

Распределение электрического поля в разрядной камере при щелевом вводе СВЧ-энергии

Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, С. Ю. Молчанов, И. Ш. Бахтеев, А. А. Довгань

Рассмотрены некоторые виды щелевого ввода больших значений энергии в цилиндрические и прямоугольные резонаторы. Выбран и оптимизирован ввод энергии через щелевые волноводные отверстия, расположенные на центральной окружности резонатора. Определен КСВ системы. Проведено моделирование изменения энергии электрического поля в резонаторе при смещении положения щелевого волновода. Показаны оптимальные (наилучшие для обработки плазмой СВЧ-разряда) положения объектов и волноводных щелей, а также критические положения (выбор которых может вывести генератор из строя). Рассчитано увеличение напряженности поля между двумя металлическими объектами. Получены результаты, демонстрирующие неприемлемый способ щелевого ввода энергии для решения некоторого типа задач, связанных с обработкой сложных поверхностей СВЧ-разрядом.

Ключевые слова: СВЧ-разряд, низкотемпературная плазма, математическое моделирование, щелевой волновод.

Введение

Совершенствование технологического оборудования для СВЧ вакуумно-плазменной обработки идет по пути повышения производительности и увеличения площади обрабатываемых поверхностей при сохранении качества и равномерности обработки. Однако главный вопрос по-прежнему связан с полу-

чением СВЧ-плазмы. Несмотря на большое разнообразие существующих способов, основным продолжает оставаться использование для этого специального устройства – генератора СВЧ-колебаний, который позволяет создавать в разрядном объеме, например, резонаторе напряжённость электромагнитного поля единицы и десятки киловатт на сантиметр. Повышенная напряжённость приводит к возникновению напряжения пробоя, лавинообразной ионизации и возникновению области плазменного горения – плазмоида.

Выбор используемых для поджига плазмы диапазонов частот не очень обширен. Это связано с тем, что подобного рода установки могут создавать помехи радиосвязи. Международными договоренностями выделены несколько частот для промышленных установок. Наиболее широко используемыми являются частоты 13,56 МГц, 915 МГц и 2,45 ГГц; первая относится к области частот, называемых высокими (ВЧ-разряд), последняя – к области сверхвысоких частот (СВЧ-разряд).

В СВЧ-диапазоне, учитывая специфику распространения электромагнитных волн, для возбуждения разрядов используются колеба-

Бржозовский Борис Максевич¹, г.н.с., д.т.н., профессор.
Мартынов Владимир Васильевич¹, в.н.с., д.т.н., профессор.

Молчанов Сергей Юрьевич², вед. инженер, к.т.н.
Бахтеев Игорь Шамильевич², нач. лаборатории, к.т.н.
Довгань Алексей Александрович¹, инженер.

¹ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова
Российской академии наук.

Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский
переулок, 4.

E-mail: info@imash.ru

² Центральный научно-исследовательский институт
измерительной аппаратуры (ЦНИИИА).

Россия, 410002, г. Саратов, ул. Московская, 66.

E-mail: canishe@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08 июля 2020 г.

© Бржозовский Б. М., Мартынов В. В., Молчанов С. Ю.,
Бахтеев И. Ш., Довгань А. А., 2020

тельные контуры в виде резонаторов. Энергия в реактор поступает из прямоугольного волновода, отделённого от реактора вакуум-плотным окном из специального диэлектрика.

Колеблющиеся в СВЧ-поле электроны могут приобретать энергию, достаточную для осуществления ионизации и поддержания разряда. Катодная область, как источник электронов, фактически оказывается не нужной. Напряжения пробоя снижаются, а разряд может гореть и с электрически изолированными от плазмы электродами. Эти соображения также обуславливают тот факт, что при прочих равных условиях СВЧ-разряд может устойчиво гореть при более низких давлениях, чем разряд постоянного тока.

Плазма может быть создана при давлениях от 10^{-5} Торр до атмосферного в импульсном и непрерывном режимах. Используемые средние мощности лежат в пределах от единиц ватт до сотен киловатт. В разряде может поглощаться до 90 % падающей мощности [1].

Выбор областей расположения в камере (резонаторе) технологической ячейки и подвод СВЧ-энергии к ней – сложная задача. На основе теоретических расчетов канализации и распространения электромагнитных волн и компьютерного моделирования пробоя удается решить подобного рода задачи [2, 3]. Такой подход позволяет с высокой точностью определять области возникновения СВЧ-разрядов при высокой входной мощности и пониженном давлении.

Изложенное в полной мере относится и к оборудованию, реализующему технологии улучшения эксплуатационных свойств металлических изделий различного технологического назначения, в том числе сложнопрофильных, воздействием на их рабочие поверхности концентрированными потоками энергии, обеспечивающим повышение показателей долговечности. Одна из таких технологий связана с воздействием на изделие низкотемпературной СВЧ-плазмой комбинированного разряда, формируемой непосредственно вокруг его поверхности [4]. Результаты исследований, выполненных по изучению этого воздействия, позволили установить [5, 6], что его результативность может быть повышена за счет корректного назначения режим-

ных параметров. Прежде всего, это касается подводимой в рабочую камеру СВЧ-энергии, особенно в ситуации увеличения размеров изделия (и, следовательно, площади обработки) и/или усложнения его формы. В связи с этим актуальным становится исследование реализованного в технологической установке способа ввода СВЧ-энергии в рабочую камеру. Основная цель исследования – поиск условий, обеспечивающих наиболее полную передачу энергии плазмы поверхности изделия, и, как следствие, расширение технологических возможностей установки.

Обзор методов исследования

Строгое решение электродинамической задачи для волноводных излучателей отражено в работе [7], где были рассмотрены варианты расположения двух или нескольких одинаково и противоположно направленных излучателей как на верхней грани прямоугольной камеры, так и на верхней и нижней гранях. Подобные конструкции позволяют получить хорошую равномерность поля в требуемой плоскости, но не во всём объеме камеры.

Возбуждение плазмы в цилиндрической камере со щелевым вводом энергии рассмотрено в работе [8]. Щели волноводного канала WR340 (сечение $86,360 \times 43,180$ мм) расположены в узкой его стенке. Камера заполнена аргоном. Давление газа 20 Торр. Мощность генератора 700 Вт при частоте 2,45 ГГц. Энергия в камеру поступает через волноводный канал, образующий кольцо вокруг цилиндрической камеры. Длина волноводного канала равна 8λ . Количество щелей – 4. Моделирование электрического поля без плазмы проведено с помощью 3D MPECVD модели, где дискретизация дифференциальных уравнений, описывающих процессы распространения и рассеяния электромагнитных волн осуществляется с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет не только подробно изучить процессы взаимодействия электромагнитных волн в резонаторе со щелевым вводом, но и определить основные влияющие факторы, такие как изменение места ввода СВЧ-энергии на распределение электрического поля в резонаторе. МКЭ подробно

описан, например, в работах [9, 10]. Конкурентным преимуществом математического моделирования с помощью конечно-элементных алгоритмов дискретизации является возможность исследования влияния любых по сложности элементов, входящих в состав системы, на итоговые электрические характеристики в любом частотном диапазоне. Основные этапы реализации моделирования включают разбиение области на конечные элементы и определение аппроксимирующих функций конечного элемента.

В плазменном источнике щелевого антенного типа, представленного в [11], микроволновая энергия, выходящая из магнетрона, передается в волновод, закрученный в кольцо, через регулируемый соединительный зонд. В волноводе СВЧ-мощность через равноудаленные резонансные соединительные щели попадает в плазменную камеру из кварца. Мощность в камере распределяется равномерно и позволяет генерировать плазму большой площади в разрядных трубках диаметром до 66 см в диапазоне давлений 1–200 Па. Передача энергии без использования соединительного зонда рассмотрена в работе [12]. Аналогичные системы также представлены в [13].

Численное моделирование и проектирование новой микроволновой кольцевой системы рассмотрено в работе [14], где СВЧ-энергия поступает через щелевые антенны. Моделирование и анализ распределения электромагнитного поля внутри прямоугольного кольцевого волновода, а также исследование взаимосвязи между распределениями электромагнитного поля и радиусом цилиндрической камеры выполнены в программном комплексе HFSS. Данный программный комплекс работает на базе метода конечных элементов. Численное моделирование сводится к разбиению исследуемой области на конечные элементы в виде тетраэдра. Число элементов зависит от сложности исследуемого объекта и требуемой точности его повторения. Дискретный анализ электромагнитных полей приводит к необходимости учета физических условий непрерывности электрического и магнитного полей.

Обоснование подхода к исследованию

Процессы распространения электромагнитных волн в электродинамических системах

описываются уравнениями Максвелла [15, 16]. Решения данных уравнений должны удовлетворять граничным условиям Неймана и Дирихле на металлических поверхностях проводников, условию непрерывности тангенциальных составляющих поля на границе раздела сред, условиям квазипериодичности, а также условию пространственной интегрируемости плотности энергии рассеянного поля. Параметрами, описывающими свойства среды, являются комплексная диэлектрическая проницаемость (ДП) $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ и комплексная магнитная проницаемость $\mu = \mu' - j\mu''$, мнимые части которых описывают потери.

Волны различной длины проникают в материалы по-разному. Для одних частот материал может быть «радиопрозрачен», а на других иметь значительное отражение или ослабление. Для металлов в зависимости от частоты электромагнитного излучения формируется различный по глубине скин-слой (глубина проникновения электромагнитного поля). Глубина $D_{\text{поля}}$ может быть найдена по формуле:

$$D_{\text{поля}} = \frac{2}{\sqrt{2\omega\mu_0\mu\sigma}}. \quad (1)$$

С ростом частоты уменьшается толщина скин-слоя. Поэтому электромагнитное поле формируется только на поверхности металла, не проникая дальше скин-слоя. Из этого можно сделать вывод, что для вычисления распространения поля важно учитывать только свойства верхнего слоя металла, а не всю многослойную структуру, что является актуальным для объектов с гальваническим покрытием. Электрофизические свойства и глубина проникновения электромагнитного поля влияют на поверхностное сопротивление металла: для идеально ровной поверхности оно находится по формуле:

$$R_{\text{мет}} = (\sigma D_{\text{поля}})^{-1}. \quad (2)$$

При моделировании объектов с конечной проводимостью необходимо учитывать условия кривизны поверхности. Она не может превышать толщину скин-слоя на исследуемой частоте, которая по формуле (1) для металлов лежит в диапазоне 0,1–2 мкм. При нормальном процессе распространения элек-

ромагнитного поля поверхностный ток не должен меняться на длине, соизмеримой с толщиной скин-слоя.

Важным методом получения информации о возникновении СВЧ-разрядов является исследование электрического поля. Для моделирования распределения электрического поля в заданной области часто используют программу Comsol, в состав которой входит «Модуль плазмы» [17]. В этот модуль уже заложены особенности физики плазмы СВЧ-разряда. Программа Comsol позволяет моделировать низкотемпературные неравновесные разряды и применялся, например, в работах [18, 19]. Также возможно использовать аналогичные пакетные продукты, в которых реализовано 3D моделирование сложных радиофизических объектов с помощью МКЭ или метода конечных разностей. Численное моделирование электрического поля имеет первостепенное значение в понимании оптимальных размеров камеры и обрабатываемого объекта. Численное моделирование подразумевает создание математической модели распространения электрического поля в заданном объеме и дальнейшее её исследование с использованием численных методов, которые реализованы на компьютере с помощью программного комплекса HFSS.

С помощью описанного подхода становится возможным определить области СВЧ-разрядов. СВЧ-разряды обладают рядом существенных преимуществ, таких как: возможность изготовления электродов из непроводящих материалов, возможность создания плазмы в электродных и безэлектродных системах, простота получения плазмы с высоким и, наоборот, с малым удельным энерговыделением, широкая область рабочих давлений, возможность создания плазмы в малых и больших объемах. Подобная вариация параметров даёт возможность перспективных применений энергии СВЧ, имеющих большую практическую направленность, например, нанесение покрытий и тонких плёнок, травление поверхности и синтез всевозможных наноструктур.

Недостатком разрабатываемых, в том числе и за рубежом, устройств подобного рода является несовершенство конструкции элементов возбуждения многомодового СВЧ-поля в резонаторах цилиндрического типа с большим поперечным сечением [17].

Модель

В данной работе рассматривается возбуждение СВЧ-колебаний в металлической камере в виде цилиндрического резонатора с внутренним диаметром 150 мм. Для отделения генератора СВЧ-энергии от зоны разряда внутри резонатора расположена труба диаметром 137 мм из кварца, который обладает минимальными потерями и высокой термостойкостью (температура его плавления составляет 1713–1728 °С).

Резонатор опоясан кольцевым волноводом сечением 45×90 мм, в широкой стенке которого вырезаны щели для передачи СВЧ-энергии в резонатор (рис. 1). Поскольку камера не имеет настроенного поршня и согласованной нагрузки, необходимо рассчитать оптимальное количество и расположение щелей в волноводе для передачи как можно большего количества энергии в камеру и уменьшения отражённой в сторону генератора волны.

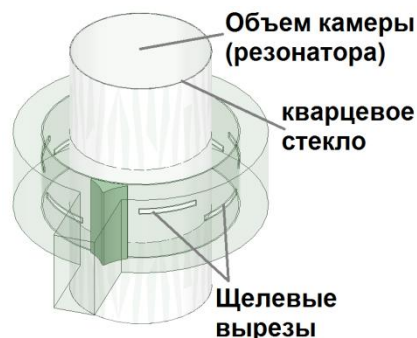


Рис. 1. Физическая модель цилиндрического резонатора со щелевым вводом.

В щелевых волноводных антеннах с широкой стенкой прямоугольного волновода равной 90 мм для частоты генератора 2,45 ГГц (длина волны $\lambda = 122,4$ мм) расстояние между соседними щелями равно $\lambda/2$ (случай переменноразно связанных щелей с полем волновода). Синфазное возбуждение продольных щелей, расположенных по разные стороны от средней линии при $d = \lambda/2$, обеспечивается за счет дополнительного сдвига по фазе на 180° в силу противоположных направлений поперечных токов по обеим сторонам от средней линии широкой стенки волновода [18]. Таким образом, для металлического цилиндра с диаметром 150 мм количество щелей – 8. Антен-

ны рассматриваемого типа могут быть хорошо согласованы с питающей линией в весьма узкой полосе частот.

Средства откачки воздуха выполнены в торцевой стенке резонатора. Их параметры слабо влияют на распространение СВЧ-энергии в данной системе из-за установленной металлической сетки, которая полностью отражает радиоволны. Но необходимо также предусмотреть защиту СВЧ-генератора от избытка отражённой мощности для случая, когда система находится без обрабатываемого материала.

По своим размерам камера является многомодовой, поэтому при моделировании распространения СВЧ-энергии в ней необходимо учитывать распределения узлов и пучностей поля для всех возможных видов колебаний, число которых растёт с увеличением размеров резонатора относительно длины волны генератора.

Для обеспечения одномодового режима работы в круглом волноводе, сечение которого больше, чем длина волны, необходимо предусмотреть наличие условий для нераспространения нерабочих типов волн. Это могут быть продольные вырезы во внутренней части волновода [19]. Высшие типы волн, попадая в эти вырезы, затухают, другие же типы волн ослабляются незначительно и сохраняют нормальные условия для распространения вдоль оси волновода. Однако при вводе СВЧ-энергии вдоль окружности цилиндрического резонатора данные вырезы будут работать неэффективно, поэтому при моделировании будем учитывать все возможные типы колебаний (моды), обладающие СВЧ-мощностью. В качестве излучающих элементов (антенн) будем рассматривать щели, расположенные на широкой стенке волновода. Возбуждение щели в волноводе происходит тогда, когда она своей широкой стороной пересекает поверхностные токи, текущие по внутренним стенкам волновода.

В программе HFSS металлические объекты подвергаются разбиению на конечные элементы и дальнейшему анализу только на глубину скин-слоя, рассчитанному по формуле (1), что позволяет существенно экономить вычислительные мощности. Поверхностное сопротивление материала по формуле (2) учитывается по вложенным в программный ком-

плекс библиотечным данным. Комплекс с высокой точностью рассчитывает распределение электрического поля в любых сложных системах, поэтому и был выбран как основной для проведения дальнейших исследований.

Результаты исследования

Для исследования распределения электрического поля в цилиндрической камере при щелевом вводе СВЧ-энергии главным условием является согласование количества и расположения щелей в волноводном канале. Моделирование показало близкое к симметричному распределение напряжённости электрического поля в камере и в волноводе (рис. 2). Поэтому можно сделать вывод о том, что расположение щелевых отверстий выполнено правильно.

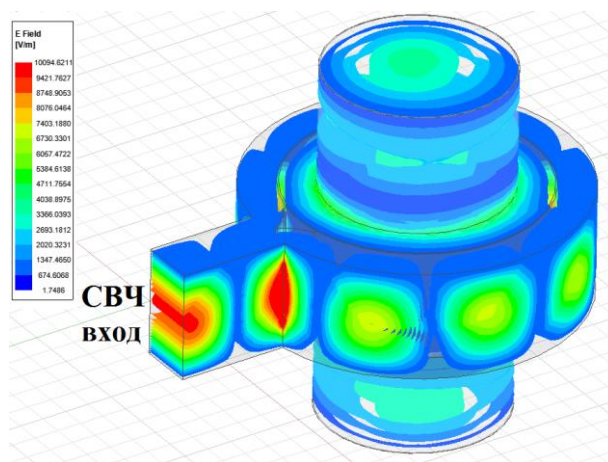


Рис. 2. Напряжённость электрического поля в волноводе и цилиндрическом резонаторе при оптимальных условиях.

При пустой камере (без объекта обработки) практически вся мощность от генератора возвращается обратно. Это связано с тем, что волноводный канал закольцован, и не имеет согласующей нагрузки. Данный режим категорически запрещён, поскольку может привести к выходу из строя СВЧ генератора. При зажигании плазмы большая часть мощности идёт на поддержание разряда, и обратная волна не формируется. При такой работе генератор ведёт себя стабильно и можно утверждать, что в качестве согласующей нагрузки выступает плазма. Но при недостаточном уровне поглощения СВЧ-энергии неустойчивая мощность от генератора возвращается обратно

и может нарушить его стабильную работу, а при большом значении – вывести из строя. В связи с этим, рассмотрим случаи с различными по размерам поглощающими объектами в цилиндрической камере. Оценку избыточной (отраженной) СВЧ-мощности будем проводить на входе кольцевого волновода по коэффициенту стоячей волны (КСВ). Возврат по волноводному тракту в генератор СВЧ-энергии рассмотрим без учёта ферритового вентиля или циркулятора.

Для оценки отражений при щелевом вводе СВЧ-мощности поместим поочерёдно в центр камеры поглощающие объекты цилиндрической формы, имеющие размеры $100 \times R30$ мм, $100 \times R10$ мм и $20 \times R10$ мм. Распределения электрического поля для этих объектов представлены на рис. 3, а–в. КСВ в первом случае равен 3,52, во втором – 5,5, в третьем – 55,6. В первом случае режим работы удовлетвори-

тельный, отражённая мощность равна 30 %. Во втором случае отражённая мощность равна 48 %. В последнем случае отражённая мощность превышает 93 %. Из полученных результатов можно сделать вывод, что избыток подводимой мощности имеет прямую зависимость от поглощения в цилиндрической камере. Малое поглощение может привести к нестабильной работе СВЧ-генератора. Поэтому важно подавать такой уровень мощности в камеру, при котором происходит СВЧ-разряд и дальнейшее возгорание плазмы, обеспечивающее значительное поглощение мощности. Контролировать этот параметр возможно по объёму загоревшейся плазмы и её яркости. Если увеличение СВЧ-мощности не приводит к увеличению СВЧ-яркости и объёму плазмы, то это будет означать, что она избыточна, и нужно выбирать режим с меньшей мощностью.

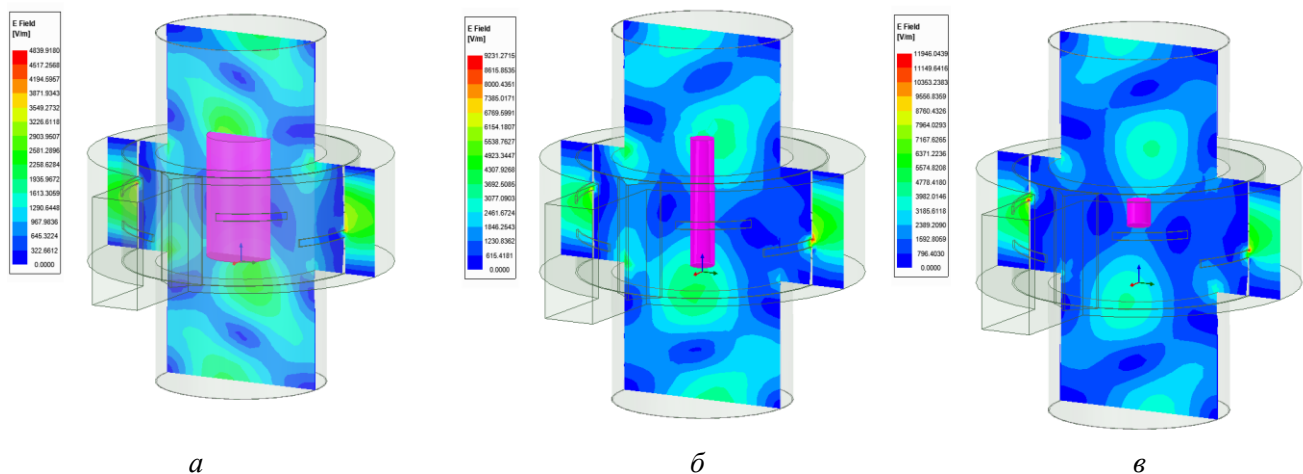


Рис. 3. Распределение электрического поля в плоскостях XY при помещении в камеру поглощающего объекта с размерами: а – $100 \times R30$ мм, б – $100 \times R10$ мм, в – $20 \times R10$ мм.

Стоит также отметить, что возникновение электрического разряда в камере зависит не только от подводимой мощности, но и от давления в ней. Эти зависимости называются кривыми Пашена и являются важнейшей характеристикой газового разряда.

Поскольку основным назначением камеры является синтез композитных ионно-плазменных покрытий на поверхностях металлических изделий, для рассмотрения возможных вариантов поджига плазмы (местоположение, объём) поместим в камеру металлический

объект. Этим мы создадим существенное перераспределение электрического поля в ней. Для зажигания плазмы на поверхности объекта необходимо поместить его в электрическое поле с максимальной напряжённостью. Это – центр камеры, куда СВЧ энергия излучается из волноводного канала. Как правило, обработке подвергается не вся поверхность объекта, а только ее часть, в которой необходимо изменить поверхностные и/или объёмные свойства. Остальная часть объекта помещается в плотный диэлектрический материал (фто-

ропласт или тефлон). При необходимости обработки длинных объектов, например, длиномерного металлорежущего инструмента (свёрл, метчиков, фрез, разверток), следует создать максимум электрического поля не в окрестности центра цилиндра, а в зоне обработки объекта (рис. 4).

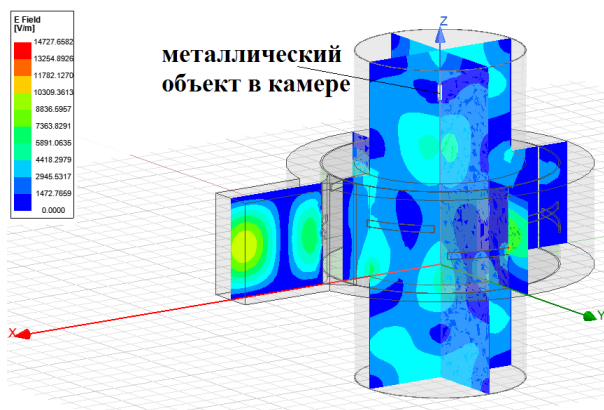


Рис. 4. Распределение электрической энергии в камере с объектом, расположенным удалённо от центра.

На практике подобное расположение объекта может привести не только к отсутствию возникновения разряда и зажиганию плазмы, но и к выходу из строя генератора из-за большой отражённой мощности. Поэтому необходимо перенести ввод энергии к краю цилиндрической камеры (рис. 5).

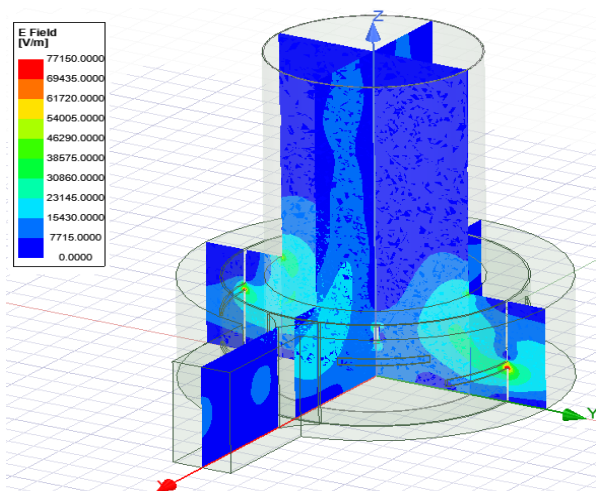


Рис. 5. Распределение электрической энергии в камере с измененным местом щелевого ввода и объектом, расположенным удалённо от центра.

Рассмотрим возникновение плазменного разряда на вогнутых поверхностях на примере объекта, в верхней части которого расположе-

на конусовидная впадина. Необходимо определить условия для возникновения в окрестности этой области наибольшего значения напряженности электрического поля. Как видно из рассчитанных данных (рис. 6), высокие значения напряжённости электрического поля проявляются только на верхней кромке изделия. В вогнутой части её значения близки к нулю.

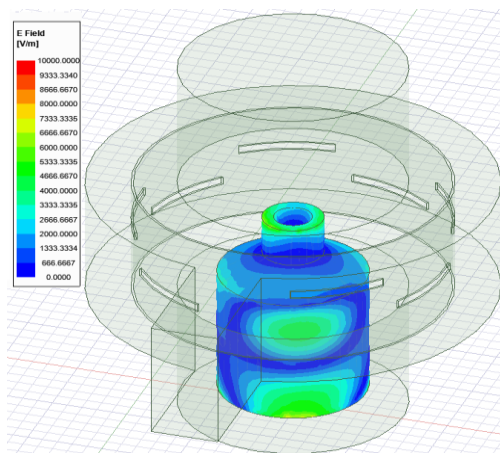


Рис. 6. Распределение электрической энергии на поверхности объекта с вогнутой верхней частью.

При перемещении щелевого ввода относительно резонаторной камеры значительного увеличения напряжённости электрического поля на верхней части изделия не происходит. Стоит обратить внимание на то, что высокое значение напряжённости формируется не только в области щелевого ввода энергии, но и у края изделия, расположенного вблизи металлического основания резонаторной камеры.

Для усиления электрического поля в месте обработки добавим в камеру вспомогательный объект. Диаметральный размер вспомогательного объекта соизмерим (больше на 2 см) с меньшей цилиндрической частью детали, его длина, влияющая только на перераспределение электрического поля в камере, значения не имеет. Дополнительно незначительно сместим щелевой ввод относительно центра для достижения максимально возможной напряжённости электрического поля в области вогнутости.

Результаты показали (рис. 7), что добавление вспомогательного объекта даёт ощутимый результат. Напряжённость электрического поля возросла почти в 2 раза, но внутри во-

гнутой части обрабатываемого объекта осталась на низком уровне. Это означает, что для обработки объектов с подобной геометрией необходимо использовать другой вариант ввода СВЧ энергии. Кроме этого даже незначительное изменение положения обрабатываемого объекта может привести к возбуждению других, отличных от расчётных, мод с внесением изменений в распределение электрического поля в камере.

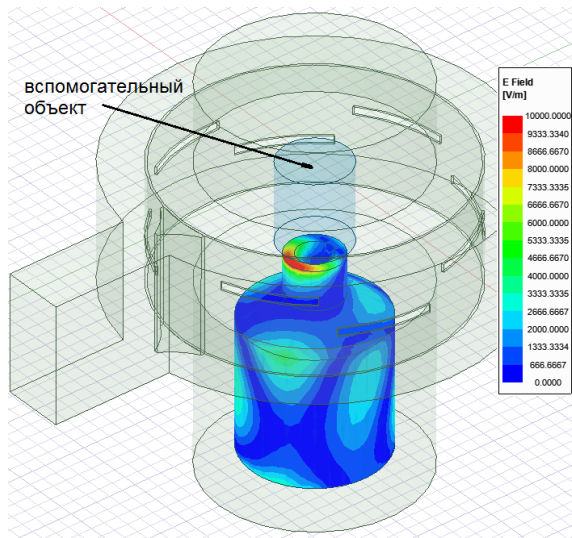


Рис. 7. Распределение электрической энергии на поверхности объекта при добавлении вспомогательного металлического объекта.

Заключение

В работе проведено исследование распределения электрического поля в многомодовой цилиндрической камере при щелевом вводе СВЧ-энергии с целью анализа ее технологических возможностей при поверхностной упрочняющей обработке металлических изделий.

Построена математическая модель камеры, с помощью которой:

- проанализированы особенности передачи СВЧ-энергии в резонатор цилиндрического типа. На частоте 2,45 ГГц рассчитаны оптимальные длины и положения щелевых отверстий, находящиеся на толстой стенке волноводного канала 45×90 мм. Даны рекомендации для зажигания плазмы СВЧ-разряда в цилиндрическом резонаторе;

- показано, что эффективное поддержание СВЧ-разряда возможно только при условии обеспечения стабильной работы СВЧ-генератора. Критериями стабильности являются ве-

личина отраженной СВЧ-мощности, определяемой по значению КСВ на входе волновода;

- рассчитано распространение электрической мощности в камере при смещении положения щелевого волновода и определены области с максимальными и минимальными уровнями напряжённости электрического поля;

- найдены оптимальные параметры для обработки длинных (с длиной больше половины длины камеры) объектов; показано, что смещение щелевого ввода позволяет производить их обработку, включая торцевые участки;

- описано локальное увеличение напряжённости электрического поля обрабатываемого объекта при близком взаимодействии с металлическим телом.

В целом результаты моделирования показали, что условия для наиболее полной передачи энергии плазмы поверхности изделия, обеспечивающие расширение технологических возможностей установки низкотемпературной СВЧ-плазменной обработки металлических изделий, имеются.

В дальнейшем для продолжения исследований с использованием построенной модели предполагается реализовать в ней:

- ситуацию размещения в камере заземлённых металлических объектов путём создания проводящих линий от её корпуса до объектов;

- процесс поглощения плазмой СВЧ-мощности, исходя из ее объёма, расположения и примерных диэлектрических характеристик.

Практически это позволит получить более точную картину распространения и распределения поступающей в камеру СВЧ-энергии, т. е. повысить достоверность результатов моделирования.

Работа была выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00101).

ЛИТЕРАТУРА

1. Lebedev Yu. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. P. 053001.
2. C. M. Ferreira, Moisan M. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. – Plenum Press, New York, 1993.
3. Baeva M., B. A. J. Ehlbeck, Loffhagen D. // Physical Review. 2012. Vol. 85 (5). P. 056404.

4. Brzhozovskii B. M., Azikov N. S., Martynov V. V., Zinina E. P. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. Vol. 1281. P. 012006.
5. Brzhozovskii B., Brovkova M., Gestrin S., Martynov V., Zinina E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 145204.
6. Brzhozovskii B., Brovkova V., Gestrin S., Martynov V., Zinina E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. P. 485202.
7. Давидович М. В., Явчуновский В. В. // Вопросы прикладной физики. Изд-во Сарат. ун-та. 2004. Вып. 10. С. 49.
8. Jiang Y. et al. Design and modeling of a microwave plasma enhanced chemical vapor deposition system // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2019. P. 1–2.
9. Зенкевич О. Морган М. Конечные элементы и аппроксимации. – М.: Мир, 1986.
10. Volakis J. L., Chatterjee A., Kempel L. C. Finite element method for electromagnetics. – N.Y.: IEEE Press, 1998.
11. Korzec D., Werner F., Winter R., Engemann J. // Plasma Sources Sci. Technol. 1996. Vol. 5. P. 216.
12. Moisan M., Zakrzewski Z., Grenier R., Sauve G. // J. Microw. Power Electromagn. Energy 1995. Vol. 30. P. 58.
13. Microwave Excited Plasmas ed M. Moisan and J. Pelletier, 1992.
14. Liu F., Wang J., Dai S. // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2011. T. 24. № 6. С. 526.
15. Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1969.
16. Вайнштейн Л. А. Теория дифракции и метод факторизации. – М.: Советское радио, 1966.
17. <https://www.comsol.ru/plasma-module>
18. Brcka J. Modeling remote H2 plasma in semiconductor processing tool // Proceedings of the COMSOL Users Conference. 2006.
19. Turkoz E., Celik M. // Journal of Computational Physics. 2015. Vol. 286. P. 87.
20. Гуляев Ю. В., Яфаров Р. К. // Зарубежная электронная техника. 1997. № 1. С. 77.
21. Усанов Д. А., Яфаров Р. К. Исследование эффективности и равномерности возбуждения волноводно-резонаторных СВЧ-устройств для вакуумно-плазменной обработки материалов на широкоформатных носителях: учеб. пособие для студ. фак. нано- и биомедицинских технологий. – Изд-во Сарат. ун-та, 2013.
22. Михайлов В. Ф., Нарытник Т. Н., Брагин И. В., Мошкин В. Н. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 2003.

PACS: H52.58.Qv, 41.20.Jb, 84.40.-x, 52.40.Fd

Study of distribution of the electric field in a plasma chamber with input slot of microwave energy

B. M. Brzhozovskii¹, V. V. Martynov¹, S. Yu. Molchanov², I. S. Bahteev², and A. A. Dovgan¹

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)
4 M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russia

² Central Institute of Measure Equipment
66 Moskovskaya st., Saratov, 410002, Russia

Received July 08, 2020

Some types of slot input of energy with great value into cylindrical and rectangular cavities were considered. Input of energy through slot wave guiding apertures located at the central circle of the cavity was selected and optimized. SWR of the system was determined. Simulation of change in the energy of the electrical field in the cavity when shifting the position of the slot wave guide was carried out. Optimum (the best for machining with SHF discharge plasma) positions of the objects and wave guide slots as well as critical positions (the choice of which can put the oscillator out of action) were shown. Growth of the field density between two metallic objects was calculated. Results demonstrating unacceptable way of slot input of energy for solving some types of problems related to machining of complex surfaces with SHF discharge were obtained.

Keywords: Microwave discharge, low temperature plasma, mathematical modeling, slot waveguide.

REFERENCES

1. Yu. A. Lebedev, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 053001 (2015).
2. C. M. Ferreira and M. Moisan, *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications* (Plenum Press, New York, 1993).
3. M. Baeva, B. A. J. Ehlbeck, and D. Loffhagen, *Physical Review* **85** (5), 056404 (2012).
4. B. M. Brzhozovskii, N. S. Azikov, V. V. Martynov, and E. P. Zinina, *Journal of Physics: Conference Series* **1281**, 012006 (2019).
5. B. Brzhozovskii, M. Brovkova, S. Gestrin, V. Martynov, and E. Zinina, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 145204 (2018).
6. B. Brzhozovskii, M. Brovkova, S. Gestrin, V. Martynov, E. Zinina, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 485202 (2019).
7. M. V. Davidovich and V. V. Yavchunovskii, *Voprosi prikladnoy fiziki*, № 10, 49 (2004) [in Russian].
8. Y. Jiang, in *Proc. International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019)*. IEEE, 2019.
9. O. Zenkevich and M. Morgan, *Finite element and approximation* (Mir, Moscow, 1986) [in Russian].
10. J. L. Volakis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel, *Finite element method for electromagnetics* (N.Y., IEEE Press, 1998).
11. D. Korzec, F. Werner, R. Winter, and J. Engemann, *Plasma Sources Sci. Technol.* **5**, 216 (1996).
12. M. Moisan, Z. Zakrzewski, R. Grenier, and G. Sauve, *J. Microw. Power Electromagn. Energy* **30**, 58 (1995).
13. *Microwave Excited Plasmas* ed M. Moisan and J. Pelletier 1992.
14. F. Liu, J. Wang, and S. Dai, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields.* **24** (6), 526 (2011).
15. G. T. Markov, B. M. Petrov, and G. T. Grudinskaya, *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Sovetskoe radio, Moscow, 1969) [in Russian].
16. L. A. Vaynshtein, *Teoriya difrakcii i metod faktorizacii* (Sovetskoe radio, Moscow, 1966) [in Russian].
17. <https://www.comsol.ru/plasma-module>
18. J. Brcka, *Modeling remote H2 plasma in semiconductor processing tool* / *Proceedings of the COMSOL Users Conference*, 2006.
19. E. Turkoz and M. Celik, *Journal of Computational Physics* **286**, 87 (2015).
20. Yu. V. Gulyaev and R. K. Yafarov, *Zarubegnaya elektronnaya tehnika*, № 1, 77 (1997) [in Russian].
21. D. A. Usanov and R. K. Yafarov, *Investigation of efficiency and uniformity of excitation of waveguide-resonator microwave devices for vacuum-plasma processing of materials on wide-format carriers*, SGU, Saratov 2013 [in Russian].
22. V. F. Michaylov, T. N. Naritnik, I. V. Bragin, and V. N. Moshkin, *Microwave technologies in telecommunications systems*, SPBU, S-P, 2003 [in Russian].

