

ВЛИЯНИЕ ВИДА ВОЗБУЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ОБЪЁМЕ РЕЗОНАТОРА СВЧ-ПЛАЗМАТРОНА

Шавня Д.С.

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

Мадвейко С.И. – к.т.н, доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. В данной работе было проведено моделирование влияния вида возбуждающего устройства на распределение электромагнитной энергии в объёме резонатора СВЧ-плазматрона. Работа проводилась в программной среде MatLab. Было проведено сравнение возбуждающего зонда и щелевого возбуждения. По результатам работы было выявлено, что щелевое возбуждение является более эффективным способом возбуждения, позволяя добиться наиболее плотного и равномерного распределения электромагнитной энергии внутри резонатора. Прибавка в равномерности распределения в 2 раза больше, чем при зондовом возбуждении.

Ключевые слова. резонатор, электромагнитное поле, распределение энергии, щелевое возбуждение, равномерность поля, возбуждающее устройство, СВЧ-плазматрон, электромагнитная энергия, неоднородность поля.

Введение. Сверхвысокочастотные (СВЧ) плазматроны являются ключевыми элементами в современных технологиях, начиная от ускорителей заряженных частиц и заканчивая системами плазменной обработки материалов. В СВЧ плазматронах резонаторы используются для создания и поддержания плазмы, концентрируя электромагнитную энергию в ограниченном объеме. Эффективность такого устройства напрямую зависит от конфигурации электромагнитного поля внутри резонатора. В свою очередь, конфигурация поля зависит от вида возбуждающего устройства.

Выбор вида и места расположения возбуждающего устройства определяет, какие именно типы колебаний (моды) будут возбуждены в резонаторе, и насколько эффективно энергия генератора будет передана в объем. Неоптимальный выбор возбудителя может привести не только к снижению коэффициента полезного действия, но и к возникновению нежелательных паразитных мод, искажающих картину поля и ухудшающих однородность плазмы. В связи с этим, исследование влияния параметров возбуждающего устройства на распределение электромагнитной энергии является актуальной задачей, позволяющей оптимизировать работу СВЧ-плазматрона.

Основная часть. В качестве резонатора мы будем использовать камеру с размерами ширина a – 24 см, высота b – 34 см, длина L – 42 см. Внутри камеры установлена кварцевая труба с радиусом 8 см для установки в неё подложкодержателя с пластинами. Частота – 2,45 ГГц.

Для моделирования мы будем использовать программную среду MatLab [1]. В качестве критериев для сравнения возбуждающих устройств мы будем использовать равномерность распределения электромагнитного поля в области расположения подложкодержателя, а также максимальную напряженность поля, достигаемую в рабочем объеме.

В качестве аналитических формул для математической модели мы используем уравнения Максвелла и Гельмгольца [2]. По этим формулам было высчитано, что мода TE_{122} лучше всего подходит для нашей установки.

При щелевом возбуждении щель находится на верхней стороне резонатора. На рисунке 1 представлено 3D изображение распределения энергии внутри резонатора. На рисунке 2 представлено 3D изображение распределения внутри кварцевой трубы.

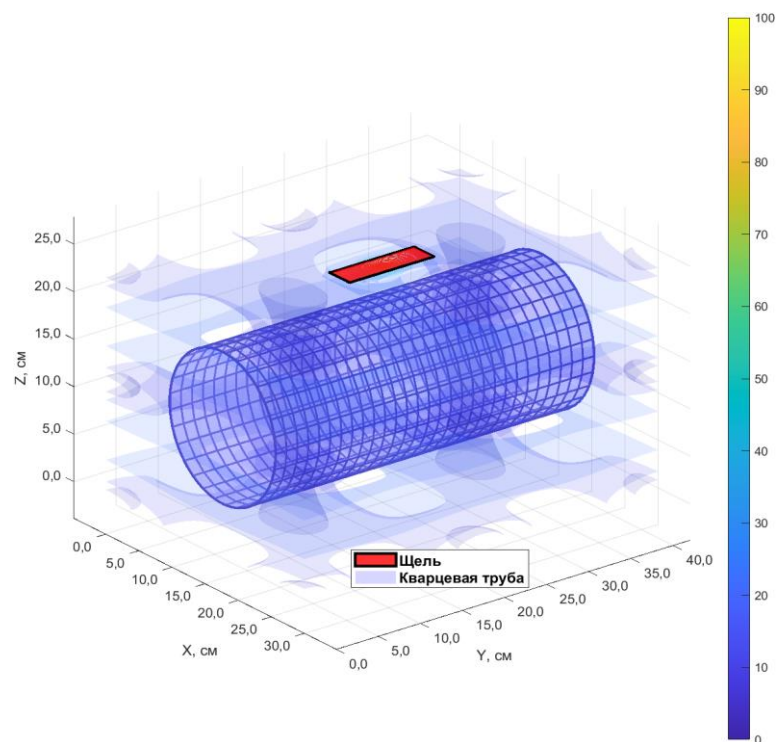


Рисунок 1 – 3D изображение распределения энергии в объеме резонатора при щелевом возбуждении

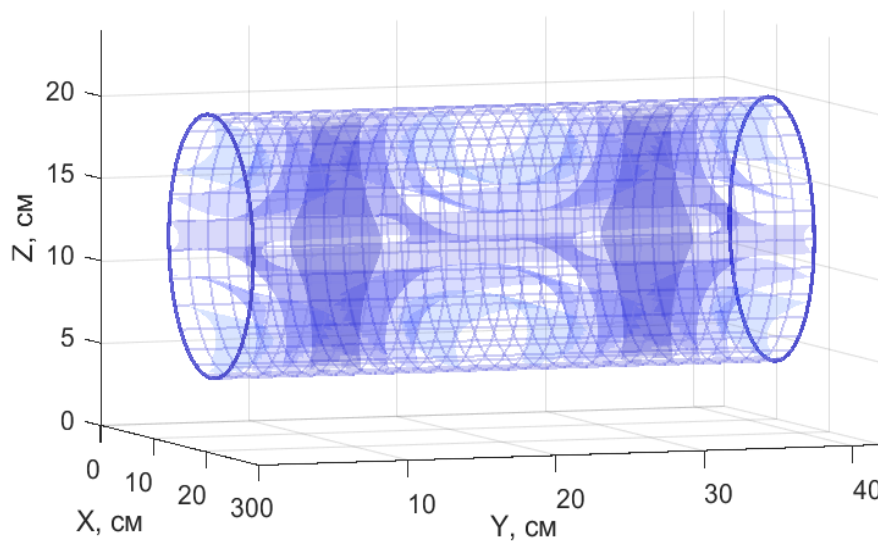


Рисунок 2 – 3D изображения распределения энергии в объеме кварцевой трубы

На рисунке 1 видно, что при щелевом возбуждении основная локальная энергия находится у самой щели, энергия сосредоточена преимущественно в кварцевой трубе, но также частично находится за её пределами. На рисунке 2 видны две области с минимальной энергией при $y = 10$ и $y = 30$, а также три области с максимумами на торцах трубы и в её центре.

На рисунке 3 изображён график распределения плотности энергии вдоль длины трубы.

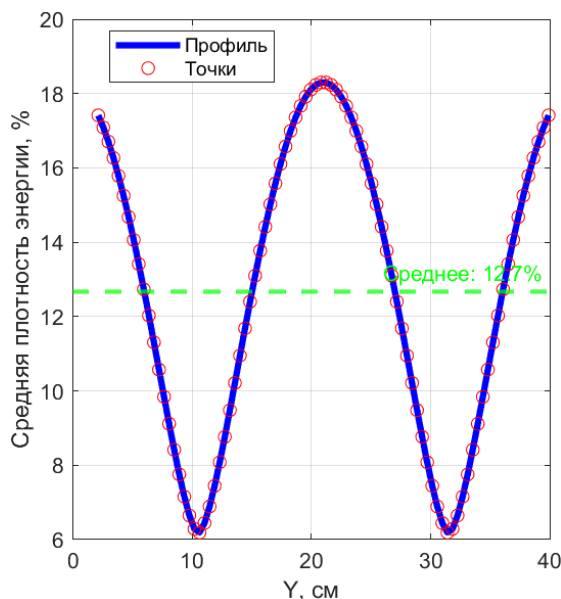


Рисунок 3 – график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при щелевом возбуждении

Исходя из данных графика на рисунке 3 можно сказать, что при щелевом возбуждении происходит трёхвершинное распределение, что является следствием нахождения областей с пониженной и повышенной концентрацией энергии, соответствующих узлам и пучностям моды TE_{122} . Несмотря на близость средней и медианой плотности энергии (12,7% и 12,2% соответственно), говорящих о возможной высокой равномерности распределения, коэффициент равномерности составляет 0,516. Это указывает на наличие в объёме трубы как областей с высокой локальной концентрацией энергии (до 20%), так и областей со значительно более низкими значениями (около 0%), что обусловлено интерференционной структурой моды TE_{122} .

При зондовом возбуждении зонд находится на верхней стороне резонатора. На рисунке 4 представлено 3D изображение распределения энергии внутри резонатора. На рисунке 5 представлено 3D изображение распределения внутри кварцевой трубы.

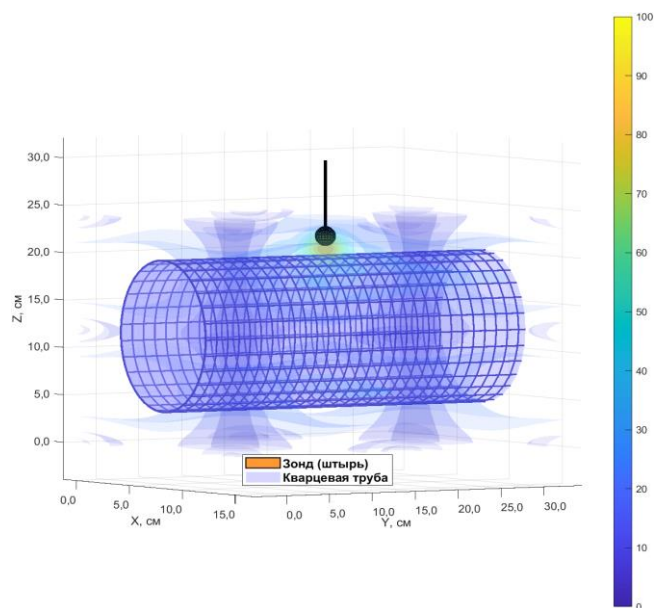


Рисунок 4 – 3D изображение распределения энергии в объёме резонатора при зондовом возбуждении

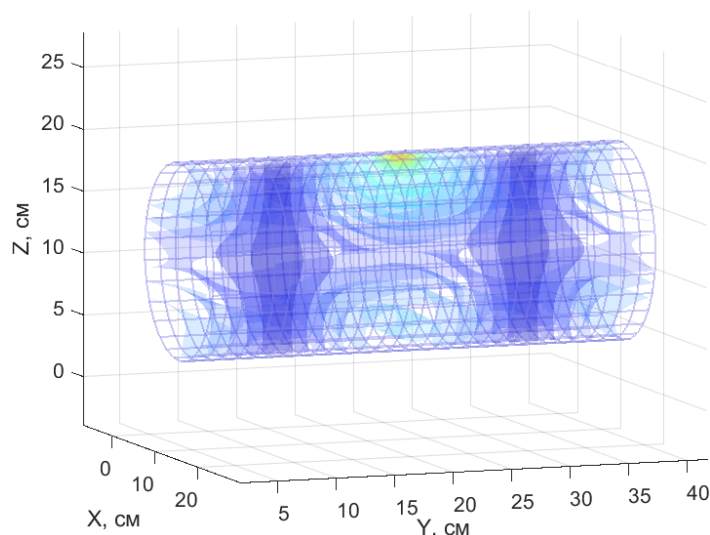


Рисунок 5 – 3D изображении распределения энергии в объеме кварцевой трубы

На рисунке 4 видно, что при зондовом возбуждении основная локальная энергия находится у зонда, но часть этой энергии попадает в трубу, что видно на рисунке 5. Так же в трубе всё также присутствует две области с минимальной энергией и три максимума. На рисунке 6 представлен график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при зондовом возбуждении

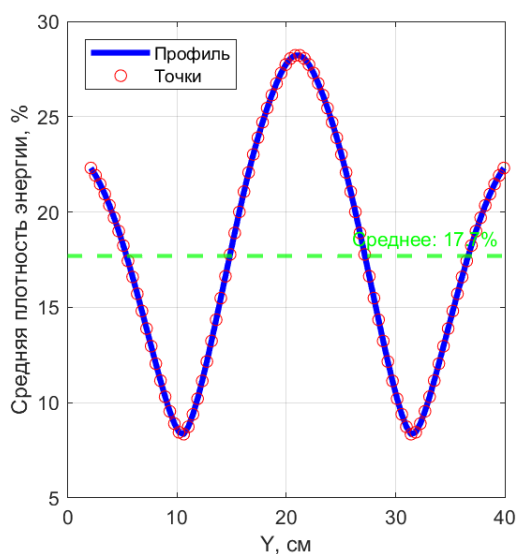


Рисунок 6 – график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при зондовом возбуждении

По графику на рисунке 6 видно, что общий уровень средней плотности энергии увеличился, но из-за наличия области с повышенной энергией в центре равномерность распределения значительно упала до 0,216. При изменении положения зонда по оси Z равномерность может повысится, но тогда упадёт и значение энергии.

Заключение. В ходе моделирования установлено, что геометрия возбуждающего устройства влияет на равномерность распределения и плотность энергии в резонаторе СВЧ-плазматрона. Щелевое возбуждение обеспечивает наилучшее согласование с собственной модой TE_{122} , обеспечивая равномерность распределения энергии за счёт 2 зон с минимальной плотностью энергии и 3 зон с максимальной плотностью. Коэффициент равномерности распределения энергии составляет 0,516, что в 2,4 раза выше, чем при зондовом возбуждении (0,216). Зондовое возбуждение приводит к сильной локализации поля вблизи возбуждителя и нарушению структуры моды, что снижает однородность обработки подложек.

Таким образом, для задач плазменной обработки, требующих высокой однородности поля, щелевой тип возбуждения является предпочтительным, позволяя увеличить эффективный объем плазмы и стабильность процесса.

Список литературы

1. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – 2-е эл. изд. - Саратов: Профобразование, 2019. – 768 с.: ил.
2. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.: ил.

UDC 621.7-4

**INFLUENCE OF THE EXCITATION DEVICE TYPE ON THE
ELECTROMAGNETIC ENERGY DISTRIBUTION IN THE VOLUME OF A
MICROWAVE PLASMATRON RESONATOR**

Shavnya D.S.

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

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., associate professor, head of the department of ETT

Annotation. The modeling of the influence of the excitation device type on the electromagnetic energy distribution in the volume of a microwave plasmotron resonator was performed. The work was carried out in the MatLab software environment. A comparison between an excitation probe and slot excitation was conducted. It was revealed that slot excitation is a more effective method, allowing to achieve the most dense and uniform distribution of electromagnetic energy inside the resonator. The gain in distribution uniformity is 2 times higher than that of probe excitation.

Keywords: resonator, electromagnetic field, energy distribution, slot excitation, field uniformity, excitation device, microwave plasmatron, electromagnetic energy, field non-uniformity.