеличивается, но её распределение становится менее равномерным. При увеличении диаметра трубки наблюдается уменьшение значений электронной температуры. С течением времени изменение электрического потенциала плазмы не изменяется, но к концу процесса наблюдается неравномерное распределение электрического потенциала. При использовании более широкой трубки электрический потенциал уменьшается быстрее. При использовании более широкой трубки резистивные потери распределяются менее равномерно и локализованы в одном участке. К концу процесса плазмообразования наблюдается увеличение значений резистивных потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. PECVD плазмохимия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sntech.ru/technologies/pecvd-plasma-chemistry>. Дата доступа: 29.03.2024.
2. What Is an Electric Field? Definition, Formula, Example [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thoughtco.com/electric-field-4174366>. Дата доступа: 29.10.2024.
3. PLASMA PARAMETERS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.impedans.com/docs/plasma-parameters/>. Дата доступа: 29.10.2024.
4. PLASMA POTENTIAL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.impedans.com/docs/plasma-potential/>. Дата доступа: 29.10.2024.
5. Resistive losses [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://library.fiveable.me/key-terms/introduction-electrical-systems-engineering-devices/resistive-losses>. Дата доступа: 29.10.2024.