

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра физической электроники

Курсовая работа на тему

«Способы создания микроплазмы и её применение»

Выполнила: студентка 218 группы

Шестакова Ангелина Алексеевна

Научный руководитель: доцент

Двинин Сергей Александрович

Москва

2020 год

Содержание	2
Введение.	2
1. Проблемы в области науки и техники для решения задач.	4
2. Заключительные замечания.	5
3. Способы создания микроплазмы	5
4. Пример анализа создания микроплазмы в одном из вариантов установки	7
5. Система уравнений, используемая для описания потока газа в микроплазме	8
6. Система уравнений, описывающих развитие газового разряда в потоке газа	9
7. Расчет характеристик разряда с помощью пакета Комсол.	10
Выводы	13
Список литературы	13

Введение

Проблемы, связанные с созданием и применением микроплазмы наиболее подробно рассмотрены в обзорах [1] и [2].

В целом, микроплазма определяется как плазма размером от мм до мкм в трехмерных масштабах [3 – 5]. В некоторых случаях, однако, включены двухмерные (линейные) и одномерные (плоские) микроплазмы. Характеристики пространственной малости могут создать новую физику, химию или науку, отличную от характеристик крупномасштабной плазмы из-за увеличения отношения поверхности к объему. Для увеличения скорости размножения электронов на более коротком расстоянии, а также для предотвращения потери стенки микроплазмы в основном работают в диапазонах более высокого давления (или плотности). Поэтому, даже если степень ионизации низкая или умеренная, можно легко сделать плотность электронов n_e больше 10^{13} см^{-3} [5]. Предположим, что плотность равна 10^{16} см^{-3} , например, соответствующая частота электронной плазмы $\omega_{pe}/2\pi$ становится равной примерно 1 ТГц. Это поощряет использование микроплазм в качестве проводящих диэлектрических сред для электромагнитных волн в дополнение к традиционным применениям, таким как светоизлучающие и реактивные среды, как показано на рисунке 1 [3].

Микроплазма может быть использована в качестве изолированного устройства для локальной обработки материалов или биомедицинской обработки. С другой стороны, сборка микроплазм используется для создания более крупных устройств. Он также нацелен на создание новых функциональных устройств, таких как фотонные кристаллы или метаматериалы с этими сборками [6]. Технологии интегрирования микроплазм также развиваются [4]. Например, технология печати, такая как технология, используемая в производстве плазменных панелей дисплея, применима для стеклянных или керамических подложек, а технология микрообработки, используемая в производстве полупроводниковых интегральных схем, эффективна для кремниевых подложек.

Текущие и будущие проблемы. Амикроплазма может использоваться как источник для обработки различных материалов: локализованный процесс с одним источником и

процесс с большой площадью с массивом источника. Как единственный источник, микроплазменная струя является наиболее часто используемым устройством, приводимым в широких частотных диапазонах от постоянного тока до ГГц. Среди таких устройств наиболее популярным из-за своей простой конструкции стал источник диэлектрического барьера (DBD), оснащенный парой кольцевых электродов вокруг стеклянной трубки диаметром несколько мм.

Он приводится в действие низкочастотным источником питания в диапазонах кГц с потоком редкого газа. Можно получить длинный плазменный шлейф длиной несколько сантиметров, выбрасываемый в окружающий воздух. Однако при высокоскоростном наблюдении с камеры кажется, что серия пульс распространяется с кажущейся скоростью в несколько десятков км / с. Этот механизм был подтвержден различными экспериментами и симуляциями, чтобы быть похожим на механизм распространения стримера в коронном разряде (см. [7] и ссылки в нем). Он был успешно применен для нанесения различных тонкопленочных материалов, таких как SiO_2 и ZnO . Используя неравновесную и переходную природу микроплазмы, она также применяется для синтеза наночастиц [8].

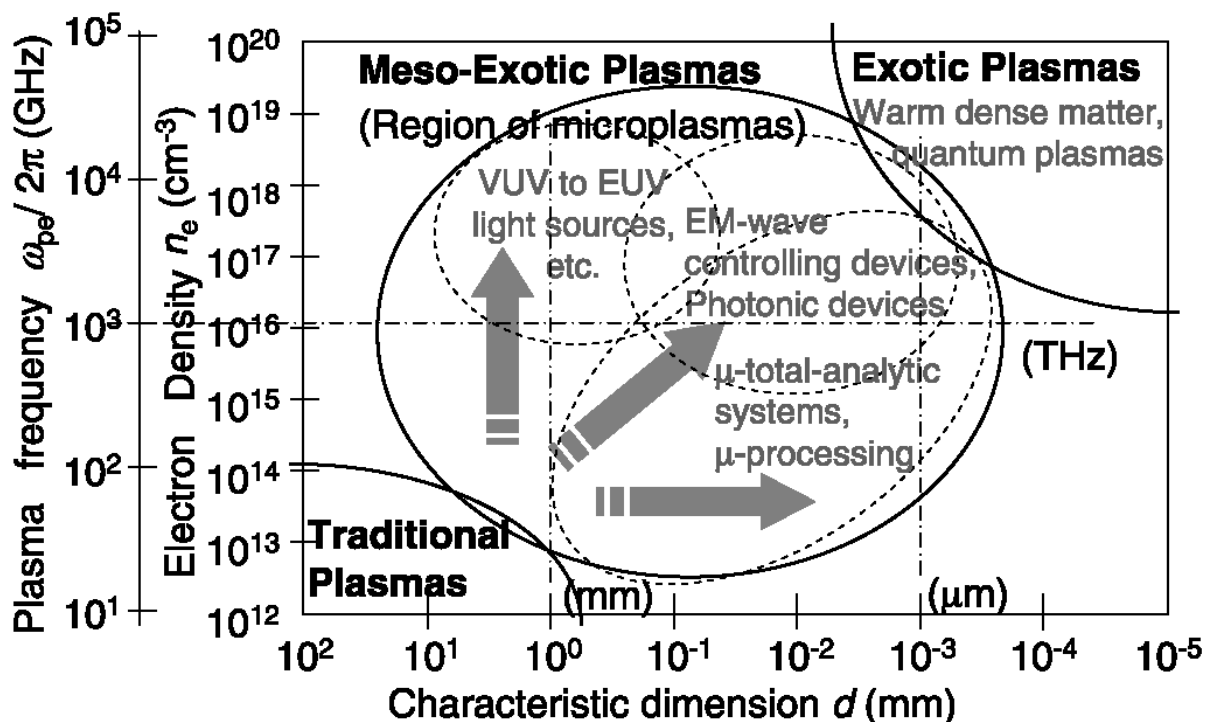


Рис. 1. Характеристика площади микроплазм в плоскости пространственного размера d и электронной плотности n_e .

Больше энтузиазма касается биомедицинских приложений. Вдохновленные новаторской работой Стоффеля [9], было опубликовано много сообщений о применении микроплазм для дерматологического лечения, хирургического гемостаза, лечения зубов и так далее (см. [10] и ссылки в них). Однако в большинстве этих применений мы просто поставляем химически реактивные вещества, полученные в плазме, для целей дезинфекции, стерилизации или свертывания крови. В последующие годы будут применяться более сложные приложения, такие как клеточные методы лечения рака и трансфекции генов.

Для обработки или обработки больших площадей требуется интегрировать микроплазму в крупномасштабное устройство. Это также относится к фотонным устройствам при создании источника света большой площади [11]. Было предложено несколько видов источников с сетчатыми или тканевыми структурами, связанными струйными структурами и так далее. В качестве практического примера был разработан плазменный штамп с массивом микроплазм на подложке для локальной обработки материала по заданному шаблону [12].

Более интересной функционализацией микроплазменного массива является создание фотонного кристалла или метаматериала для управления распространением электромагнитных (ЭМ) волн. В общем случае диэлектрическая проницаемость плазмы дается формулой [6]

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2(1 + i\nu_m/\omega)} = 1 - \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e \omega^2(1 + i\nu_m/\omega)},$$

где ν_m - частота столкновений электронов, ω - угловая частота электромагнитных волн, e - заряд электрона, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость в вакууме, а m_e - масса электрона. Из этого соотношения видно, что ϵ_p можно изменить от единицы до отрицательных значений согласно n_e . Когда мы размещаем микроплазму в пространстве с шагом, значительно меньшим длины волны распространяющихся электромагнитных волн, мы можем создать среду, эффективная диэлектрическая проницаемость которой периодически модулируется. В качестве примера давайте рассмотрим двумерный массив столбчатых микроплазм в квадратной решетке. Связь ω с волновым вектором k дается диаграммой фотонных зон, в соответствии с направлением распространения [6]. Отмечено, что фотонные запрещенные зоны появляются там, где передача электромагнитных волн запрещена.

В этом расширении, изменяя основные параметры вещества: проводимость σ , диэлектрическую проницаемость ϵ и магнитную проницаемость μ , мы приходим к идее синтеза метаматериала из массива микроплазм. Поскольку сама плазма не имеет индуктивности (или проницаемости), мы должны добавить некоторые функциональные компоненты, которые могут способствовать пространственной модификации μ . Например, мы можем использовать структуру электродов для компонентов, например, в форме двойной спирали, разрезного кольца и т. д. Таким образом, мы можем реализовать метаматериалы с отрицательным показателем преломления или нелинейным раздвоенным электрическим откликом [36].

1. Проблемы в области науки и техники для решения задач

Как описано выше, микроплазмы обычно генерируются электрическими разрядами в газах высокого давления. Разрядные среды могут быть обобщены как среды с высокой плотностью, включая жидкости и сверхкритические жидкости. В этих средах механизмы развития разряда, инициируемые коронными разрядами, должны быть уточнены количественно для оптимизации условий генерации. В частности, применительно к биомедицинским и экологическим применениям механизмы подводных разрядов внутри, с пузырьками или без них вызывают большую озабоченность.

Взаимодействие плазмы с поверхностью также является важной целью исследований для различных применений при хорошо диагностированных характеристиках плазмы. В

частности, в биомедицинских применениях «субстраты», подвергающиеся воздействию плазмы, представляют собой живые клетки, ткани или организмы, поэтому мы должны обращать внимание не только на мгновенные взаимодействия, но и на отдаленные реакции, стимулируемые облучением. Для базового изучения биомедицинских проблем требуется миниатюризация источников плазмы, соответствующих размеру биологической клетки, чтобы увидеть причинно-следственные связи взаимодействия.

2. Заключительные замечания.

Часто спрашивают, есть ли какая-либо новая физика или химия микроплазмы по сравнению с крупномасштабной плазмой, генерируемой в области низкого давления. Чтобы ответить на этот вопрос, были приведены некоторые примеры выше, которые могут быть реализованы только при использовании естественной природы микроплазмы. Однако нам нужно искать больше примеров, исследуя «мезо-экзотический» диапазон параметров микроплазм, показанных на рисунке 1.

3. Способы создания микроплазмы

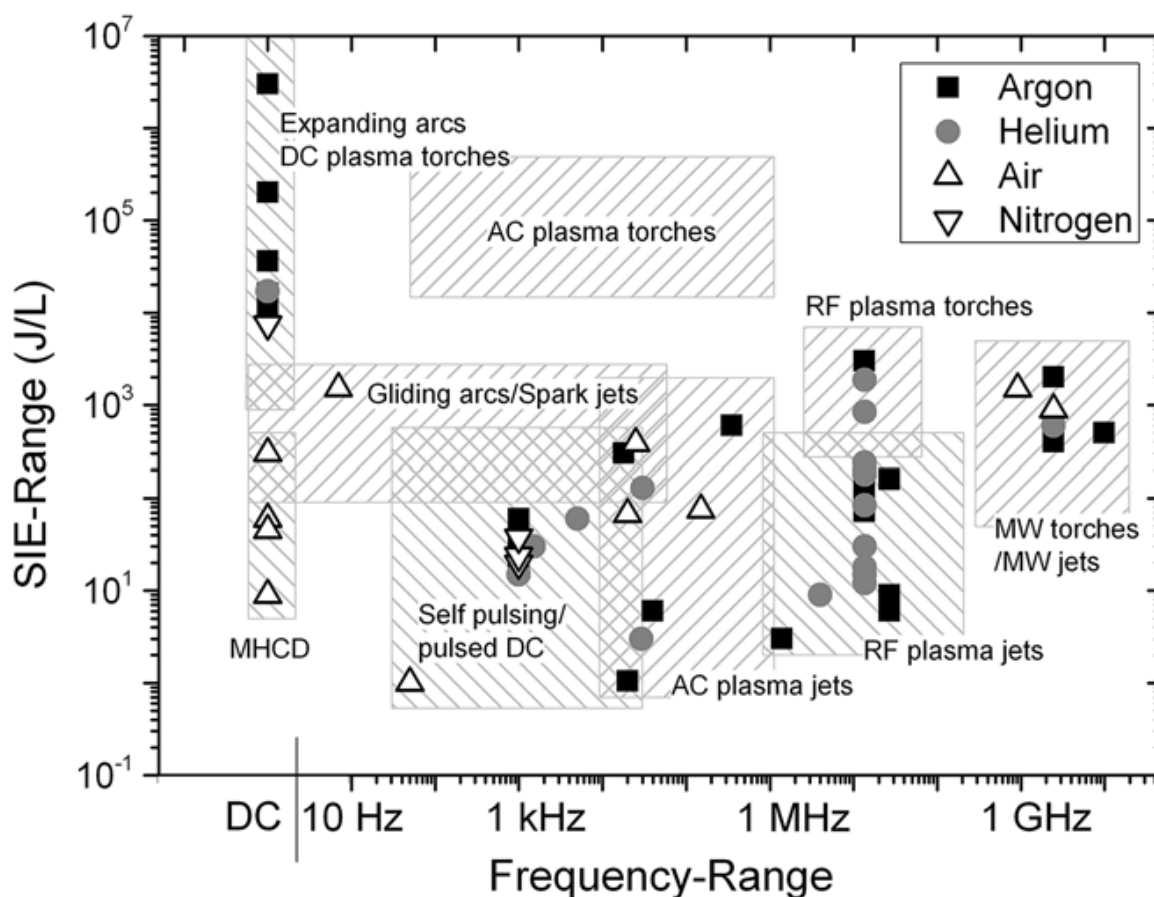


Рис. 2. Классификация различных плазменных струй, относительно вкладываемой в разряд мощности.

Пример различных плазм, создаваемых в плазменной струе, приведен на рис. 2, где

показаны на диаграмме мощность, вкладываемая в единицу объема в зависимости от частоты поддерживающего разряд электромагнитного поля.

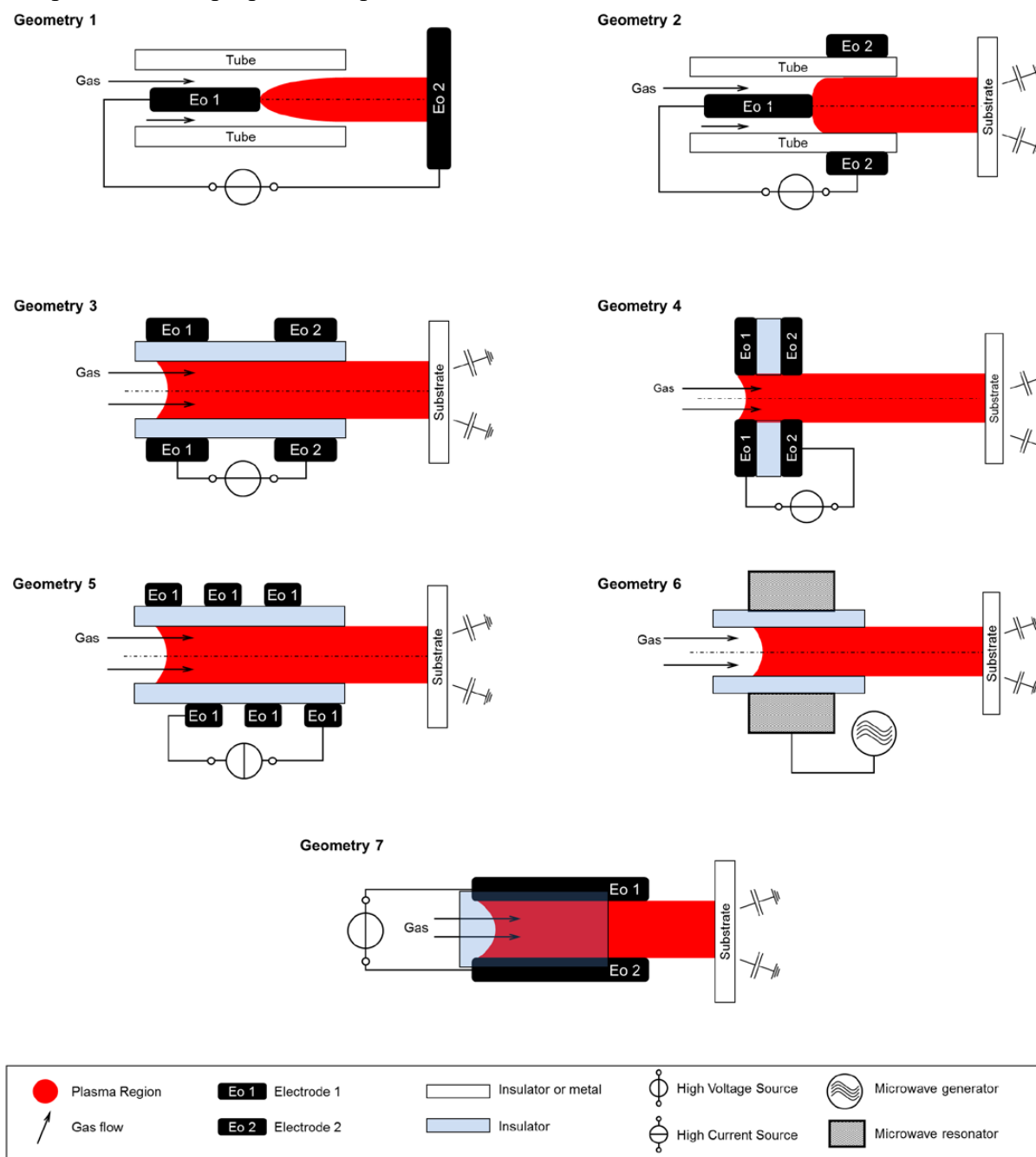


Рис. 3. Базовые типы установок для создания плазмы в потоке в коаксиальной (1–6) и прямоугольной геометриях

В мире разработано большое количество плазменных устройств и их классификация одет по следующим параметрам

1. Геометрия разряда, устройство электронов и конфигурация поля
2. Тип плазмы, которая генерируется (изотермическая дуга/факел(горелка), или неизотермическая/холодная плазма)
3. Частота поля (Постоянный ток, низкочастотный переменный ток, ВЧ плазма, микроволновая плазма)

4. Импульсная или непрерывная плазма
5. Химический состав газа, в котором создается плазма.

С геометрической точки зрения для изотермической плазмы постоянного тока или тока низкой частоты это может быть плазменная горелка прямого нагрева или дуговая горелка прямой полярности. ВЧ плазма может создаваться с помощью емкостного или индуктивного разряда¹ Микроволновые разряды могут представлять собой разряды в резонаторе или разряды в коаксиальной линии.

Плазменные струи с неравновесной плазмой могут быть классифицированы как (Рис. 3)

1. Электродные разряды (без диэлектрика)
2. Диэлектрические барьерные разряды (ДБД)
3. Струи с разрядами, похожими на ДБД
4. Разряды в коаксиальной линии.

Геометрия 1 представляет собой дугу прямого нагрева. При больших мощностях в данной геометрии создается ЛТР плазма, но малых размерах и небольших вложенных мощностях возможна генерация неравновесной плазмы.

В геометрии 2 реализуется дуга непрямого нагрева. Как правило, если трубка металлическая, то установка классифицируется как dielectric free (бездиэлектрическая) и в ней реализуется равновесная плазма.

В случае использования диэлектрической трубы это в такой геометрии реализуется ДБД-подобный источник плазмы. Внутренний электрод также может быть покрыт диэлектрическим слоем.

В геометрии 3 оба электрода располагаются вне разрядной трубки

В геометрии 4 для облегчения создания плазмы реализуется полый катод.

Геометрия 5 представляет собой индуктивный разряд.

Геометрия 6 реализует микроволновый разряд в резонаторе, а геометрия 7 – емкостной ВЧ разряд между двумя электродами.

Существует также классификация установок на установки с продольным полем, установки с поперечным полем и установки с полем вблизи подложки.

4. Пример анализа создания микроплазмы в одном из вариантов установки

Рассмотрим задачу о воздействии плазменной струи на подложку. Примерная геометрия показана на рис. 4. Рабочий газ протекает в вакуумную камеру через диэлектрическую трубку 3. Газовый разряд создается с помощью генератора импульсов (8) и электродов 1 и 2. Схема создания плазмы может быть другой и приведена для примера. Вытекающая плазменная струя 6 воздействуя на подложку 5, которая находится на подложкодержателе 4 и отводит тепло. Напряжение между струей и подложкой регулируется с помощью генератора (9).

¹ Разряд называется емкостным, если высокочастотный ток протекает через перпендикулярно границе плазмы (пример – разряд между обкладками конденсатора) или параллельно границе плазмы (разряд внутри соленоида). Конечно, создать идеальный индуктивный или емкостной разряд не удастся, однако при работе на радиочастотах одна из составляющих обычно бывает преобладающей.

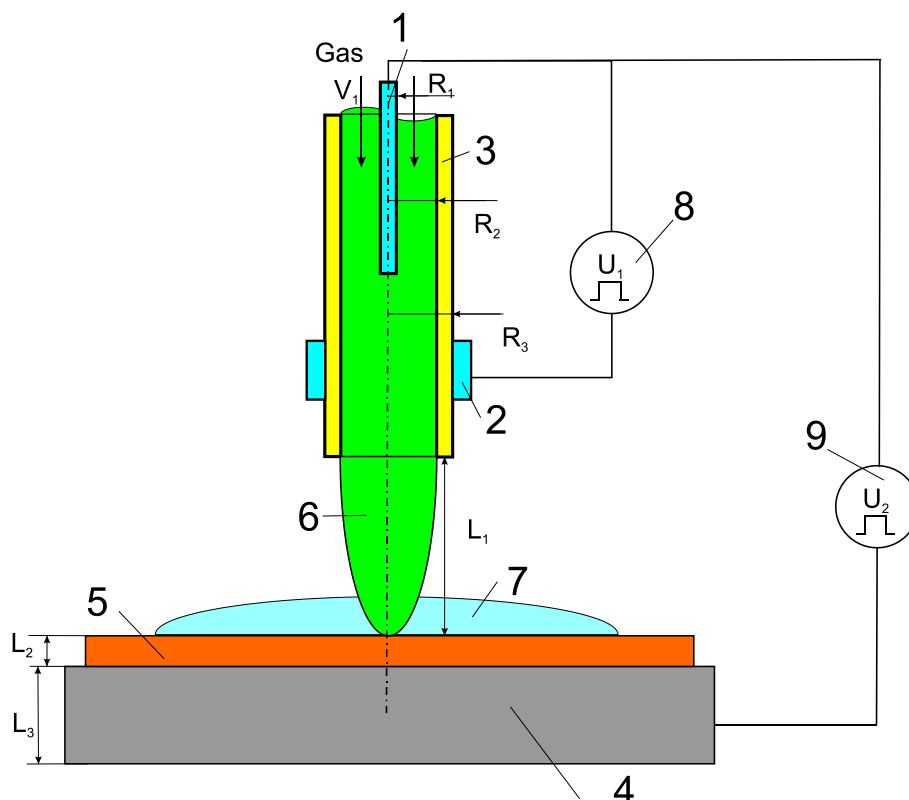


Рис. 4. Примерная схема установки.

Источник напряжения U_1 используется для создания плазмы, а источник U_2 – для ускорения частиц в слое пространственного заряда непосредственно перед подложкой. Поле, источника U_2 , ускоряющее ионы, распределено равномерно по всему пространству между срезом электродом и подложкой для малой плотности заряженных частиц (режим 1), или сосредоточено в слое пространственного заряда между плазмой и подложкой размером 3 – 10 радиусов Дебая при высоких плотностях электронов (режим 2).

5. Система уравнений, используемая для описания потока газа в микроплазме

Течение газа в условиях наших установок может протекать в различных режимах. При низких давлениях можем иметь молекулярные течения. При относительно высоких давлениях – и низких скоростях – ламинарные течения. И, наконец, при больших скоростях течения жидкости – турбулентные течения. Пакет программного Comsol Multiphysics позволяет рассчитывать все три вида течений. Рассмотрим сначала условия перехода от молекулярного течения к ламинарному. В предполагаемой к разработке установке существует два характерных размера – диаметр трубки (около 5 мм) и диаметр рабочей камеры (около 20 см). Длина свободного пробега атома в газе составляет $\lambda(\text{cm}) = (N\sigma)^{-1} = (3.56 \cdot 10^{16} \sigma P(\text{Торр}))^{-1}$. Для ориентировочного газодинамического сечения столкновения $\sigma = 10^{-16} \text{ см}^2$ получим, что молекулярное течение в трубке реализуется при давлениях ниже 0.5 Тор, а в камере – ниже 0.015 Тор. Таким образом, режим молекулярного течения в камере разрабатываемой установки реализовывать не предполагается.

Для описания течения нейтрального газа использовались непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

и уравнение Навье Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \Delta \mathbf{u} + (\mu - \nu) \nabla(\nabla \mathbf{u}), \quad (2)$$

Расчетная геометрия показана на рис. 6.1. На стенках трубки и подложке ставились условия прилипания

$$\mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

На входном сечении трубки задавалась скорость течения газа. Считалось, что течение вытекает через кольцевое отверстие в рабочей камере, расположенное вблизи боковой стенки. Нагрев газа под действием разряда и его влияние на течение в данной модели мы рассматривать не будем.

6. Система уравнений, описывающих развитие газового разряда в потоке газа

Система уравнений, используемых для описания газового разряда существенно зависит от того, существенен ли нагрев газа. Увеличение газовой температуры существенно увеличивает плотность возбужденных атомов, что влечет увеличение степени ионизации. Одновременно возрастает передача энергии от поля в тепло, что приводит к переходу разряда в равновесную форму. В этом случае разряд описывается уравнением баланса энергии (теплопроводности) [Рохлин], в котором плотность электронов рассчитывается из уравнения Саха,

$$\frac{n_e n_+}{N} = \left(2 \frac{g^+}{g^{(0)}} \right) \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_I}{kT} \right), \quad (4)$$

а потери связаны с излучением плазмы. Такие модели распространены при расчете источников света высокого давления. Поле в плазме рассчитывается с помощью уравнений Максвелла, либо из квазистационарных аналогов для поля низких частот. Распределение температуры в положительном столбе описывается уравнением теплопроводности

$$\begin{aligned} c_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) T + \nabla \lambda \nabla T = \\ = \frac{kT}{P} \left(\frac{P_0}{kT_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \frac{ne^2 E^2}{m(v_{en0}(1-\alpha) + v_{ei0}(T/T_0)\alpha)} - C \frac{P}{kT} \exp\left(-\frac{\varepsilon^*}{kT} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнении (5.4) нагрев газа обусловлен протеканием электрического тока, а охлаждение – излучением (для которого в данной задаче использовано модельное приближение Эленбааса, ε^* – эффективная энергия возбуждения), $\alpha = n_e/N$ – степень ионизации. Сомножитель kT/P в слагаемом, ответственном за нагрев, отражает факт уменьшения плотности нейтрального газа и следовательно частоты столкновений с ростом температуры. v_{en0} и v_{ei0} – частоты столкновений электронов с нейтралами и с ионами при плотностях частиц, равных плотности нейтралов при $P=P_0$ и $T=T_0$. При расчете частоты столкновений с нейтралами предполагается, что длина свободного пробега электронов постоянна, т.е. частота столкновений пропорциональна скорости электронов и обратно пропорциональна давлению нейтралов. Подставляя выражение для плотности электронов в уравнение (6.3) получим

итоговое уравнение, описывающее свойства разряда

$$c_p \frac{\partial T}{\partial T} + (\mathbf{u} \nabla) T + \nabla \lambda \nabla T =$$

$$= \left(2 \frac{g^+ kT}{g^{(0)} P} \right)^{1/2} \left(\frac{P_0}{kT_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/2} \left(\frac{2\pi m kT}{h^2} \right)^{3/4} \exp\left(-\frac{\varepsilon_i}{2kT}\right) \frac{e^2 E^2}{m(v_{en0}(1-\alpha) + v_{ei0}\alpha)} -$$

$$- C \frac{P}{kT} \exp\left(-\frac{\varepsilon^*}{kT}\right) \quad (6)$$

Уравнение (6.3) определяет зависимость температуры в положительном столбе разряда высокого давления от радиуса и называется уравнением Эленбааса. Это уравнение дополняется граничными условиями на разрядной трубке и стенках разрядной камеры, которые имеют вид равенства температур газа и температуры стенки.

В то же время при реализации современных источников микроплазмы стараются избежать нагрева газа, в этом случае ионизация идет за счет электронных ударов. Плотность электронов в простейшей модели удовлетворяет уравнению амбиполярной диффузии.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) n - \nabla D_a \nabla n = \nu_i(T_e) n. \quad (7)$$

Граничное условие для уравнения баланса частиц (3.1) Шоттки предложил записать в виде

$$n = 0. \quad (8)$$

Поскольку частота ионизации электронов зависит от температуры электронов, данное уравнение должно быть дополнено уравнением баланса энергии электронов

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \nu(\varepsilon) \left(\frac{e^2 E^2}{m v^2(\varepsilon)} - \frac{2m}{M} \left(\varepsilon - \frac{3}{2} kT \right) \right), \quad (9)$$

где ε – энергия заряженных частиц, T – температура нейтралов. Обычно время установления электронной температуры много меньше времени ионизации, поэтому можно считать температуру квазистационарной, мгновенно следующей за амплитудой электрического поля. В этом случае из (9) следует

$$\varepsilon = \frac{3}{2} kT + \frac{e^2 E^2}{m v^2(\varepsilon) (2m/M)}. \quad (10)$$

Типичная плотность плазмы в рассматриваемом типе разряда $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Частота столкновений электрон нейтрал $\nu/\omega = 0.3$. Диэлектрическая проницаемость плазмы рассчитывалась по формуле Друде

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m\omega(\omega + iv)}.$$

7. Расчет характеристик разряда с помощью пакета Комсол.

Параметры плазмы и высокочастотного поля были рассчитаны с помощью программы Комсол. Примеры расчетов приведены на рисунках ниже. Расчет проводился в цилиндрической разрядной камере, изображенной на рис. 5. Рабочий газ при давлении 10 Тор напускался через диэлектрическую трубку, вставленную в отверстие в верхней части камеры. Откачка газа проводилась через прорезь в нижнем цилиндрическом фланце камеры. На верхнем сечении трубка задавалась скоростью течения газа, на нижнем сечении – давление

газа в камере. В качестве рабочего газа использовался аргон. Пример расчета течения газа приведен на рис. 6. Газовая струя проходила между центральным электродом и границей диэлектрической трубки, обтекала электрод, далее двигалась по сечению трубки и вытекала в разрядную камеру. Решались уравнение непрерывности и уравнение Навье-Стокса. В силу малого трения струя распространялась (с небольшим расширением) вдоль оси и упиралась в нижнюю стенку вакуумной камеры (подложкодержатель), а затем растекалась вдоль этой стенки и вытекала через выходное отверстие. Влияние нагрева газа на его течение не учитывалось. В силу малости скорости течения газа изменение давления в рабочей камере очень мало (рис. 6 справа) – практически во всей камере давление равно внешнему давлению. Гидродинамические и термодинамические константы для аргона брались из внутренней базы COMSOL Multiphysics®.

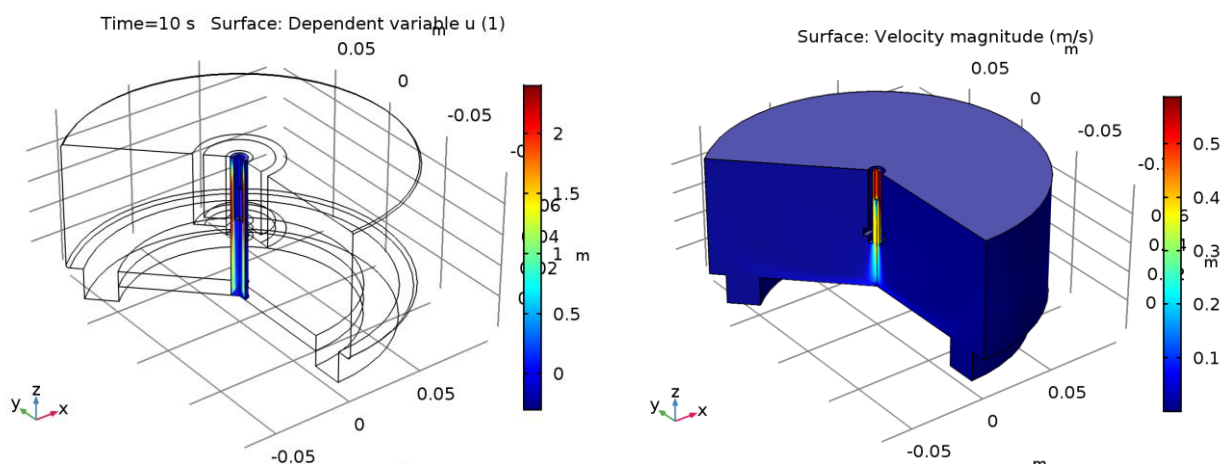


Рис. 5. Расчетная геометрия создания плазмы

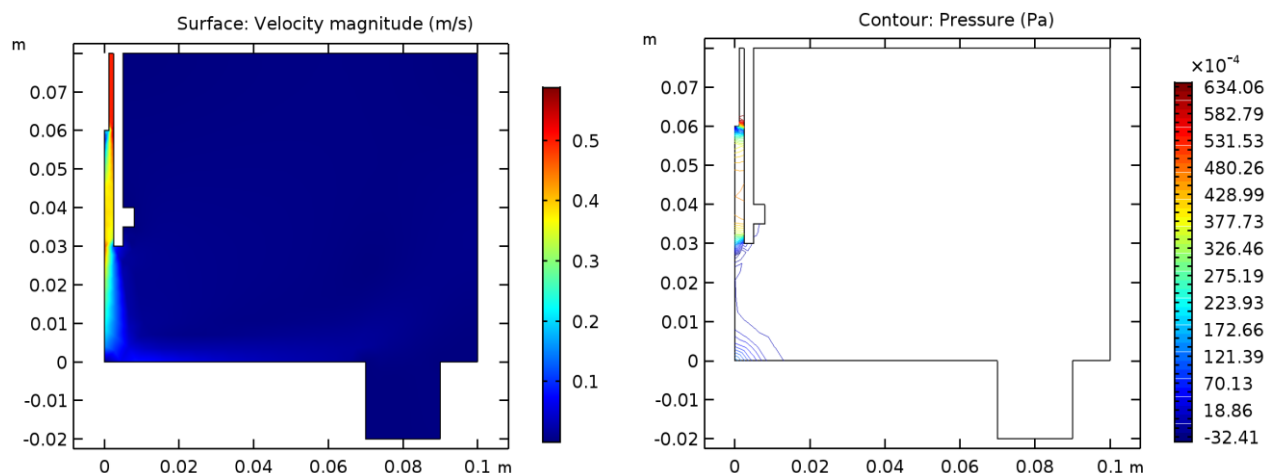


Рис. 6. Пример расчета течения в плазме.

Распределение плотности электронов в плазме и электрического поля определялось совместным решением уравнения амбиполярной диффузии и уравнений Максвелла (которые в данном случае заменялись уравнением Пуассона). На металлических стенках ставились условия равенства нулю тангенциальной компоненты электрического поля. Аналогичное условие ставилось на откачном отверстии. Хотя в реальной установке это условие не выполняется, в силу малости полей в этой области вносимая ошибка незначительна. На

входном отверстии считалась заданной амплитуда магнитного поля. В соответствии с интегральным уравнением Максвелла $2\pi r H_\phi = 4\pi I/c$, где I – полный ток, протекающий в разряде (включающий ток смещения и ток проводимости), магнитное поле считалось обратно пропорциональным радиусу. Частота поля считалась равной 135.6 МГц. Частота ионизации считалась локальной функцией напряженности электрического поля. Частоты ионизации, энергетические потери ионизации рассчитывались в соответствии с сечениями процессов, приведенными в [13].

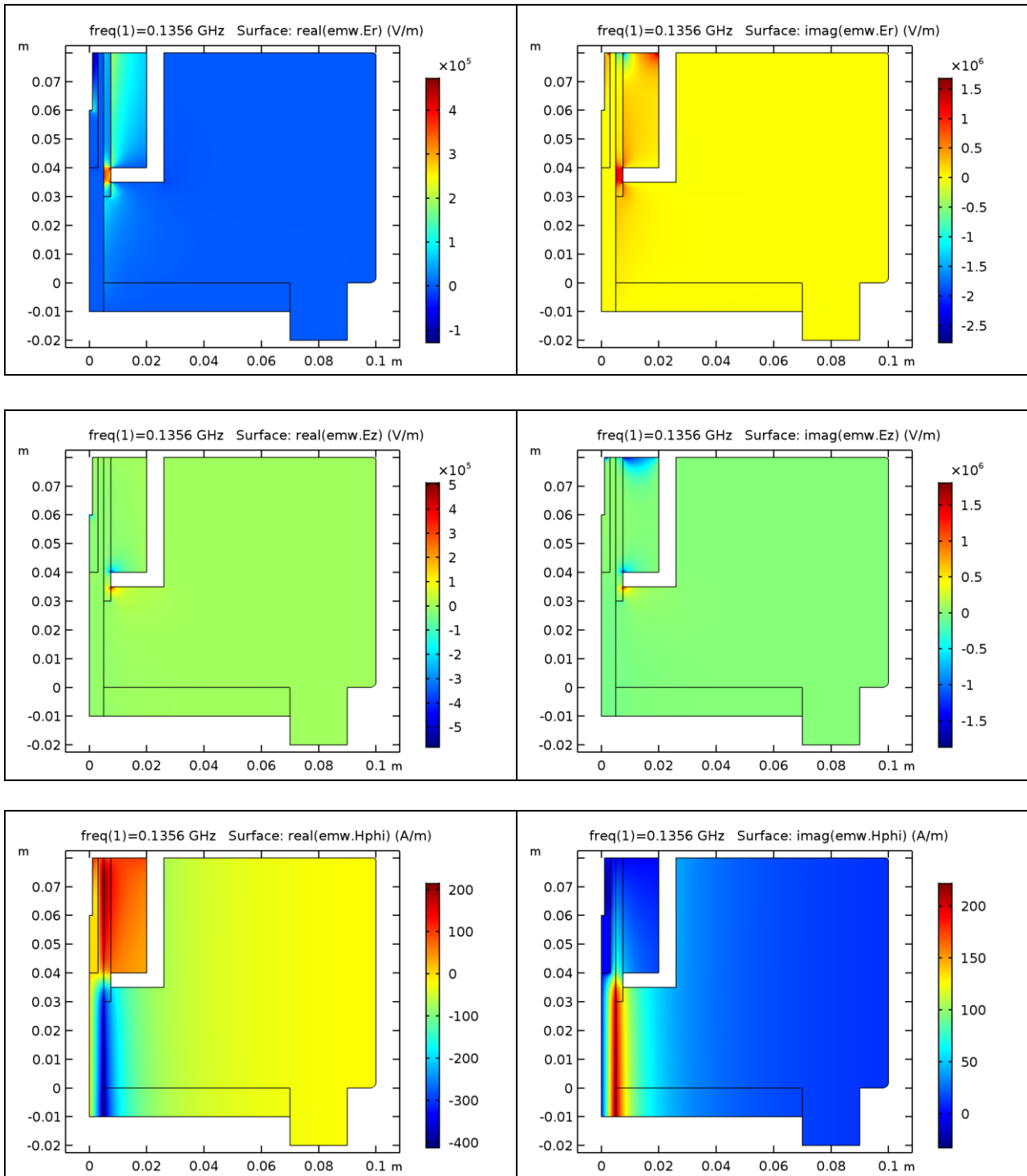


Рис. 7. Пример распределение электромагнитного поля в плазме

Электрическое поле подводилось к центральному электроду и вакуумной камере (земляной электрод). Практически в используемой геометрии возбуждалось осевое электрическое поле, создающее электрический высокочастотный ток, протекающий вдоль разрядной трубки. Радиальное электрическое поле имеет значительную амплитуду у ребер электродов (рис. 7). В силу того, что усиление электрического поля у ребер очень велико, реальное распределение электромагнитного поля в разряде проще наблюдать на картинках магнитного поля. Из расчета следует, что распределение поля вдоль струи практически равномерно, а его значение вне и внутри трубки различны.

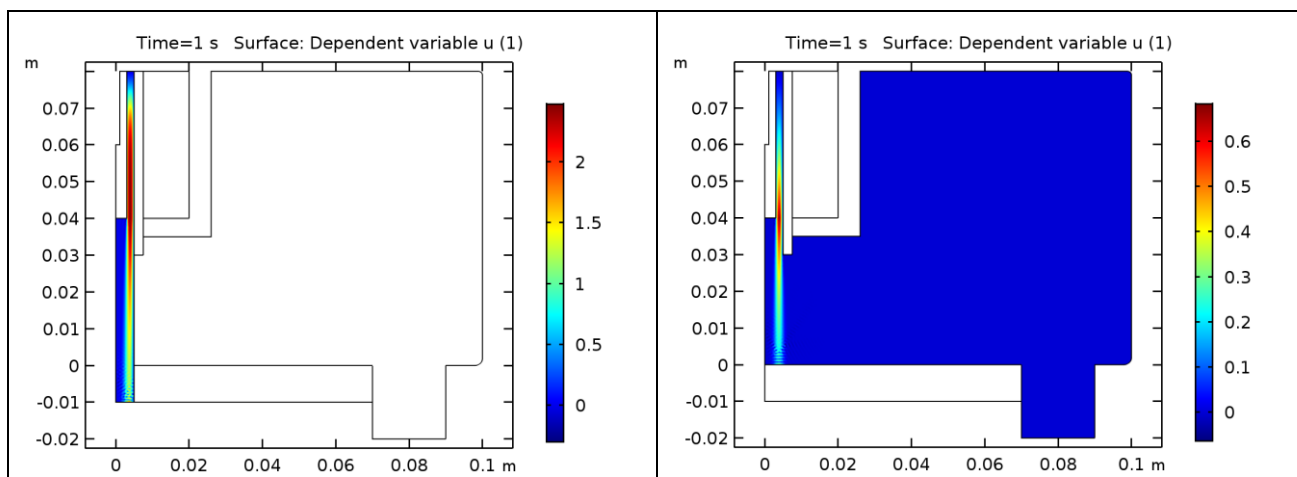


Рис. 8. Пример расчета распределения плотности плазмы в относительных единицах.

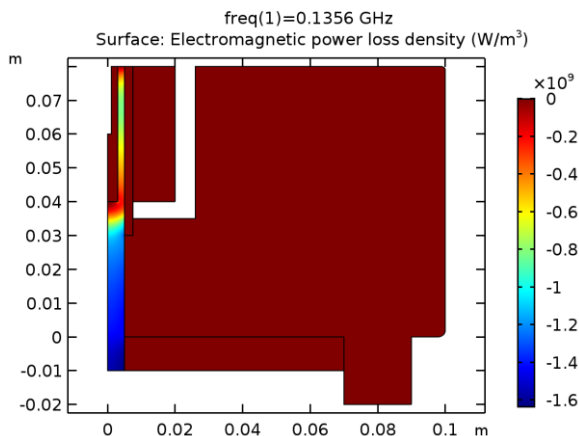


Рис. 9 Пример распределения вложения энергии электромагнитным полем в разряд

Уравнения для электрического поля резались совместно с уравнением амбиполярной диффузии (7). На всех границах ставились нулевые граничные условия, предполагающие рекомбинацию ионов и электронов на стенках. Решалась нестационарная задача, в начальный момент плотность электронов в трубке считалась постоянной, а вне трубки – равной нулю. Пример расчета плотности электронов в плазме, который устанавливается через 1 сек приведен на рис. 8. На рисунке слева плазма выносится струей через отверстие в подложкодержателе, а справа струя упирается в подложкодержатель. В начальном сечении трубки плотность электронов равна нулю, а затем происходит резкий рост плотности

электронов в сильном электрическом поле. Вплоть до внешнего электрода плотность остается постоянной, а затем медленно уменьшается вследствие рекомбинации. Разлет плазмы в поперечном направлении незначителен вследствие малой величины коэффициента диффузии.

Расчет плотности энергии, вкладываемой в плазму (рис. 9, приведены потери энергии электрического поля), показал, что основная энергия вносится в плазму после второго электрода.

Выводы

1. Микроплазма, создаваемая при атмосферном давлении является очень интересным объектом как с точки зрения своих физических свойств, так и с точки зрения физических приложений.
2. В зависимости от вкладываемой мощности плазма может быть как изотермической, так и неравновесной.
3. Для технологического применения может быть использована как импульсная, так и непрерывно создаваемая плазма.
4. Существует режим плазмы, когда при периодическом питании наблюдается режим плазменных шаров (плазменных пуль), генерируемых в определенные фазы поля. Практически эти шары представляют собой генерируемые в разряде волны ионизации различной природы.
5. Наиболее выгодным с точки зрения управления параметрами плазмы может быть ее поддержание с помощью двух источников, одного создающего плазму в потоке, и второго, ускоряющую плазму по направлению к подложке.
6. Неравновесная плазма, создаваемая высокочастотным полем, может быть описана с помощью уравнений баланса энергии электронов, уравнения амбиполярной диффузии и уравнений Максвелла. Для описания течения плазмы используются уравнения Навье-Стокса.
7. Проведен предварительный расчет параметров плазмы, генерируемой в потоке инертного газа.

Список литературы

1. Samukawa S., Hori M., Raul S. et al. // The 2012 plasma Roadmap. J. phys. D.: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 253001.
2. Adamovich I., Baalrud S.D., Bogaerts A., Bruggeman P.J. et al. // The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. P. 323001 (46pp)
- 3 Tachibana K 2006 *IEEJ Trans.* **1** 145
- 4 Becker K H, Schoenbach K H and Eden J G 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** R55
- 5 IzaF, KimGJ, LeeSM, LeeJK, WalshJL, ZhangYT and Kong M G 2008 *Plasma Process. Polym.* **5** 322
- 6 Sakai O and Tachibana K 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 013001
- 7 Naidis G V 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 215203
- 8 Mariotti D and Sankaran R M 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 323001
- 9 Sladek R E J and Stoffels E 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 1716

- 10 Kong M G, Kroesen G, Morfill G, Nosenko, Shimizu T, van Dijk J and Zimmermann L J 2009 *New J. Phys.* **11** 115012
- 11 Eden J G, Park S-J, Herring C M and Bulson J M 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 224011
- 12 Lucas N, Ermel V, Kurrat M and Buttgenbach S 2008 *J. Phys D: Appl. Phys.* **41** 215202
13. Довженко В.А. Кандидатская диссертация. М. МГУ., 1974.