



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 23 за 2008 г.



Воскобойникова О.И.,
Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф.,
Палейчик В.В.

Структура фронта
ионизации в микроволновом
разряде

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Структура фронта ионизации в микроволновом разряде / О.И.Воскобойникова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 23. 9 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2008-23>

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В. КЕЛДЫША
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик

СТРУКТУРА ФРОНТА ИОНИЗАЦИИ
В МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ

Москва

O.I. Voskoboynikova, S.L. Ginzburg, V.F. Dyachenko, V.V. Paleychik

THE STRUCTURE OF THE FRONT IONISATION IN THE MICROWAVE DISCHARGE

Abstract

A two-dimensional computer code has been developed for numerical calculation of the discharge in UHF fields. The two-temperature model takes into account ionization, dissociation, electron diffusion etc.

О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик

СТРУКТУРА ФРОНТА ИОНИЗАЦИИ В МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ

Аннотация

Двумерная компьютерная модель была применена для численного расчета разряда в высокочастотном поле. Двухтемпературная модель учитывает ионизацию, диссоциацию, диффузию электронов и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 08 – 01– 00299.

Введение

Работа посвящена численному исследованию процесса газового разряда стримерного типа и является продолжением работ [1 - 12]. Основное внимание уделено расчету формы и поведению фронта ионизации.

§1 Постановка задачи

Взаимодействие электромагнитного поля заданной частоты с проводящим частично ионизованным газом описывается системой Максвелла для комплексных амплитуд поля \mathbf{E} , \mathbf{H}

$$o \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - i\mathbf{E} - \nabla \times \mathbf{H} + \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$o \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - i\mathbf{H} + \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

совместно с уравнениями ионизации и теплообмена

$$nC \frac{\partial T}{\partial t} = (\theta - T)n\psi K - F_i \quad (3)$$

$$n \frac{\partial \psi}{\partial t} - \nabla \cdot nD \nabla \psi = n\psi(v_i - v_r) \quad (4)$$

$$\frac{3}{2}n\psi \frac{\partial \theta}{\partial t} = q \operatorname{Re}(\sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) + (T - \theta)n\psi(K + d_k) - F_r \quad (5)$$

Здесь n - плотность газа (постоянная), T - его температура, ψ - относительная концентрация электронов, θ - их температура.

Используемые единицы измерения и выражения для всех коэффициентов, проводимости σ , диссоциации δ , теплоемкости C , диффузии D , ионизации v_i , рекомбинации v_r , теплообмена K и т.д. приведены ниже.

При выборе единиц измерения [*] используем фиксированные значения частоты внешнего поля $\omega = 2.2 \cdot 10^{10}$ сек⁻¹, массы молекулы газа $M = 3.3 \cdot 10^{-24}$ г и положим:

$$[x] = c/\omega = 1.36 \text{ см},$$

$$[\sigma] = \omega/4\pi = 1.75 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1},$$

$$[n] = 2.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3},$$

$$[\theta] = [T] = 4.1 \cdot 10^{-14} \text{ эрг},$$

$$[H] = [E] = 36 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{-1/2} \text{ сек}^{-1},$$

$$[v] = ([T]/M)^{1/2} = 1.11 \cdot 10^5 \text{ см/сек},$$

$$[t] = [x]/[v] = 1.22 \cdot 10^{-5} \text{ сек}.$$

Для энергии системы, силы тока и количества электронов используются единицы:

$$[W] = [Q] = [n][T][x]^3 = 2.5 \cdot 10^6 \text{ эрг},$$

$$[J] = [\sigma][E][x]^2 = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ сек}^{-2},$$

$$[S] = [n][x]^3 = 6 \cdot 10^{19}.$$

При этом константы и функции, входящие в систему уравнений (1) - (5),

принимают следующий вид:

$$o = 3.7 \cdot 10^{-6}, \quad \sigma = \frac{4\pi o \psi / \nu}{1 - i / o v_{tr}}, \quad v_{tr} = 9 \cdot 10^{17} \cdot n \nu, \quad a = 0.026,$$

$$\nu = 10^{-6} \cdot \theta^{-3/2} \psi + 3.9 \cdot 10^{-10} \frac{(a\theta/13)^{2/3}}{(1 + (a\theta/13)^{0.58})^3} (\delta - \psi),$$

$$\delta = 1 + 2 / \left(1 + \left(1 + 0.031 \cdot n (aT)^{-3/2} \exp(4.5/aT) \right)^{1/2} \right),$$

$$C = 2.5 + (\delta - 1) \left(0.5 + \frac{2 - \delta}{3 - \delta} (0.5 + 4.5/aT)(1.5 + 4.5/aT) \right),$$

$$q = 27, \quad F_i = 13.6 n \psi (v_i - v_r) / a,$$

$$v_i = 4.5 \cdot 10^6 \sqrt{a\theta} (1 + a\theta/200)^{-1} \exp(-15.4/a\theta) (n\delta - n\psi),$$

$$v_r = \alpha (n\psi)^2 + \beta n\psi, \quad \alpha = 6.2 \cdot 10^7 (a\theta)^{-1/2} + 1.2 \cdot 10^4 (a\theta)^{-1},$$

$$\beta = 78 (a\theta)^{-3/4} + 8.7 \cdot 10^6 T^{-1} \theta^{-1/2} (2 - \delta) / \delta,$$

$$\kappa_1 = 1.5 \cdot 10^{-8} (a\theta)^{10} / (0.24 + a\theta)^{11.5},$$

$$\kappa_2 = 1.04 \cdot 10^{-7} \sqrt{a\theta} \exp(-9/a\theta) / (1 + a\theta/200),$$

$$\kappa_3 = 15 \cdot 10^{-7} \exp\left(-18 \left(1 + (a\theta/19)^2\right) / a\theta\right), \quad d_k = (15.4 + a\theta) v_i / 2a\theta\delta,$$

$$K = 0.00027 \cdot v_{tr} + 2.9 \cdot 10^{14} n ((\kappa_1 + \kappa_2)(2 - \delta) + \kappa_3 (0.1(2 - \delta) + 2(\delta - 1)(1 - \psi/\delta))) / a\theta,$$

$$F_r = 1.1 \cdot 10^3 \cdot (n\psi)^2 \sqrt{a\theta}, \quad D = 2.5 \cdot 10^3 \frac{\theta}{v_{tr}} \left(0.0164 + \frac{v_i^2}{v_i^2 + (4\pi\psi/\nu)^2} \right).$$

Ввиду малости коэффициента ($o \sim 10^{-6}$) при производных по времени в уравнениях (1), (2), пренебрегаем этими членами и решаем полученную систему Гельмгольца как стационарную, при каждом t , с условиями Зоммерфельда на бесконечности для возмущения поля.

В данной работе мы ограничиваемся двумерным цилиндрически симметричным ($\partial/\partial\phi = 0$) случаем с внешним полем в виде стоячей волны, имеющим отличные от нуля компоненты $E_z = J_0(r)$, $H_\phi = -iJ_1(r)$, выражаемые функциями Бесселя.

Газ считается неподвижным постоянной плотности, принятой за единицу. В начальный момент равна единице и его температура. Электронная компонента отлична от нуля лишь в окрестности начала координат, в шаре радиуса 0.01, где относительная концентрация ее порядка 10^{-5} , а температура равна 69. Развитие этого возмущения и составляет предмет задачи.

Симметрия задачи относительно плоскости $z = 0$ позволяет ограничиться расчетом в области $z > 0$.

Чтобы сделать задачу Гельмгольца ограниченной, используем интегральное представление решения соответствующей внешней однородной задачи для связи значений решения на двух поверхностях, т.е. в качестве нелокального

граничного условия. Решение же внутренней неоднородной задачи проведем методом матричной прогонки.

Остальные уравнения системы решаются обычными разностными методами.

§2 Результаты расчета

Полученные в результате расчета зависимости изображены на рисунках.

Рис.1 показывает динамику фронта ионизации. Здесь, слева, изображено положение фронта на три момента времени. Справа - график $Z(t)$ - положение фронта на оси z как функция времени. Наблюдается резкое ускорение его перемещения на интервале $0.01 < t < 0.015$, до одной тысячной скорости света. Последующее замедление связано, по-видимому, с уменьшением остроты головки стримера и ее расширением.

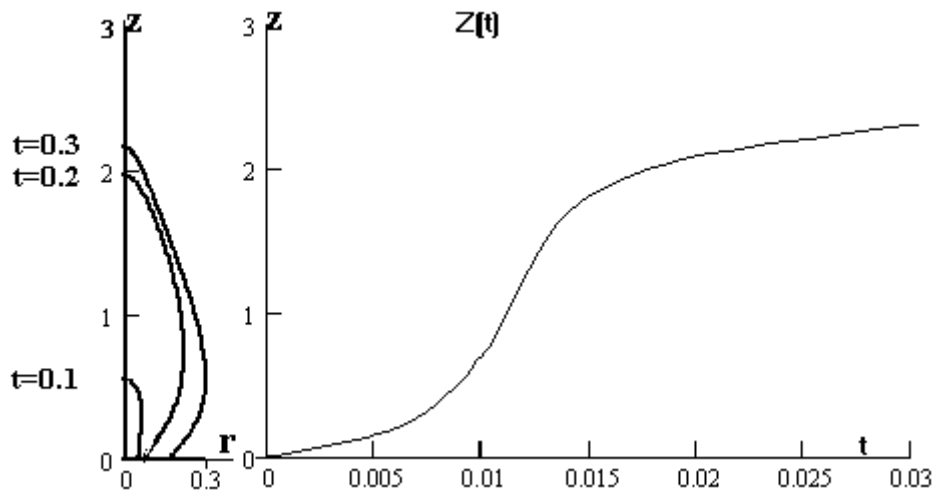


Рис.1 Положение фронта ионизации.

На рис.2 показаны распределения модулей поля и проводимости вдоль оси на момент $t=0.013$. Максимум поля чрезвычайно узок и располагается в районе, где проводимости, т. е. электронов, практически нет.

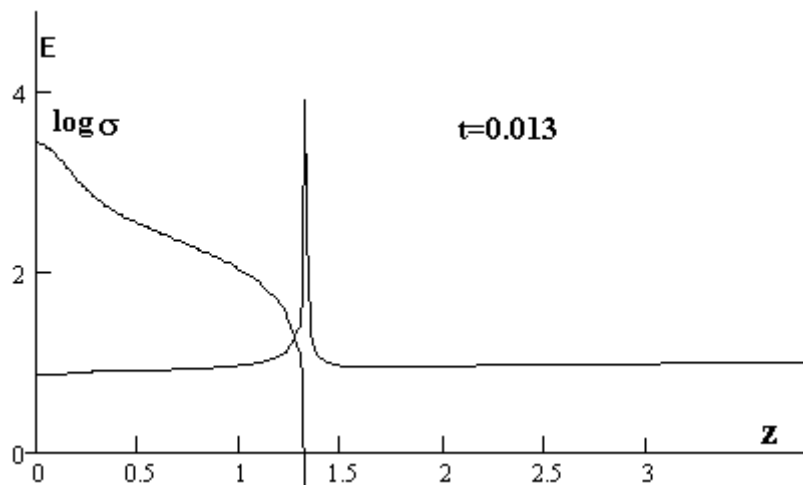


Рис.2 Распределение модулей поля и проводимости

Рис.3 демонстрирует распределения поля на тот же момент поперек оси - линии уровня $|E|=1$ и $=2$ (слева) и вдоль двух указанных разрезов (справа).

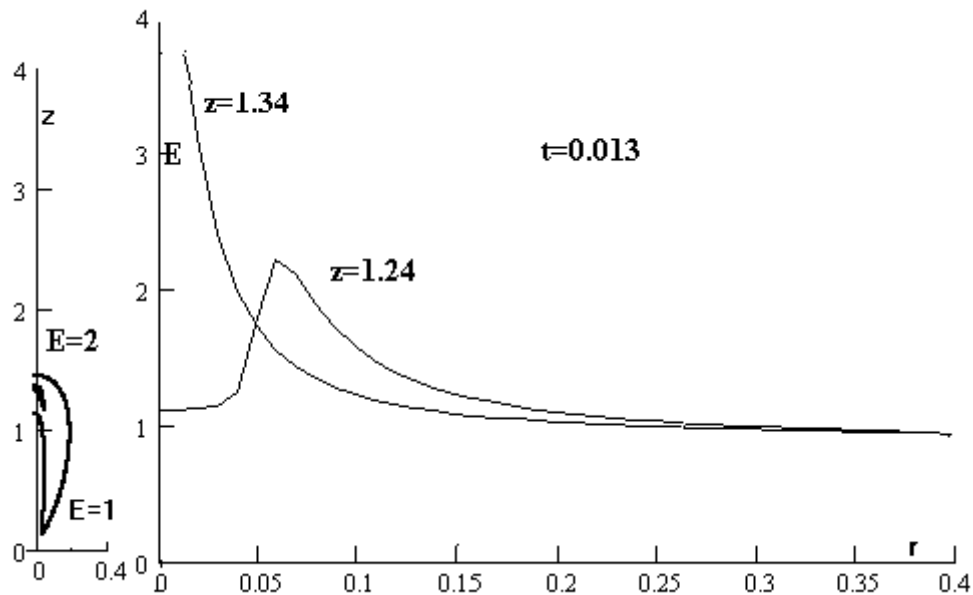


Рис.3 Распределение поля.

На рис.4 изображено изменение максимума поля на оси со временем.

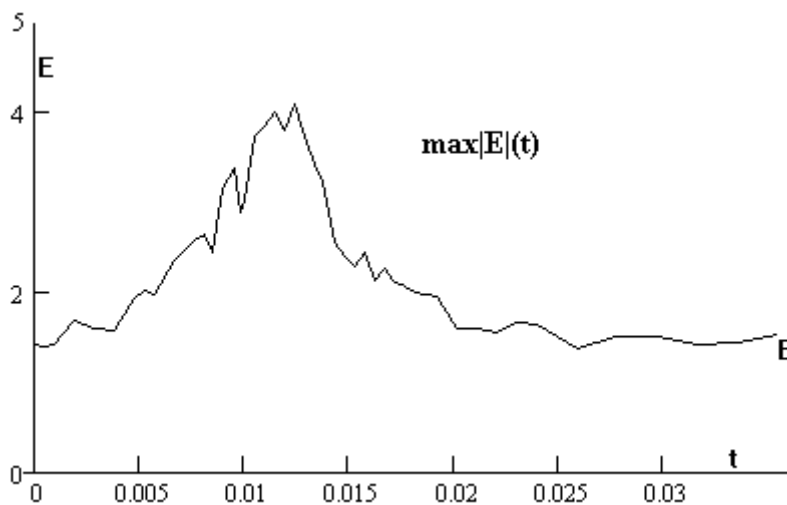


Рис.4 Максимум поля.

На рис.5 представлена z - компонента тока $J_z = \int \sigma E_z r dr$, ее действительная и мнимая части. Слева - как функция z , на момент $t = 0.013$, справа - как функция t в сечении $z = 0$. Ускорение фронта ионизации после $t = 0.01$ связано, в частности, с изменением фазы.

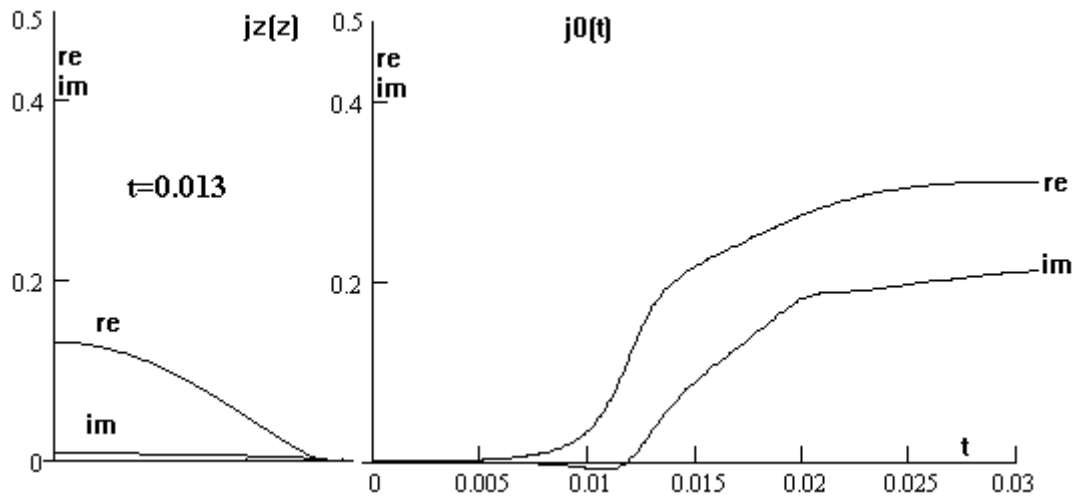
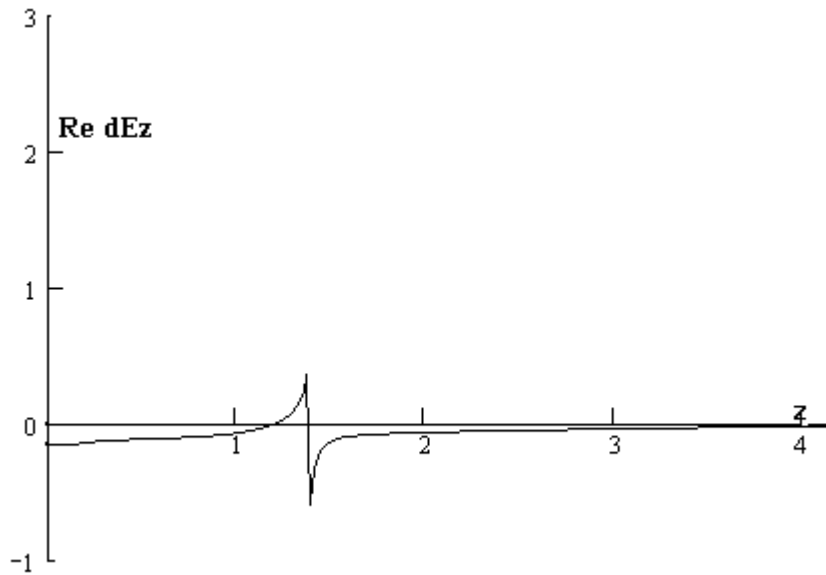
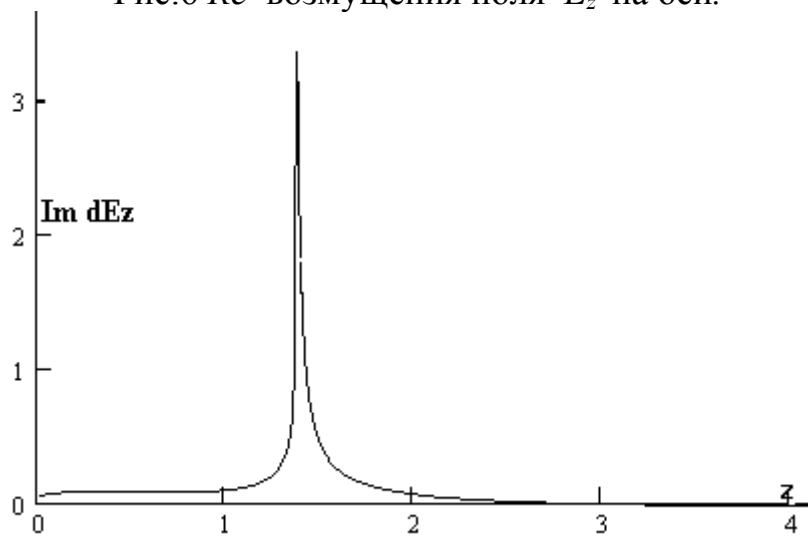


Рис.5 Z – компонента тока.

На рис.6,7 представлены действительная и мнимая части возмущения поля на оси z в тот же момент $t = 0.013$.

Рис.6 Re возмущения поля E_z на оси.Рис.7 Im возмущения поля E_z на оси.

На рис.8 показано поведение во времени количества $S = \iint n\psi r dr dz$ и энергии $W = 1.5 \iint n\psi \theta r dr dz$ электронов. Здесь же дана энергия, полученная системой в результате джоулева нагрева $Q(t) = \iiint q \operatorname{Re}(\sigma \mathbf{E} \mathbf{E}^*) r dr dz dt$.

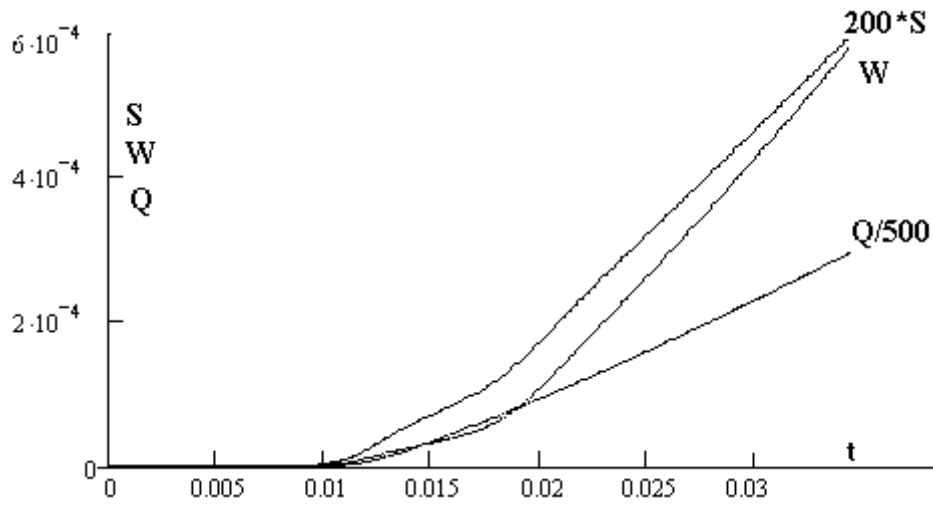


Рис.8 Количество и энергия электронов.

Литература

- [1] О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, К.В. Ходатаев. Инициация микроволнового стримерного разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2001, № 13.
- [2] О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, К.В. Ходатаев. Численное исследование подкритического микроволнового разряда в газе высокого давления. // ЖТФ, 2002, Т. 72, Вып. 8.
- [3] О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик, К.В. Ходатаев. Расчеты микроволнового стримерного разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2002, № 35.
- [4] О.И. Воскобойникова, С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик. Расчеты микроволнового разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003, № 30.
- [5] С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик, К.В. Ходатаев. Модель микроволнового разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2004, № 16.
- [6] С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик, К.В. Ходатаев. 2-D модель микроволнового разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005, № 1.
- [7] С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик, К.В. Ходатаев. 3-D модель микроволнового разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005, № 58.
- [8] С.Л. Гинзбург, В.Ф. Дьяченко, В.В. Палейчик. Численное исследование микроволнового разряда в газе. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006, № 29.
- [9] В.Ф. Дьяченко. Численный метод решения системы Гельмгольца. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2007, № 14.
- [10] В.Ф. Дьяченко, Е.В. Шаханова. Взаимодействие волны с проводящим волокном. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1993, № 29.
- [11] О.И. Воскобойникова. Итерационный метод решения задачи о рассеянии волны. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 1997, № 38.
- [12] О.И. Воскобойникова. Несколько расчетов микроволнового стримерного разряда. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2001, №57.