

2000-63

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

на правах рукописи

КАЙРЫЕВ Нурланбек Жуганович

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА**

01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек-2000

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

на правах рукописи

КАЙРЫЕВ Нурланбек Жуганович

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА**

01.04.14 -Теплофизика и молекулярная физика

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Бишкек-2000

Работа выполнена на кафедре физики Кыргызско-Российского Славянского Университета

Научные руководители: д. ф.-м. н., профессор Лелевкин В. М.
д. ф.-м. н. Кулумбаев Э. Б.

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н., профессор Энгельшт В. С.
д. ф.-м. н., профессор Шаршекеев О.Ш.

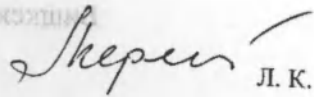
Ведущая организация: Институт информатики и информационных технологий Министерства образования, науки и культуры Кыргызской Республики

Защита состоится " 30 " июня 2000 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета Д 01.97.65 в Институте физики Национальной академии наук Кыргызской Республики по адресу:
720071, г. Бишкек, проспект Чуй, 265-а.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке НАН Кыргызской республики

Автореферат разослан " 29 " мая 2000 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
к. ф.-м. н.


Л. К. Меренкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию теплофизических процессов в волноводном сверхвысокочастотном (СВЧ) разряде на волне типа H_{10} и радиального типа.

Актуальность работы обусловлена потребностью фундаментальных исследований взаимодействия электромагнитных волн с низкотемпературной плазмой и применением СВЧ-разряда в науке и технике. Поэтому большой интерес представляет определение зависимости характеристик СВЧ-разряда от внешних регулируемых параметров и прогнозирование оптимального режима горения. Наряду с экспериментом решение таких задач возможно методом математического моделирования процессов, протекающих в СВЧ-разряде.

Основы теоретического исследования СВЧ-разрядов были заложены Ю.П.Райзером, Б.Э.Мейеровичем, Г.В.Лысовым, В.М.Батениным. Разработаны приближенные методы расчета характеристик СВЧ-разряда на основе эквивалентных схем (В.М.Батенин, Г.В.Лысов, И.И.Девяткин), канальной модели (Ю.П.Райзер, А.А.Бобров, В.М.Лелевкин). Создана квазидвумерная модель стационарного СВЧ-разряда радиального типа (В.М.Лелевкин, П.В.Козлов). В стадии развития находится моделирование СВЧ-разрядов на волне типа H_{10} и нестационарных разрядов радиального типа: отсутствуют двумерные и нестационарные модели на основе равновесного и неравновесного приближений плазмы.

Цель работы: разработать нестационарную двумерную модель СВЧ-разряда на волне типа H_{10} и одномерную модель СВЧ-разряда радиального типа в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы; установить численными расчетами зависимости характеристик плазмы СВЧ-разряда на волне типа H_{10} от внешних регулируемых параметров и при распространении разряда навстречу падающей волне; исследовать характер временной зависимости характеристик СВЧ-разряда радиального типа от закона изменения подводимой к разряду мощности.

Научная новизна. Впервые предложена двумерная модель нестационарного СВЧ-разряда на волне типа H_{10} . Проведены расчеты характеристик разряда в статическом и импульсном режимах и при распространении разряда навстречу падающей волне. Получено, что по сравнению с односторонним при двухстороннем симметричном подводе электромагнитной волны или использовании короткозамыкающего поршня коэффициент поглощения увеличивается, а значение пороговой мощности уменьшается; оптимальное поглощение мощности электро-

магнитной волны в СВЧ-разряде происходит вблизи переходного режима.

Впервые предложена одномерная модель нестационарного СВЧ-разряда радиального типа в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы. Проведен численный расчет характеристик плазмы при изменении подводимой к разряду мощности по заданному временному закону. Получено, что временные зависимости характеристик разряда обладают свойством гистерезиса при увеличении и уменьшении подводимой к разряду мощности.

Практическая ценность работы: разработаны нестационарные модели СВЧ-разряда на волне типа H_{10} и радиального типа в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы для исследования протекающих теплофизических процессов. Данные результаты могут быть использованы при исследовании взаимодействия электромагнитных волн с газоразрядной плазмой, оптимизации режимов горения СВЧ-разрядов в плазмохимии; при составлении специальных учебных курсов.

На защиту выносятся:

1. Двумерная модель нестационарного СВЧ-разряда на волне типа H_{10} в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы.
2. Установленные численными расчетами зависимости характеристик СВЧ-разряда на волне типа H_{10} : а) от способа подвода (односторонний, двухсторонний симметричный, с короткозамыкающим поршнем) и величины мощности электромагнитной волны, размера разрядной трубки и рода газа; б) от величины СВЧ-импульса и давления; в) при распространении разряда навстречу падающей волне.
3. Одномерная модель нестационарного СВЧ-разряда радиального типа в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы.
4. Временные зависимости характеристик СВЧ-разряда радиального типа от величины и закона изменения мощности подводимой электромагнитной волны, рода и давления плазмообразующего газа.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: V Европейской конференции по Термическим Плазменным Процессам (Санкт-Петербург, 1998г.), IV Международном WORKSHOP "Strong Microwaves in Plasmas" (Нижний Новгород, 1999г.), Международной научно-технической конференции, посвященной 5-летию образования КРСУ (Бишкек, 1998г.), Международной научной конференции, посвященной 5-летию КГ-МИ им. У.Асаналиева (Бишкек, 1998г.), II-IV научных конференциях КРСУ, научных семинарах кафедры физики КРСУ.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах.

Структура и объем диссертации: Работа состоит из введения, трех глав, выводов, заключения и содержит 136 страниц машинописного текста, 60 рисунков, 5 таблиц и 81 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность, сделан краткий обзор теоретических исследований СВЧ-разрядов, сформулированы цель и задачи диссертации, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов, указаны публикации и структура диссертации.

В первой главе дается описание математической модели волнового СВЧ-разряда в статическом режиме, горящего за счет диссипации мощности подводимой электромагнитной волны, которая частично отражается от разряда и проходит через него. Предполагается, что изменение характеристик разряда по направлению вектора напряженности электрического поля незначительно.

В рамках *равновесного приближения* плазмы предполагается, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР) и ее свойства однозначно определяются температурой, давлением и химическим составом газа. Одинаковая для всех частиц температура определяется из уравнения баланса энергии:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\nabla}(\lambda \cdot \bar{\nabla} T) + Q_E - \phi_e. \quad (1.1)$$

Коэффициенты плазмы в зависимости от температуры и давления задаются по литературным источникам или определяются по формулам кинетической теории (Л.С.Полак, Дж.Гиршфельдер, Е.Мейсон, Л.В.Гурвич и др.).

Двухтемпературная модель плазмы предполагает, что состояние ЛТР устанавливается отдельно в электронном газе и в газе тяжелых частиц (атомы, ионы) с температурами T_e и $T \equiv T_i \approx T_a$. Скорость генерации электронов \dot{n}_e определяется однократной ударной ионизацией и трехчастичной рекомбинацией. Уравнения балансов энергий для электронов и тяжелых частиц и уравнение непрерывности для электронов имеют вид (М.Митчнер, У.Кругер, К.В.Брушлинский):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[n_e \left(\frac{3}{2} k n_e T_e + U_i \right) \right] + \bar{\nabla} \left[n_e \bar{V}_e \left(\frac{5}{2} k T_e + U_i \right) \right] = Q_e + \bar{\nabla}(\lambda \cdot \bar{\nabla} T_e) - B_{30}(T_e - T) - \phi_e,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{3}{2} (n_i + n_a) kT \right] = \bar{\nabla} (\lambda \bar{\nabla} T) + B_{\omega} (T_e - T), \quad \frac{\partial n_e}{\partial t} + \bar{\nabla} (n_e \bar{V}_e) = n_e. \quad (1.2)$$

Система дополняется уравнением состояния, законом Дальтона, условием квазинейтральности. Коэффициенты плазмы задаются функциями T_e , T , давления и концентраций частиц соотношениями элементарной кинетической теории (Р.С.Девото, Г.И.Козлов, В.Л.Гинзбург и др).

Уравнения (1.1-1.2) дополняются начальными и граничными условиями:

$$t = 0: \quad \Phi = \Phi_0(\bar{r}), \quad \Phi = \{T, T_e, n_e\};$$

$$r = R: \quad T = T_R,$$

$$-\left(\lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right)_R = kT_{eR} \left[\ln \left(\frac{T_{eR} m_a}{T_R m_e} \right) - 1 \right] n_e \bar{V}_{eR}, \quad -D_A \frac{\partial n_e}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{n_{eR} \bar{V}_R}{4},$$

температура тяжелых частиц равна температуре стенок, а температура и концентрация электронов определяются по модели бесстолкновительного электростатического экранирующего слоя (Ф.П.Инкропера).

Электродинамическая модель СВЧ-разряда основана на уравнениях Максвелла, которые для гармонического электромагнитного поля

$$\bar{E}(\bar{r}, t) = \bar{E}(\bar{r}) \exp(i\omega t), \quad \bar{B}(\bar{r}, t) = \bar{B}(\bar{r}) \exp(i\omega t)$$

сводятся к волновому уравнению:

$$\nabla^2 \bar{E} - \bar{\nabla} (\bar{\nabla} \bar{E}) + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_k \bar{E} = 0. \quad (1.3)$$

По электромагнитным характеристикам определяется удельная диссипируемая в плазме мощность $Q_E = \langle \bar{j} \bar{E} \rangle$.

Метод решения. Численное решение уравнений (1.1-1.3) проводится в конечных разностях с дискретизацией по методу контрольного объема. Система линейных алгебраических уравнений для внутренних узловых точек расчетной области замыкается разностными аналогами граничных условий и решается методом Гаусса-Зейделя или прогонки. Для достижения устойчивости счета используется метод нижней релаксации. Итерационное вычисление значений искоемых функций ведется до тех пор, пока максимальное относительное изменение в итерациях не превышает заданной точности ($10^{-3} \div 10^{-6}$).

Во второй главе описывается двумерная модель СВЧ-разряда, горящего в цилиндрической трубке, встроенной перпендикулярно широким стенкам прямоугольного волновода сечения $a \times b$ с электромагнитной волной типа H_{10} :

$$\bar{E} = (0; E_y = E; 0) \cdot \exp(i\omega t - ikz), \quad \bar{B} = (B_x; 0; B_z) \cdot \exp(i\omega t - ikz),$$

где $\bar{k} = \sqrt{(\omega/c)^2 - (\pi/a)^2}$ - продольное волновое число.

Характеристики разряда описываются уравнениями (1.1-1.3) в плоскости (x, z) декартовой системы координат. Для определения напряженности электрического поля на границах расчетной области задаются условия:

$$z = -L: \quad E(z, x) = [E_{11} \exp(-ikz) + E_R \exp(ikz)] \sin(\pi x/a),$$

$$z = L: \quad E(z, x) = [E_{12} \exp(ikz) + E_T \exp(-ikz)] \sin(\pi x/a),$$

вдали от плазмы ($z = \pm L, L \gg R$) электромагнитная волна представляет собой суперпозицию падающих волн с амплитудами E_{11} , E_{12} и волн, идущих от плазмы за счет отражения и пропуска (E_R, E_T), которые соответствуют решению уравнения (1.3) в волноводе без плазмы ($\sigma = 0, \epsilon_k = 1$);

$$x = 0: \quad E = 0 \text{ (идеально проводящих стенок);}$$

$$x = a/2: \quad \partial E / \partial x = 0 \text{ (симметрии).}$$

Для разряда с двухсторонним симметричным подводом СВЧ-мощности расчетная область по z ограничивается условием симметрии:

$$-L \leq z \leq 0; \quad z = 0: \quad \partial E / \partial z = 0;$$

а для разряда с короткозамыкающим поршнем - условием отражения:

$$-L \leq z \leq d, \quad z = d: \quad E = 0,$$

где d - расстояние от оси трубы до короткозамыкающего поршня.

Мощности волн определяются амплитудами E_{11} , E_{12} , E_R , E_T , которые находятся из условия непрерывности $E(z, x)$, $\partial E / \partial z$ при $z = \pm L$. В качестве внешних параметров задаются мощности W_{11} и W_{12} падающих волн или диссипируемая в плазме мощность W_D .

Исследуется **равновесный СВЧ-разряд** на волне типа H_{10} в азоте при атмосферном давлении по данным эксперимента В.М. Батенина и др.: $\omega/2\pi = 2,4$ ГГц, $R = 8$ мм; размеры волновода 72×34 и 90×16 мм.

При **одностороннем подводе волны** из-за взаимодействия плазмы с электромагнитным полем изолинии $|\bar{E}|$ сгущаются на переднем фронте

разряда (рис.1). Область диссипации энергии электромагнитного поля является "стоковой" для вектора Умова-Пойнтинга, который направлен вовнутрь плазменного образования, образуя вдоль оси z две особенности типа: узел, седло. Область скинирования кольцеобразная с ярко выраженным эффектом со стороны падающей волны. За седловой точкой вектор плотности потока электромагнитной энергии становится соле-

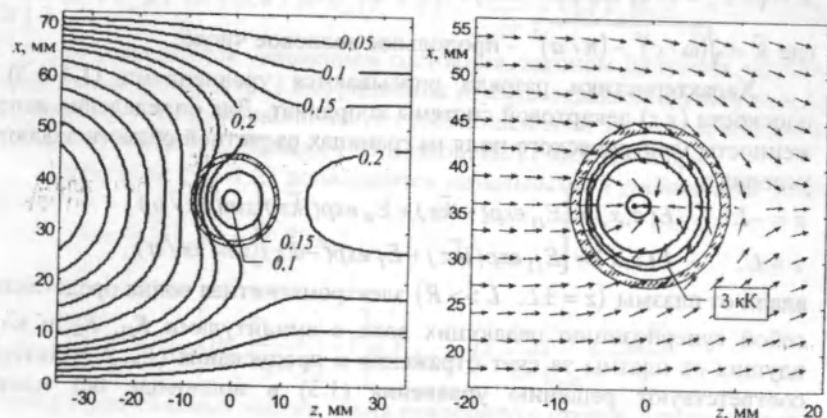


Рис. 1. Поля напряженности электрического поля $E(x,z)/E_{\max}$ ($E_{\max} = 0,63 \text{ кВ/см}$), направленный вектора Умова-Пойнтинга и температуры (с шагом 1 кК) в СВЧ разряде с односторонним подводом мощности ($W_I = 1,5 \text{ кВт}$). Заштрихованное кольцо – стенки диэлектрической трубки.

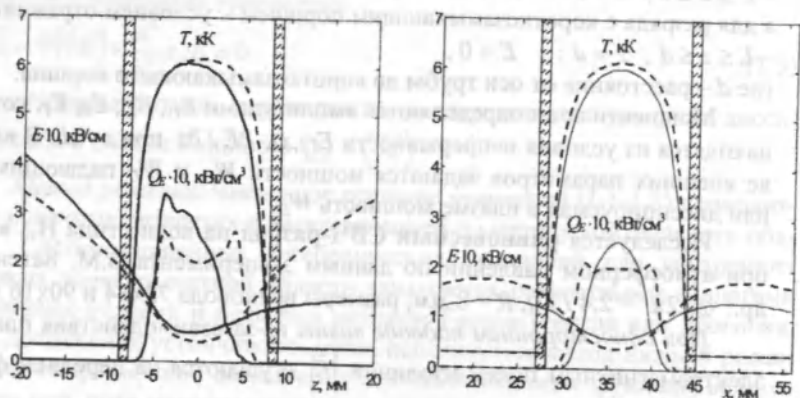


Рис. 2. Распределения напряженности электрического поля, температуры и удельной диссипируемой мощности в СВЧ разряде с односторонним (сплошные линии) и двухсторонним симметричным (пунктирные) подводом электромагнитной волны ($W_I = 1,5 \text{ кВт}$). Штриховые линии – стенки диэлектрической трубки.

ноидальным и напряженность электрического поля повышается. Диссипация мощности электромагнитного поля ($W_D = 0,46 \text{ кВт}$) приводит к интенсивному нагреву плазмы на переднем фронте разряда. Реализуется асимметричное распределение поля изотерм ($T_{\max} = 6046 \text{ К}$), смещенных навстречу падающей волне (рис.1-2). Часть энергии электромагнитного поля отражается плазмой обратно ($W_R = 0,89 \text{ кВт}$), другая проходит через плазму ($W_T = 0,15 \text{ кВт}$).

Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными ИВТ РАН (Л.М.Балтин, В.М.Батенин, И.И.Девяткин и др.): $T_{\max} = (6200 \pm 300) \text{ К}$; $W_R \approx W_T \approx 0,38 \text{ кВт}$; пороговая мощность $0,6 \text{ кВт}$. На рис.3 приведены зависимость осевой температуры от плотности потока поглощенной разрядом энергии (S_I) и распределение температуры при $S_I = 85 \text{ Вт/см}^2$. Отличия объясняются трансформацией падающей на плазму волны в волну коаксиального типа, "ограниченной" разрядом и металлическими трубками, экранирующими плазму вне волновода, а также наличием тангенциальной закрутки газа в канале.

Наблюдаются три режима горения СВЧ разряда (рис.4): устойчивый (А), переходной (В) и неустойчивый (С). Устойчивый режим характеризуется относительно высокими значениями температуры, диссипируемой и отраженной мощностями электромагнитного поля и меньшими значениями напряженности электрического поля и прошедшей мощности. Размеры скин-слоя намного меньше размера разряда. В переходном режиме максимальна диссипация энергии электромагнитной волны и минимально отражение. Наблюдается "слабое" скинирование электромагнитного поля. В неустойчивом режиме наблюдаются большие значения E и меньшие T по сравнению с другими режимами; изотермы круговые с максимумом температуры на оси канала.

При двухстороннем симметричном подводе волны (рис.2) реализуется симметричная картина электрического поля и вектора Умова-Пойнтинга с одной "узловой" точкой. Изотермы практически круговые с максимумом ($T_{\max} = 6136 \text{ К}$) на оси канала; изолинии напряженности электрического поля в разряде "эллипсоидальны" вдоль оси x . При подводимой мощности электромагнитного поля $1,5 \text{ кВт}$ диссипирует $0,65 \text{ кВт}$, отражается $0,85 \text{ кВт}$. По сравнению с односторонним подводом значение пороговой мощности ($0,23 \text{ кВт}$) уменьшается, максимум температуры (5645 К) и коэффициент поглощения ($W_D/W_I \approx 1$) в переходном режиме увеличиваются (рис.4).

При одностороннем подводе электромагнитной волны увеличение радиуса разрядной трубки ($R = 16 \text{ мм}$) приводит к росту асимметрии

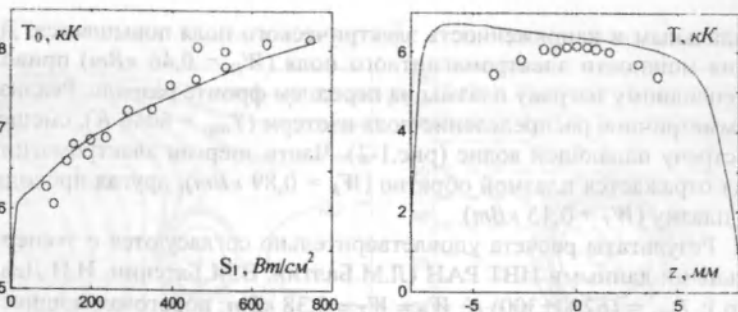


Рис.3. Зависимость осевой температуры от плотности потока поглощенной разрядом энергии и распределение температуры при $S_1=85 \text{ Bm/cm}^2$ в разряде с односторонним подводом мощности (кружки — эксперимент В.М.Батенина и др.). Размеры волновода $90 \times 16 \text{ мм}$.

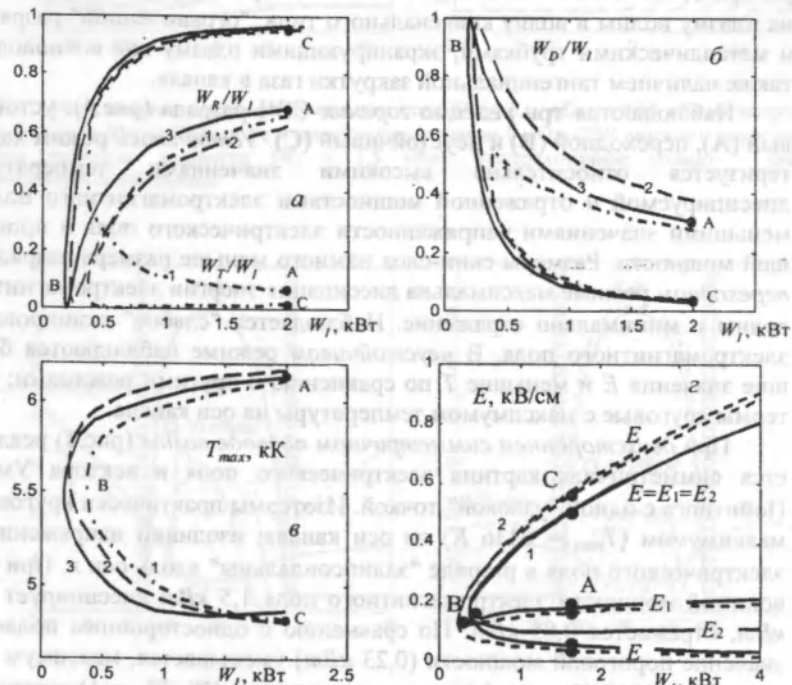


Рис.4. Коэффициенты отражения и пропускания (а), поглощения (б) мощности, максимальная температура (в) и напряженность электрического поля (г) в СВЧ-разряде с односторонним (1) и двухсторонним симметричным (2) подводами электромагнитной волны и при использовании короткозамыкающего поршня (3). E — экстремальное значение напряженности электрического поля внутри разряда; $E_1 = E(a/2, -R)$, $E_2 = E(a/2, R)$.

температуры и отраженной мощности; уменьшению диссипируемой в разряде и прошедшей мощностей, максимальной температуры и напряженности электрического поля. При двухстороннем подводе изотермы имеют вид вытянутых вдоль оси z эллипсов с двумя смещенными к стенкам канала максимумами на оси симметрии, а изменение других характеристик, как и при одностороннем подводе мощности.

Влияние рода газа. В аргоне заметно уменьшается значение пороговой мощности ($\sim 75 \text{ Вт}$) по сравнению с разрядом в азоте. В углекислом газе средний радиус кольцевой зоны джоулева энерговыделения уменьшается и наблюдается контрагирование разряда. Вблизи переходного режима максимальная температура разряда в аргоне и углекислом газе увеличивается с уменьшением W_1 , что качественно отличается от характеристик разряда в воздухе и азоте (см. рис.4).

В СВЧ-разряде с короткозамыкающим поршнем, расположенным за разрядной трубкой ($d = \lambda/8 \div \lambda/2$, $\lambda = 2\pi/\bar{k}$), повышается коэффициент поглощения, уменьшается пороговая мощность ($\sim 0,18 \text{ кВт}$) по сравнению с односторонним подводом электромагнитной волны (рис.4). Вблизи переходного режима, где толщина скин-слоя соизмерима с радиусом разряда, коэффициент поглощения становится близким к единице, что совпадает с результатами В.М.Батенина и др. Наибольшее эффективное поглощение СВЧ-мощности наблюдается при $d = 3\lambda/8$.

Расчеты характеристик *двухтемпературного СВЧ-разряда* в аргоне атмосферного давления показывают (рис.5-6), что температура электронов превышает температуру тяжелых частиц по всему сечению разрядной трубки. При *одностороннем подводе* интенсивное поглощение СВЧ-мощности в плазме происходит на переднем фронте. Реализуется кольцеобразная область горячих электронов с ярко выраженным эффектом со стороны падающей волны. Отрыв электронной температуры от газовой максимален на переднем фронте и минимален — в приосевых областях. Распределение температуры тяжелых частиц и концентрации электронов асимметричное и смещено навстречу падающей волне. При *двухстороннем симметричном подводе* электромагнитной волны T и n_e максимальны на оси, а температура электронов — на периферии. Распределение концентрации электронов, полученное на основе *ионизационно-равновесной модели* плазмы ($\dot{n}_e = 0$), имеет минимум в приосевой области. Рассчитанное распределение n_e в разряде с *короткозамыкающим поршнем* качественно соответствует данным эксперимента Л.М.Балтина

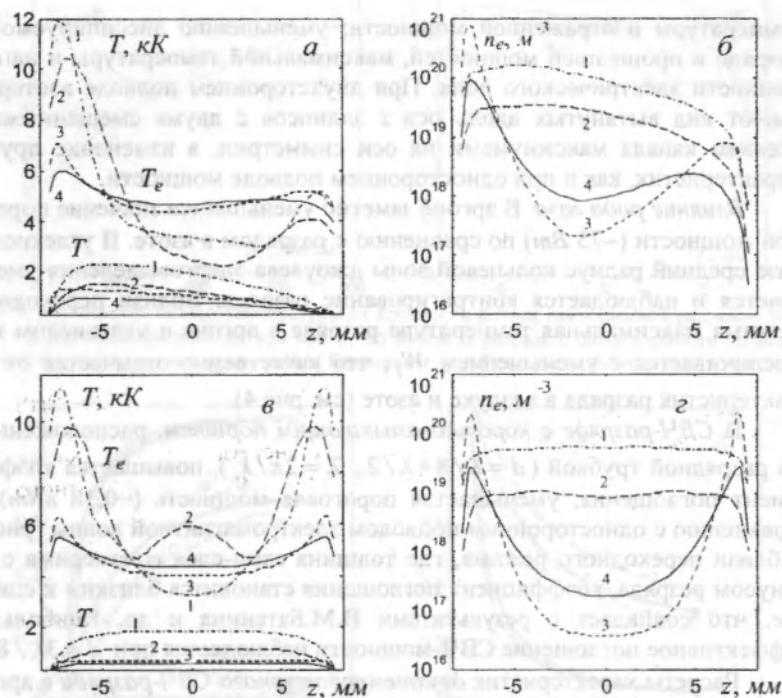


Рис.5. Распределения температур T , T_e и концентрации электронов в разряде с односторонним (а, б) и двухсторонним симметричным подводом (в, г) мощности $W_1 = 2 \text{ кВт}$: 1 и 3 ($\dot{n}_e = 0$); $W_1 = 0.2 \text{ кВт}$: 2 и 4 ($\dot{n}_e = 0$).

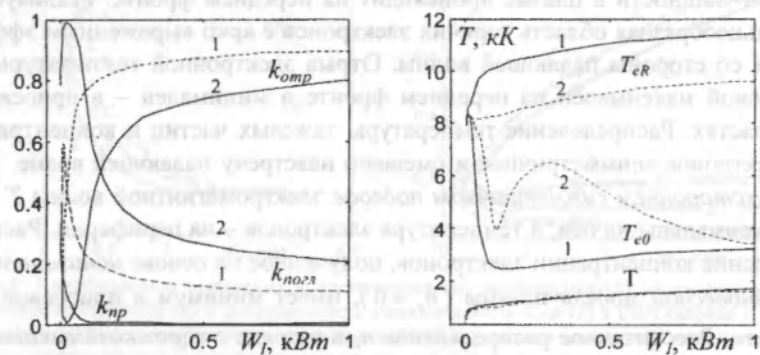


Рис.6. Зависимости характеристик разряда от падающей мощности при одностороннем (1) и двухстороннем симметричном подводе (2).

и др.

Нестационарный СВЧ-разряд на волне типа H_{10} .

Характеристики импульсного СВЧ-разряда (экспериментальные данные Ф.Б.Вурзеля, Г.В.Лысова, Л.С.Полака и др.: $\omega/2\pi = 3 \text{ ГГц}$, $R = 5 \text{ мм}$; размеры волновода $72 \times 34 \text{ мм}$, газ – азот, $p = 4$; 12 кПа , мощность $W_{\text{свч}} = 400 \div 1000 \text{ кВт}$ и длительность импульса $\tau = 4 \text{ мкс}$) описываются уравнениями (1.3) и непрерывности электронов $\frac{\partial n_e}{\partial t} = \nu_i n_e$, в котором по

оценкам Л.С.Полака пренебрегается рекомбинационными и диффузионными потерями электронов, а частота ионизации вычисляется по формуле $\nu_i = \nu_{i0}(E_{\text{эфф}}/n) \cdot \alpha(E_{\text{эфф}}/n) \cdot n$, где $E_{\text{эфф}} = E \cdot v_e / \sqrt{v_e^2 + \omega^2}$ – эффективное значение напряженности электрического поля, $n = p/kT$ – концентрация нейтральных частиц, $T = 300 \text{ К}$; U_0 – дрейфовая скорость электронов, α – коэффициент Таундсенда, $\nu_e(\bar{\epsilon}/n)$ – частота столкновений электрон-нейтрал, $\bar{\epsilon}(E_{\text{эфф}}/n)$ – средняя энергия электронов задаются по данным С. Брауна, А. Г. Engelhardt. Вначале импульса концентрация электронов мала ($n_e \leq 10^{14} \text{ м}^{-3}$), электрическое поле обеспечивает быструю ионизацию. С увеличением концентрации электронов электрическое поле экранируется, и в конце импульса характеристики разряда практически не изменяются. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис.7). С увеличением мощности импульса уменьшается осевое значение напряженности электрического поля E_0 , а увеличение давления приводит к уменьшению скорости ионизации, значений n_e , $k_{\text{отп}}$ и увеличению E_0 и E_R в конце импульса. Значение средней энергии электронов составляет несколько эВ.

Эволюция движущегося СВЧ-разряда в воздухе при атмосферном давлении исследуется на основе нестационарной двумерной модели (1.1, 1.3) в лабораторной системе координат от плазменной затравки ($T_0 = 4500 \text{ К}$, $r_0 = 1 \text{ мм}$) до выхода на установившийся режим распространения навстречу падающей электромагнитной волне по экспериментальным данным В. Беста и В.Л. Форда: размеры волновода $28,5 \times 12,6 \text{ мм}$, $\omega/2\pi = 10 \text{ ГГц}$. Поглощая СВЧ-мощность, плазменная затравка увеличивается по размеру, и начинает перемещаться навстречу падающей волне (рис.8). Время установления характеристик разряда и скорости его распространения составляет десятки мс. Форма разряда при

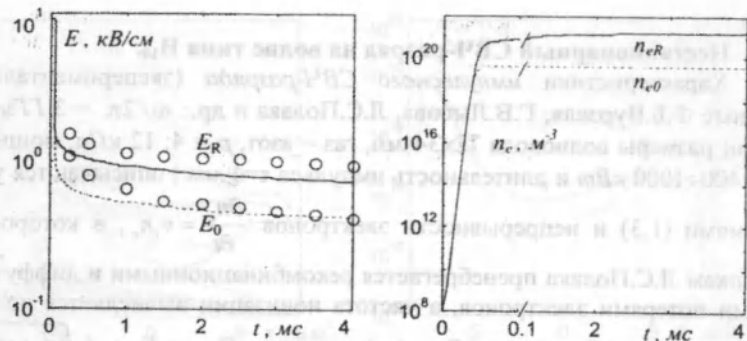


Рис. 7. Эволюция напряженности электрического поля (E_0, E_R) и концентрации электронов (n_{e0}, n_{eR}) на оси и стенке трубки при мощности импульса 1000 кВт и давлении 4 кПа. Кружки – экспериментальные данные Ф.Б. Вурзеля, Г.В. Лысова, Л.С. Полака и др.

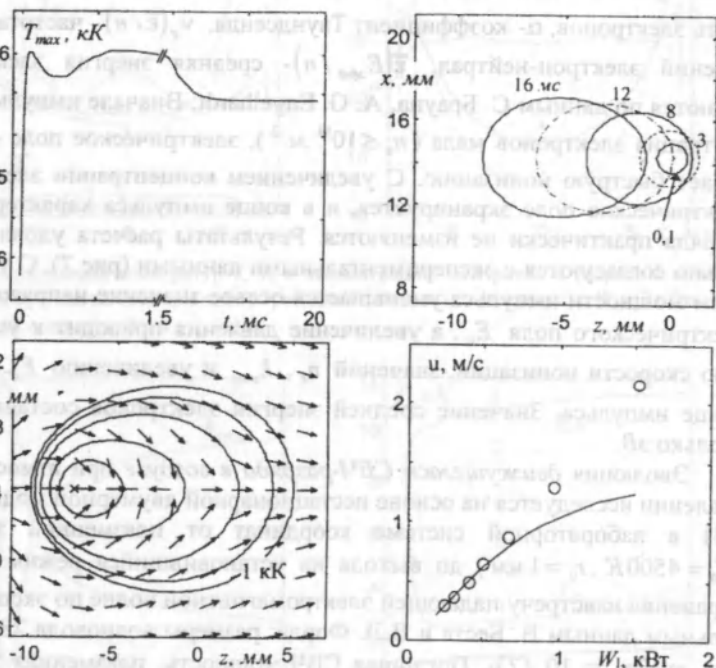


Рис. 8. Эволюция максимальной температуры и границы разряда (изотерма $T = 4000\text{ K}$) и установившееся поле температуры (шаг 1 кК) движущегося СВЧ-разряда при $W_1 = 500\text{ Вт}$; зависимость скорости стационарного распространения СВЧ-разряда от подводимой мощности. Кружки – экспериментальные данные (В. Бест и В.Л. Форд).

малых W_1 (до $\sim 1\text{ кВт}$) близка к эллипсоидальной, вытянутой вдоль оси z . С ростом W_1 форма переднего фронта разряда изменяется от выпуклой к вогнутой. Зависимость скорости разряда от подводимой мощности удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными при $W_1 < 0.7\text{ кВт}$.

В третьей главе описывается нестационарная модель СВЧ-разряда радиального типа в протяженной цилиндрической трубке. Плазменное состояние поддерживается за счет диссипации мощности сходящейся радиально-симметрично электромагнитной волны. Характеристики разряда определяются из решения уравнений (1.1-1.3) в цилиндрической системе координат. Для напряженности электрического поля задаются граничные условия:

$$r = 0: \quad \frac{\partial E}{\partial r} = 0 \quad (\text{симметрия});$$

$$r = R: \quad E(r) = E_{inc} H_0^{(1)}(x) + E_{ref} H_0^{(2)}(x), \quad x = kr, \quad k = \omega/c,$$

вне разряда ($\sigma = 0, \epsilon_k = 1$) электромагнитная волна представляет собой суперпозицию падающей и отраженной волн с амплитудами E_{inc} и E_{ref} , которые определяются из непрерывности $E, dE/dr$ на границе $r = R$; $H_0^{(1,2)}(x) = J_0(x) \pm iY_0(x)$, $J_0(x), Y_0(x)$ - функции Ханкеля и Бесселя 1-го и 2-го родов. Погонные подводимая, отраженная и диссипируемая в плазме мощности определяются по формулам:

$$Q_I = 2|E_{inc}|^2 / \mu_0 \omega, \quad Q_R = 2|E_{ref}|^2 / \mu_0 \omega, \quad Q_D = Q_I - Q_R = 2\pi \int_0^R \frac{1}{2} \sigma |E|^2 r dr.$$

Эволюция характеристик равновесного СВЧ-разряда ($\omega/2\pi = 2,4\text{ ГГц}$; $R = 7\text{ мм}$). Предварительно методом установления рассчитаны характеристики стационарного СВЧ-разряда в воздухе при атмосферном давлении, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными А.А.Боброва и др. (рис.9).

При скачкообразном увеличении подводимой к разряду мощности в начальные моменты времени сильное электромагнитное поле как бы "прошивает" разряд, увеличивается диссипируемая в плазме мощность (рис.10-11). Рост температуры и концентрации электронов особенно заметен в областях интенсивного выделения джоулева тепла. В результате скин-слоя начинает передвигаться к периферии. При скачкообразном уменьшении Q_I в начальные моменты происходит резкое уменьшение напряженности электрического поля. Затем через сотни мкс температура

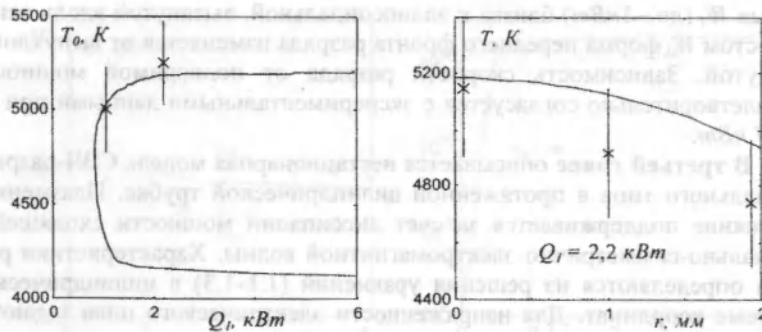


Рис.9. Зависимость осевой температуры от подводимой к разряду мощности и радиальное распределение температуры плазмы стационарного СВЧ-разряда при $\omega/2\pi=2,45$ ГГц, $R=1$ мм (x - экспериментальные данные А.А. Боброва и др.).

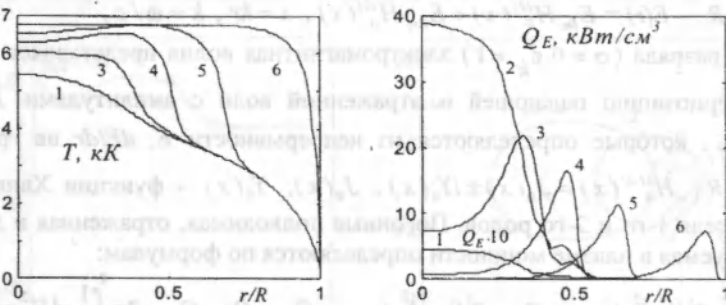


Рис.10. Радиальные распределения температуры и удельной диссипируемой мощности при скачкообразном изменении подводимой мощности от 0.2 до 20 кВт/см в моменты времени: 0 (1), 1 (2), 10 (3), 50 (4) мкс; 0,15(5), 4 (6) мс.

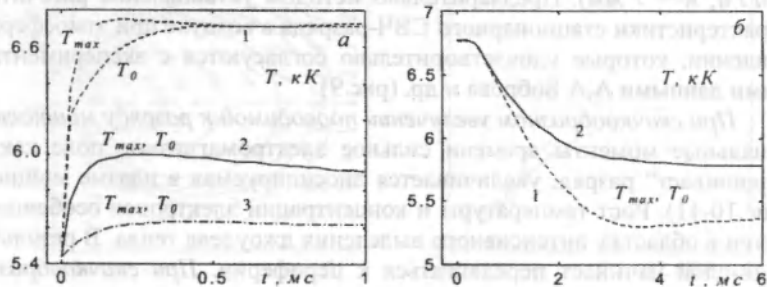


Рис.11. Эволюция максимальной и осевой температуры разряда при скачкообразном изменении подводимой мощности: а) от 0.2 до значений 20 (1), 2 (2), 0.4 (3) кВт/см; б) от 20 до значений 0.2 (1), 2 (2) кВт/см.

начинает уменьшаться, напряженность электрического поля монотонно возрастает по всему сечению трубки, увеличивается толщина скин-слоя. Область интенсивного джоулевого тепловыделения передвигается с периферии в приосевую область. Установление характеристик СВЧ-разряда при скачкообразном увеличении Q_1 (нагрев плазмы, $\tau_p \sim 1$ мс) происходит быстрее, чем при его уменьшении (охлаждение, $\tau_p \sim 5 \div 10$ мс): временные зависимости характеристик разряда обладают свойством гистерезиса. При отключении СВЧ-мощности температура экспоненциально уменьшается с характерным временем $\tau_\lambda \sim 10^{-3}$ с, соответствующим "остыванию" за счет теплопроводности.

Влияние рода газа на эволюцию характеристик СВЧ-разряда при скачкообразном изменении подводимой мощности иллюстрируется на рис.12: в воздухе и азоте наблюдаются сравнительно быстрое экранирование электрического поля на периферии и монотонный рост температуры по всему сечению трубки, а в углекислом газе и аргоне - осевая температура изменяется немонотонно.

При прямоугольной периодической модуляции мощности подводимой электромагнитной волны температура, напряженность электрического поля и удельная диссипируемая мощность испытывают колебания по всему сечению разряда. Напряженность электрического поля изменяется квазистационарно и достигает своего максимума на переднем фронте импульса (рис.13). Приосевая область, где джоулево тепловыделение мало, прогревается за счет теплопроводности ($\tau_\lambda \sim 10^{-3}$ с). Поэтому при длительности импульса меньше, чем τ_λ , изменение температуры на оси за период изменения мощности небольшое и находится в противофазе к изменению Q_1 : максимум T_0 реализуется в паузах, минимум - в импульсах. С увеличением величины и периода изменения Q_1 отклонения осевой температуры от среднего значения возрастает, положение максимума T смещается в сторону импульса, минимума - в сторону паузы. При длительностях импульса и паузы больших, чем время релаксации характеристик разряда ($\sim 1 \div 5$ мс), осевая температура максимальна в конце импульса, минимальна - в конце паузы. При наложении импульсов синусоидальной или треугольной форм изменение Q_1 происходит медленнее, и отклонения характеристик разряда от их средних значений уменьшаются по сравнению с импульсами прямоугольной формы.

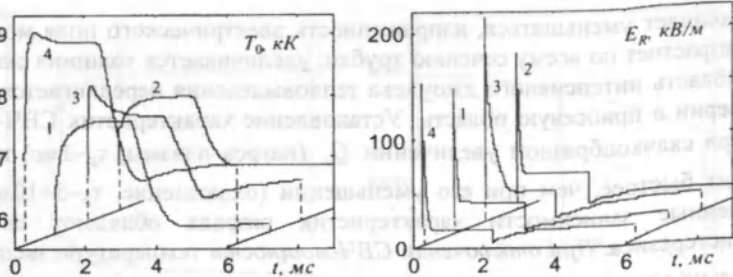


Рис.12. Эволюция характеристик СВЧ-разряда в воздухе (1), азоте (2), углекислом газе (3) и аргоне (4). T_0 - осевое значение температуры; E_R - напряженность электрического поля на стенке трубки.

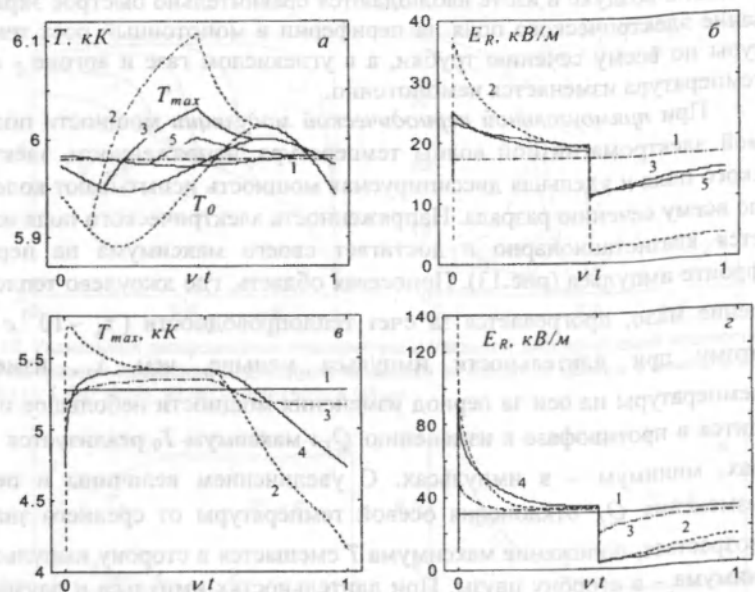


Рис.13. Эволюция характеристик СВЧ-разряда при прямоугольной модуляции подводимой к разряду мощности около среднего значения $Q_{lcp} = 4,1$ кВт/см; амплитуды модуляции 2 (3;5) и 4 (2;4) кВт/см; периоды модуляции 0,6 (4;5) и 1,2 (2;3) мс; кривые 1 - характеристики стационарного СВЧ-разряда при $Q_l = Q_{lcp}$; газ - воздух при $p=1$ (а,б) и 0,1 (в,г) атм.

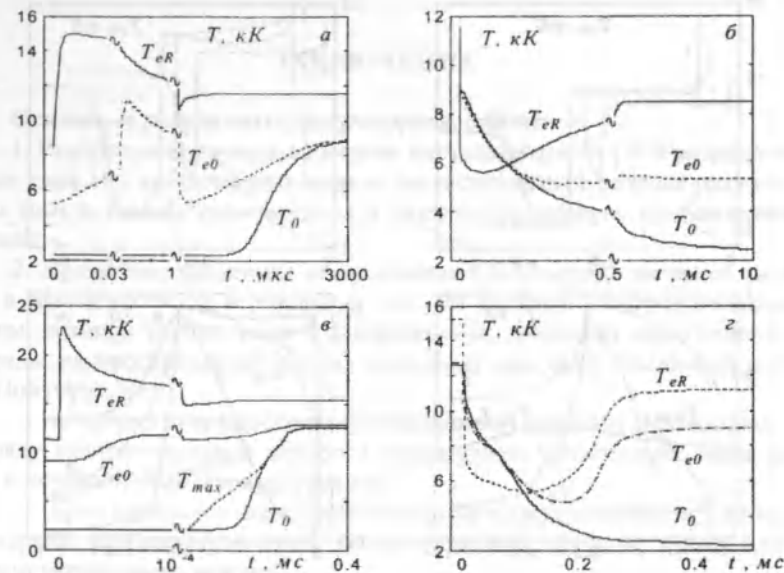


Рис.14. Эволюция характеристик СВЧ-разряда в воздухе при скачкообразном изменении подводимой мощности от 0,2 до 20 кВт/см (а,в) и от 20 до 0,2 кВт/см (б,г); $p=1$ (а,б) и 0,1 (в,г) атм.

С уменьшением давления ($p = 0,1$ атм) инертность плазмы уменьшается, а амплитуда колебаний характеристик увеличивается (рис.13). Изменение осевой температуры качественно повторяет форму импульса.

Эволюция характеристик неравновесного СВЧ-разряда в аргоне ($\omega/2\pi = 2,4$ ГГц; $R = 2,5$ мм).

При скачкообразном увеличении Q_l ($p = 1$ атм) на периферии разряда, где интенсивно выделяется джоулево тепло, происходит рост температуры и концентрации электронов за счет ударной ионизации. Температура тяжелых частиц увеличивается сначала на периферии, где электроны имеют высокую энергию, а затем - в приосевых областях за счет теплопроводности (рис.14). При скачкообразном уменьшении Q_l напряженность электрического поля и диссипируемая в плазме мощность резко уменьшаются. На периферии разряда происходит более быстрое уменьшение T_e , чем в приосевых областях. Спад концентрации электронов приводит к увеличению толщины скин-слоя и напряженности электрического поля по всему сечению трубки. В результате на пе-

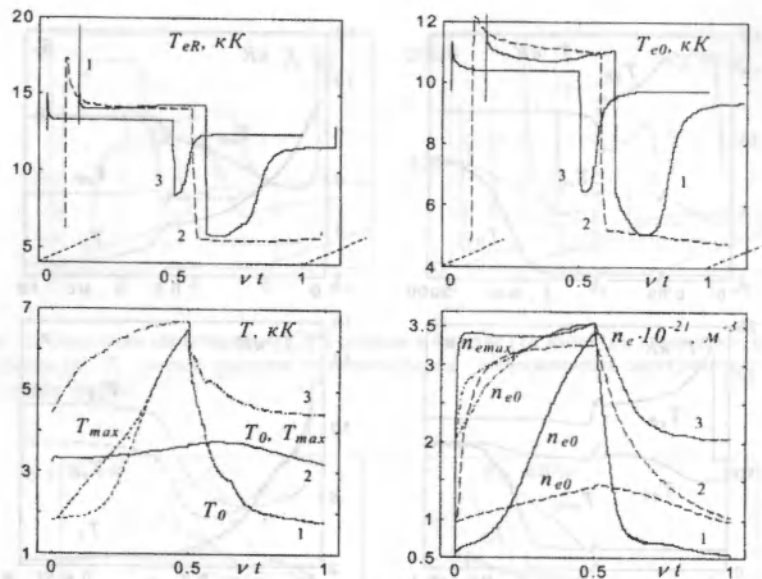


Рис. 15. Эволюция характеристик СВЧ-разряда при прямоугольной модуляции подводимой мощности около среднего значения $Q_{\text{ср}} = 2,1 \text{ кВт/см}^2$; $p = 0,1 \text{ атм}$. Амплитуды модуляции 2 (1;2) и 1 (3) кВт/см^2 ; периоды модуляции 0,1 (2) и 1 (1;3) мс .

риферии при $t > 50 \text{ мкс}$ наблюдается рост T_e . При $p = 0,1 \text{ атм}$ время установления характеристик разряда уменьшается ($\tau_p \sim 0,4 \text{ мс}$) и временные зависимости температуры электронов на оси и периферии качественно одинаковы.

При *прямоугольной периодической модуляции* максимальное значение температуры электронов реализуется в начале импульса, а минимальное – в начале паузы (рис.15). Отклонения температуры тяжелых частиц и концентрации электронов на оси от средних значений с увеличением частоты модуляции заметно уменьшаются. При *синусоидальной форме* импульсов отклонения T и n_e увеличиваются, а T_e и E – уменьшаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в работе:

1. Разработаны двумерная модель нестационарного СВЧ-разряда на волне типа H_{10} и одномерная модель нестационарного разряда радиального типа в рамках равновесного и двухтемпературного приближений плазмы.

2. Проведено численное исследование СВЧ-разряда на волне типа H_{10} в зависимости от величины и способа подвода электромагнитной волны, размера трубки, рода и давления газа; эволюции характеристик разряда, распространяющегося по волноводу навстречу падающей волне. Получено, что

а) существует пороговое (минимальное) значение подводимой к разряду мощности, выше которого реализуются устойчивый, переходной и неустойчивый режимы горения;

б) оптимальное поглощение мощности электромагнитной волны в разряде, стабилизированном диэлектрической трубкой, происходит вблизи переходного режима;

в) по сравнению с односторонним при двухстороннем симметричном подводе электромагнитной волны или использовании короткозамыкающего поршня коэффициент поглощения увеличивается, а значение пороговой мощности уменьшается.

3. Численные исследования СВЧ-разряда радиального типа при изменении подводимой к разряду мощности по заданному временному закону показали, что

а) временные зависимости характеристик разряда обладают свойством гистерезиса при увеличении и уменьшении подводимой к разряду мощности;

б) отклонение характеристик разряда от их средних значений при периодической модуляции подводимой мощности уменьшается с увеличением давления;

в) характеристиками разряда можно управлять путем изменения параметров модуляции (амплитуды, частоты, формы) подводимой мощности.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Кайрыев Н. Ж. Эволюция характеристик цилиндрического СВЧ-разряда// Материалы II науч. конф. КРСУ. – Бишкек, 1995. -С. 19.
2. Кайрыев Н. Ж. Моделирование нестационарной неравновесной плазмы в СВЧ-поле// Материалы III науч. конф. КРСУ. – Бишкек, 1996. -С.5.
3. Кайрыев Н. Ж., Лелевкин В.М. Моделирование нестационарной двухтемпературной плазмы в СВЧ поле// Наука и новые технологии, 1997. -№2. -С.11-17.
4. Кайрыев Н.Ж., Лелевкин В.М. Численное исследование нестационарного СВЧ-разряда. Тр. междунар. семинара «Голография и оптическая обработка информации». -Бишкек, 1997. -С.137-140.
5. Kayryev N.Z., Kulumbaev E.B. and Lelevkin V.M. Numeric calculation of nonstationary microwave discharge in noble gaz// Abstract TPP-5 Fifth European Conference on Thermal Plasma Processes.-St. Petersburg, 1998.-P.90.
6. Kayryev N.Z., Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M. Two-dimensional microwave discharge in H_{10} type wave// IV International Workshop: Strong microwaves in plasmas.-Nizhny-Novgorod, 1999. -D7.
7. Кайрыев Н.Ж. Влияние рода газа на эволюцию характеристик СВЧ-разряда// Сб. науч. тр. №2 «Технология переработки полезных ископаемых и общетехнические науки». -Бишкек, 1999. -С. 218-225.
8. Байтереков А., Кайрыев Н.Ж. Двумерная модель СВЧ-разряда на волне типа H_{10} // Вестник Технологического ун-та “Дастан”, 1999. - №2. -С. 21-27.
9. Кайрыев Н.Ж. Влияние подводимой мощности и рода газа на характеристики СВЧ-разряда// Вестник Технологического ун-та “Дастан”, 1999. -№2. -С. 49-57.
10. Кайрыев Н.Ж., Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Численное исследование СВЧ-разряда на волне типа H_{10} // Физика плазмы, 2000. -Т. 26. -№3. -С. 1-6.
11. Кайрыев Н.Ж. СВЧ-разряд на волне типа H_{10} с короткозамыкающим поршнем// Вестник КГНУ. -Серия 5, 2000. -Вып.3. -С. 14-17.
12. Кайрыев Н. Ж. Двухтемпературная модель СВЧ-разряда на волне типа H_{10} // Вестник КГНУ. -Серия 5, 2000. -Вып.3. -С. 17-21.

АННОТАЦИЯ

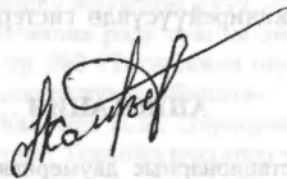
Плазмы тең салмактуу жана эки температуралуу деп жакындаштыруунун негизинде H_{10} толкун тибиндеги СВЧ-разряддын эки өлчөмдүү жана радиалдык типтеги СВЧ-разряддын бир өлчөмдүү стационардуу эмес моделдери иштелип чыкты. Статикалык жана импульстуу режимдеги H_{10} -толкундуу СВЧ-разряддын жана берилүүчү толкунду көздөй кыймылдоочу разряддын мүнөздөмөлөрүн эсептөө жүргүзүлдү. Төмөнкү натыйжалар алынды: электромагниттик толкундун бир тараптан берилүүсүнө караганда эки тараптан симметриялуу берилүүсүндө же чукул туташтыруучу поршенди колдонууда жутуу коэффициенти жогорулайт, ал эми кубаттуулуктун минималдык чеги азаят; СВЧ-разрядда электромагниттик толкундун кубаттуулугунун оптималдуу жутулуусу өткөөл режимдин жанында байкалат. Разрядга берилүүчү электромагниттик толкундун кубаттуулугунун белгилүү бир убакыт закону боюнча өзгөрүүсү учурундагы СВЧ-разряддын мүнөздөмөлөрү эсептелди жана алардын убакыттан болгон көз карандылыктары берилүүчү кубаттуулуктун чоңоюусунда жана кичирейүүсүндө гистерезис касиетине ээ экендиги аныкталды.

АННОТАЦИЯ

Разработаны нестационарные двумерная модель СВЧ-разряда на волне типа H_{10} и одномерная модель СВЧ-разряда радиального типа на основе равновесного и двухтемпературного приближений плазмы. Проведены расчеты характеристик СВЧ-разряда на волне типа H_{10} в статическом и импульсном режимах и при распространении разряда навстречу падающей волне. Получено, что по сравнению с односторонним при двухстороннем симметричном подводе электромагнитной волны или использовании короткозамыкающего поршня коэффициент поглощения увеличивается, а значение пороговой мощности уменьшается; оптимальное поглощение мощности электромагнитной волны в СВЧ-разряде происходит вблизи переходного режима. Проведен численный расчет характеристик СВЧ-разряда радиального типа при изменении подводимой мощности по заданному временному закону и получено, что временные зависимости характеристик разряда обладают свойством гистерезиса при увеличении и уменьшении подводимой к разряду мощности.

ABSTRACT

Non-stationary two-dimensional model of microwave discharge on the H_{10} mode wave and non-stationary one-dimensional model of radial type microwave discharge on the bases of equilibrium and two-temperature approximations of plasma worked out. The characteristics of microwave discharge on the H_{10} mode wave were calculated in static and pulsed operations and at discharge propagation towards input wave. It has been obtained that in comparison with one-side input, in discharge with two-side symmetric input of electromagnetic wave or using short-circuit piston the absorption coefficient increases and the value of threshold power decreases; the optimal absorption power of electromagnetic wave is going on near the transition regime. The characteristics of radial type microwave discharge at time changing of input power by given law were calculated. It has been obtained that the time dependencies of discharge characteristics have the hysteresis property at increasing and decreasing input power.



Подписано к печати 26.05.00. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Офсетная печать. Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 97.

Издательство Славянского университета

Отпечатано в типографии КРСУ, г.Бишкек, ул.Шопокова, 68.