

На правах рукописи



**Фадеев Алексей Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАТЕРАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В  
РЕАКТОРАХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДАМИ ДВУХРАКУРСНОЙ  
ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

05.27.01.-твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте Российской академии наук (ФТИАН РАН)

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФТИАН РАН **Руденко Константин Васильевич**

**Официальные оппоненты:**

**Шибков Валерий Михайлович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), профессор Физического факультета;

**Чукалина Марина Валерьевна**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН), старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «18» декабря 2014 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект д.36.к.1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.204.01  
Кандидат физико-математических наук

 **Вьюрков В.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

В настоящее время около половины технологических операций при изготовлении интегральных схем составляют методы с использованием низкотемпературной плазмы. Одним из ключевых параметров, ответственных за качественные характеристики структур интегральных схем, является латеральная однородность компонентов плазмы в непосредственной близости от обрабатываемых пластин. Концентрация ионов и активных радикалов в плазме определяет скорость протекания поверхностных реакций травления и осаждения на микроэлектронных структурах. Латеральная однородность потоков этих частиц обеспечивает однородность скорости процессов по площади пластины. Разработка и оптимизация источников плазмы, плазменных технологий является ключевой задачей на всех этапах создания интегральных схем высокой степени интеграции.

В прогнозе ITRS [1] представлены планы перехода промышленного производства на пластины диаметром 450 мм. Для этого необходимо, чтобы неоднородность концентрации частиц плазмы по сечению реактора в зоне обработки не превышала 1-3%. Для конструирования новых типов технологических реакторов и дизайна новых технологических процессов необходимо использование точных, не возмущающих диагностических методов.

Высокие требования к однородности плазмы по сечению реактора приводят к необходимости пространственно разрешенных измерений. Измерение пространственной однородности ионов возможно рядом методов, например, зондовым методом [2]. Диагностика плотности незаряженных частиц плазмы (химически активных радикалов) в технологических реакторах микроэлектроники возможна лишь оптическими методами [3], среди которых преобладают абсорбционная эмиссионная спектроскопия [4] и метод лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ) [5]. Пространственное разрешение в данных экспериментальных методах может быть достигнуто значительным усложнением эксперимента, не всегда совместимого с промышленными типами плазмохимических реакторов. Кроме того, эти методы дорогостоящи и часто требуют множества специализированных оптических портов в камере технологического реактора.

В последнее время активно развиваются методы томографических эмиссионных исследований плазмы. В работах [6-8] авторами были реализованы методы реконструкции пространственного распределения частиц плазмы классическими методами томографии, с использованием математических алгоритмов, аналогичных используемым в медицине. Эти алгоритмы реконструкции предполагают использование большого числа ракурсов сканирования эмиссионных данных. Однако на промышленных реакторах плотной плазмы низкого давления с цилиндрической симметрией камеры имеется два, а в некоторых случаях один оптический порт, необходимый для вывода эмиссионного излучения плазмы. Поэтому, описанные в работах [7-8] алгоритмы реконструкции не применимы (без модернизации) для томографии в промышленных реакторах плотной плазмы низкого давления (НДП), за исключением реакторов геликонного типа. Такие алгоритмы требуют большого числа оптических портов для получения линейных интегралов интенсивности с максимально возможным числом томографических ракурсов.

### **Цель диссертационной работы**

Целью данной работы было создание и экспериментальная проверка алгоритма двухракурсной эмиссионной томографии плазмы, совместимого с технологическими плазмохимическими реакторами с удаленным источником плотной плазмы.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Выбор оптимальной томографической схемы сканирования, использующей два ракурса оптических портов плазмохимического реактора;
- Создание алгоритма реконструктивной томографии, совместимого с двухракурсной схемой сканирования, и методов подавления артефактов, возникающих при малоракурсной реконструкции данных;
- Создание программного обеспечения для томографической реконструкции латерального распределения плотности частиц плазмы в сечении камеры реактора по ее спектрально разрешенному эмиссионному излучению;
- Проверка и оптимизация работы алгоритма реконструкции на статистически большом количестве случайных томографических фантомов;
- Верификация разработанного томографического алгоритма в вычислительном эксперименте (частицы  $Ar^+$  плазмы аргона), использующем в

качестве исходных данных прямые зондовые измерения двумерного распределения ионной концентрации в сечении экспериментального реактора;

- Экспериментальное исследование латерального распределения компонентов плазмы  $BF_3$  в камере плазменно-иммерсионного ионного имплантера.

### **Научная новизна и достоверность работы**

Научная новизна и достоверность работы состоит в следующих результатах, полученных автором впервые:

- Предложена модель плазменных неоднородностей, позволяющая применить реконструктивную томографию в двухракурсной схеме сканирования.

- Разработано оригинальное программное обеспечение для реконструкции латерального распределения частиц плазмы по ее эмиссионному излучению.

- Проведено исследование функционирования алгоритма на множестве случайных томографических фантомов.

- Проведено экспериментальное исследование латерального распределения ионов и свободных радикалов  $BF_3$  плазмы в камере плазменно-иммерсионного ионного имплантера.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением общепризнанных теорий физики плазмы, математических методов реконструктивной томографии, верификацией алгоритма на плазменных объектах.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- Механизм учета априорной информации о физическом объекте – в виде представления плазменных неоднородностей суперпозицией гладких функций (одиночных пиков), настроенных над постоянным полем (фоном).

- Алгоритм двумерной эмиссионной томографической реконструкции при двухракурсной схеме сканирования.

- Численная реализация алгоритма и его апробация на множестве математических фантомов.

- Экспериментальная верификация томографического алгоритма реконструкции на плазменных объектах.

## **Практическая значимость работы**

Разработанный и исследованный экспериментально метод двухракурсной томографии плазмы позволяет контролировать однородность латерального распределения плотности частиц плазмы, что значительно облегчает разработку и оптимизацию новых плазменных реакторов и технологий микро- и нанoeлектроники.

## **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- Intern. Conference on “Micro- and nanoelectronics”, Zvenigorod, – 2003.
- 16<sup>th</sup> International Vacuum Congress, June 28 – July 2, Venice, Italy, – 2004.
- Intern. Conference on “Micro- and nanoelectronics”, Zvenigorod – 2007.
- Intern. Conference on “Micro- and nanoelectronics”, Zvenigorod – 2009.

## **Публикации**

Основные результаты работы представлены в 13 публикациях, три из которых опубликованы в журнале, входящем в список журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации. Одна публикация по теме диссертации принята в печать.

Список публикаций приведен в конце автореферата.

## **Личный вклад автора**

Общая постановка задачи осуществлялась научным руководителем Руденко К.В. Разработка схемы сканирования, совместимой с промышленными плазмохимическими реакторами плотной плазмы низкого давления, представленная в работе, и анализ полученных результатов, проводилась автором совместно с научным руководителем. Создание алгоритма реконструктивной томографии совместимой с двухракурсной схемой сканирования, а также создание программного обеспечения для реконструкции

латерального распределения частиц плазмы по ее эмиссионному излучению выполнены лично автором.

Непосредственное участие коллег автора в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах.

Результаты, выносимые на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

## Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из четырех глав, заключения и приложения. Каждая из глав завершается разделом «выводы к главе», в котором резюмируются полученные результаты. Общие выводы по работе приведены в заключении.

Диссертация изложена на 172 страницах. Рукопись содержит 63 рисунка. Список литературы содержит 107 ссылок на цитируемые источники. Также, приведен список из 13 публикаций автора по тематике диссертации.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе 1** рассмотрены классические модели компьютерной томографии, обсуждается современное состояние исследований в области малоракурсной томографии. Указаны основные проблемы, возникающие при реконструкции изображения в условиях недостатка ракурсов сканирования и шумов в исходных данных.

**В главе 2** приведены результаты исследования классических алгоритмов реконструкции на предмет применимости к двухракурсной схеме регистрации эмиссионных данных. Сделан вывод о необходимости введения в алгоритм априорных данных о плазменных неоднородностях. Предложена модель поля неоднородностей, использованная для реконструкции диффузионной области плазмы в технологических реакторах с удаленной зоной плазмообразования.

Плазма обладает эмиссионными свойствами в широком диапазоне частот. При возбуждении оптического перехода прямым электронным ударом интенсивность излучения выбранной атомной спектральной линии может быть описана формулой [10]:

$$I \propto 4\pi n n_e \int_{E_{th}}^{\infty} \sigma(\varepsilon) \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m_e}} \cdot f_e(\varepsilon) \cdot d\varepsilon, \quad (1)$$

где

$n$  – концентрация атомов исследуемой компоненты плазмы,

$n_e$  – концентрация электронов,

$\sigma(\varepsilon)$  – сечение возбуждения атома,

$m_e$  – масса электронов,

$\varepsilon$  – энергия электронов,

$f(\varepsilon)$  – функция распределения электронов по энергиям.

Интегрирование в (1) ведется от порогового значения  $E_{th}$  энергии возбуждения. Для нейтральных атомов эта величина, как правило, меньше, чем для ионов, что приводит к более интенсивным спектральным линиям нейтральных атомов. Таким образом, эмиссионная томография наиболее подходит для реконструкции именно незаряженных частиц плазмы. Восстановив поле интенсивности характеристического излучения, можно перейти к полю концентрации частиц плазмы. Из выражения (1) видно, что помимо концентрации частиц  $n$  интенсивность излучения зависит еще от таких параметров плазмы, как электронная температура и функция распределения электронов по энергиям. Поэтому, при реконструкции необходимо следить за тем, как меняются эти параметры вдоль области сканирования, и, если их изменение существенно, использовать оптическую актинометрию [9], для удаления вклада иных, кроме концентрации, параметров в интенсивность регистрируемого излучения. Таким образом, в отсутствие самопоглощения в плазме, можно реконструировать концентрационное поле искомых частиц.

Технологические операции микроэлектроники проводятся в промышленных реакторах с плазмой низкого и пониженного давления, снабженных либо удаленными от зоны обработки пластины источниками плотной плазмы (HDP-источники, ICP, TCP, ECR, геликонные), либо с активной зоной разряда непосредственно у пластины (емкостные CCP, DCCP). В рабочей зоне данные реакторы должны обеспечивать латеральную однородность плазмы с ионной плотностью до  $n_i = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  в рабочем диапазоне давлений  $P = 1-50$  мТорр. Такие реакторы обладают цилиндрической формой технологических камер с одним или двумя оптическими портами небольшого, по сравнению с размером камеры, диаметра.

Конструктивные особенности реакторов накладывают ограничения на геометрию и количество ракурсов сканирования при получении томографических данных. В этих условиях сбор интенсивности вдоль лучей, охватывающих всю область обрабатываемой пластины, возможен только при веерной двухракурсной схеме сканирования.



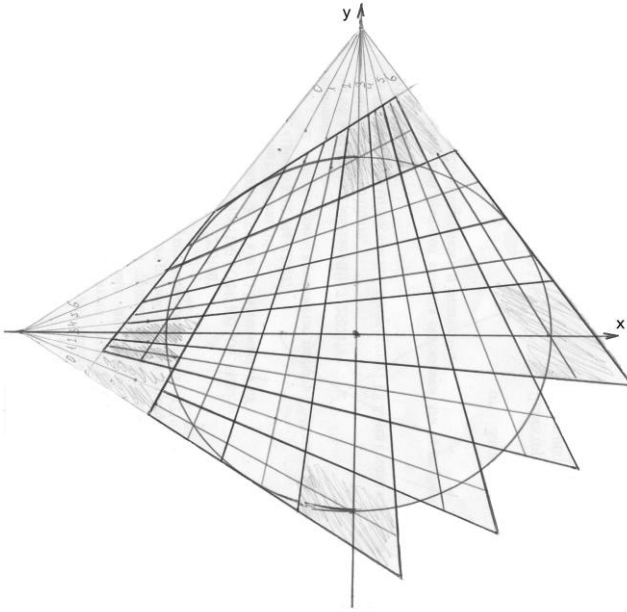


Рисунок 1. Геометрия системы регистрации исходных данных в веерном пучке.

Из-за недостатка ракурсов сканирования в данном случае необходимым является введение априорной информации об объекте исследования. Для реакторов НДР типа с удаленными источниками плазмообразования характерно отсутствие заметных внешних электромагнитных полей в зоне обработки пластины. В этой области происходит диффузионное растекание плазмы, генерированной в источнике. Поэтому логично положить в основу модели плазменных неоднородностей физически обоснованные механизмы растекания для каждого сорта частиц.

1. Двумерное распределение **незаряженных частиц** (свободных радикалов) определяется их диффузией, и локальная концентрация неоднородности, с большой степенью вероятности, может быть описана Гауссовым профилем:

$$F_1(x, y, x_p, y_p, A_p, \sigma_p) = A_p \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{\sigma_p^2}\right). \quad (2)$$

2. Пространственное распределение **заряженных частиц** в центральных областях реактора может быть описано параболической зависимостью – аналогично решению задачи о растекании заряженных частиц в плазменном шнуре [10]:

$$F_2(x, y, x_p, y_p, A_p, \sigma_p) = A_p \cdot \left(1 - \frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{\sigma_p^2}\right), \quad (3)$$

где  $\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} < \sigma_p$

3. Амбиполярная диффузия заряженных частиц в пристеночной области реактора может быть описана функцией Бесселя 1-го порядка [11].

$$F_3(x, y, x_p, y_p, A_p, \sigma_p) = A_p \cdot J_0 \left( \frac{\Lambda_0 \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}}{\sigma_p} \right), \quad (4)$$

где  $\left( \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} \right) / \sigma_p < \Lambda_0$ , где  $\Lambda_0$  – первый ноль функции Бесселя.

Предложенная модель концентрационного поля частиц в сечении реактора предполагает, что общее распределение частиц (ионов, нейтралов) можно представить в виде суммы однородного распределения частиц (фон) и суперпозиции конечного числа единичных («элементарных») пространственных неоднородностей плотности частиц, которые могут быть описаны одним из выражений (2–4) в зависимости от их зарядового состояния. В случае незаряженных частиц элементарные неоднородности не взаимодействуют друг с другом, для заряженных частиц этим взаимодействием, в первом приближении, можно пренебречь, что позволяет использовать их аксиальную симметрию.

Очевидно, что корректное применение той или иной функции профиля пространственной неоднородности требует спектрального разрешения данных в методе эмиссионной томографии и идентификации регистрируемых компонентов плазмы (нейтралы, ионы).

Таким образом, вместо реконструкции значений произвольной функции плотности частиц  $f(x, y)$  в различных точках сечения реактора ее можно заменить суперпозицией однородного фона с надстроенными «элементарными» неоднородностями с параметрами: амплитуда пиков  $A_{p\_i}$ , ширина  $\sigma_{p\_i}$  и положение  $(x_{p\_i}, y_{p\_i})$ , тем самым уменьшая количество неизвестных в значительно недоопределённой обратной задаче малоракурсной томографической реконструкции.

Идея вновь предложенного алгоритма состоит в том, что по исходным томографическим данным (лучевым суммам) проводится начальная реконструкция одним из классических методов. Из реконструированного поля интенсивности вычленяется однородный фон, и последовательно экстрагируются параметры «элементарных» неоднородностей, начиная с пика максимальной амплитуды. В процессе выделения «элементарных» неоднородностей проводятся итерации их параметров с целью минимизации

погрешности в исходных лучевых суммах. Процесс выделения элементарных неоднородностей повторяется до исчерпания наперед заданного динамического диапазона.

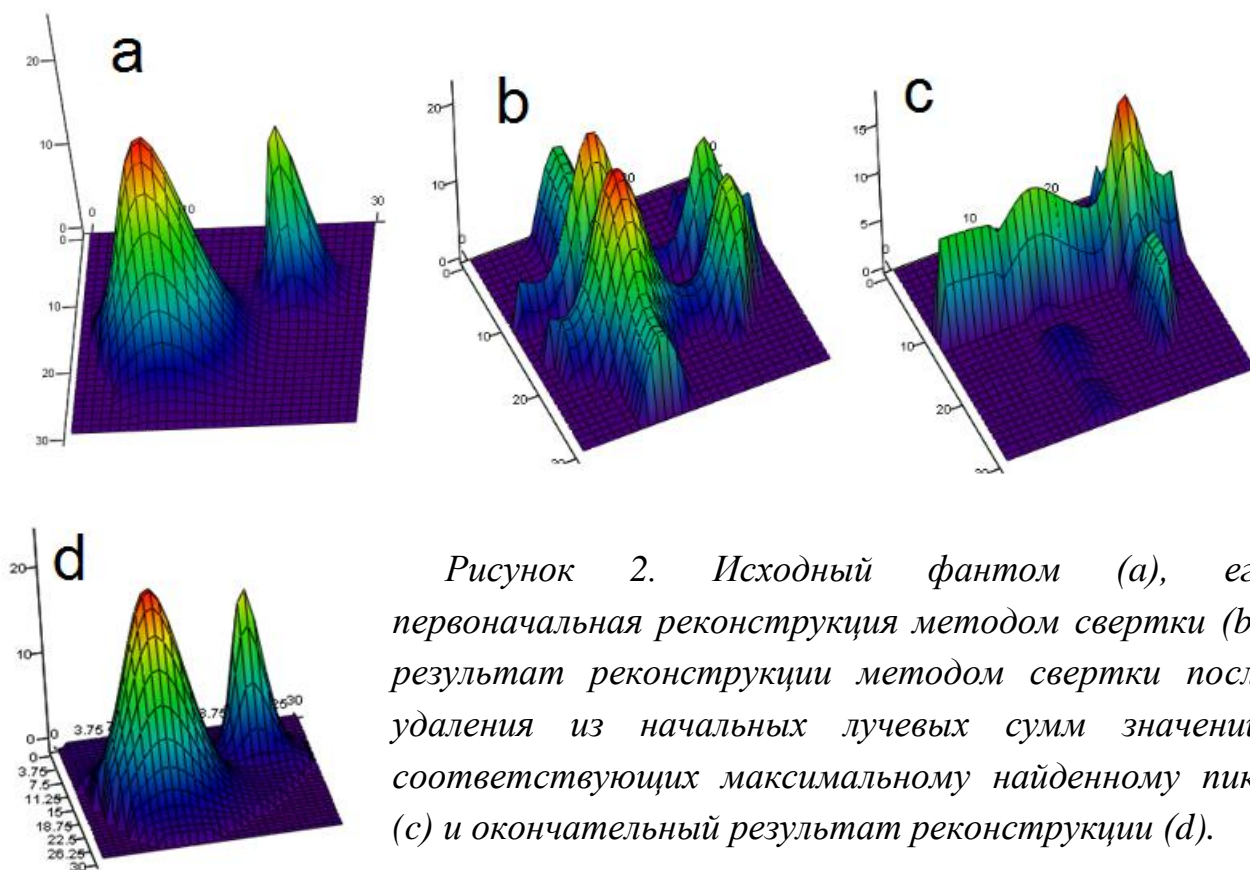
На параметры реконструируемых элементарных неоднородностей (пиков) накладываются ограничения, исходя из физической природы плазмы и экспериментальных ограничений методов измерения томографических данных:

- Амплитуда определяемых пиков не должна быть ниже уровня шума исходных данных (динамического диапазона эксперимента).

- Ширина пиков  $\sigma_{p\_i}$  не должна быть меньше диффузионной длины пробега частиц в плазме, а также превышать характерного размера реактора.

Таким образом, в математический алгоритм реконструкции вводится априорная информация об объекте.

Проведенное в данной главе исследование классических алгоритмов реконструкции в применении к задаче двухракурсной томографии, показало, что в качестве начальной реконструкции лучшие результаты показывают методы свертки и максимума энтропии.



При исследовании работы алгоритма с предлагаемой моделью неоднородностей было установлено, что при вычитании из начальных лучевых сумм вклада, даваемого экстрагированным пиком, повторная реконструкция

сформированных данных лучевых сумм приводит к частичному удалению артефактов, порожденных вычтенным пиком (Рис.2). Причем, эффект тем значительнее, чем точнее определены параметры выделяемого пика.

С учетом обнаруженного эффекта исчезновения (уменьшения) артефактов томограммы был предложен следующий окончательный алгоритм реконструкции:

*Шаг 1. Определение фона  $F_f$ .*

- Определение минимального значения отношения лучевой суммы  $p_i$  к длине соответствующего луча  $d_i$ .  $F_f = \min(p_i / d_i)$
- Вычитание лучевых сумм, соответствующих фону из исходных лучевых сумм.  $p'_i = p_i - F_f d_i$

*Шаг 2. Определение параметров наибольшего по амплитуде пика.*

- Первоначальная реконструкция данных по лучевым суммам  $p'_i$  одним из классических методов (свертка, максимум энтропии).
- Определение амплитуды максимального пика  $A_i$ , его ширины  $\sigma_i$  и координаты вершины  $(x_i, y_i)$ .

*Шаг 3. Удаление из набора томографических данных максимального по амплитуде пика.*

- Составление лучевых сумм  $p_{p\_i}$ , соответствующих пику, параметры которого были найдены на предыдущем шаге.
- Вычитание из свободных от фона лучевых сумм  $p'_i$  лучевых сумм  $p_{p\_i}$  соответствующих максимальному по амплитуде пику  $p''_i = p'_i - p_{p\_i}$ , т. е. вклада этого пика в исходные данные.

*Шаг 4. Проверка условия дальнейшего определения параметров пиков.*

- Реконструкция данных, по лучевым суммам  $p''_i$  одним из классических методов (свертка, максимум энтропии) и определение амплитуды максимального пика  $A_i$ .
- Если амплитуда вновь найденного пика меньше установленного значения (определяется заданной амплитудой шума), то дальнейшее определение параметров пиков прекращается и происходит переход на Шаг 5.

- Если амплитуда найденного пика больше установленного значения, то лучевые суммы  $p'_i$  заменяются на  $p''_i$  и осуществляется переход на Шаг 2.

*Шаг 5. Последовательное итерационное улучшение параметров всех найденных пиков с целью минимизации среднеквадратичного отклонения в значениях лучевых сумм, составленных по найденным пикам  $p_{p\_i}$ , от лучевых сумм  $p'_i$ .*

Показано, что учет ослабления интенсивности, как функции расстояния от излучающей частицы (точечного источника), в методе максимума энтропии, значительно уменьшает ошибку реконструкции.

Также было показано, что учет конечного размера апертуры детектора и угла сбора излучения сканирующих датчиков незначительно влияет (ошибка менее 2%) на точность получения лучевых сумм. В связи с чем, при реализации алгоритма реконструкции допускается использование формул абсорбционной рентгеновской томографии, где предполагается бесконечно тонкий не расходящийся луч.

**В главе 3** приведены результаты оптимизации алгоритма, которая проверялась на его применении к статистически большому числу случайных томографических фантомов. Также приведены результаты проверки алгоритма на физической модели в виде пространственных источников света в геометрии, повторяющей геометрию камеры плазмохимического реактора.

На рис.3. изображена гистограмма, описывающая долю реконструируемых фантомов как функцию ошибки реконструкции  $error_f$ , с которой указанные фантомы были реконструированы.

$$error_f = \sqrt{\frac{\sum \sum (F_{i,j}^{fantom} - F_{i,j}^{reconstruction})^2}{\sum \sum (F_{i,j}^{fantom})^2}} \cdot 100\% , \quad (5)$$

где  $F_{i,j}^{fantom}$  и  $F_{i,j}^{reconstruction}$  – значение в центре  $(i, j)$  ячейки фантома до и после реконструкции.

Как можно видеть из рисунка, у неоптимизированного алгоритма только в 57% случаев погрешность реконструкции составила менее 15%. В оставшихся случаях результат реконструкции оказывался хуже, и в 10% случаев погрешность реконструкции превышала 30%.

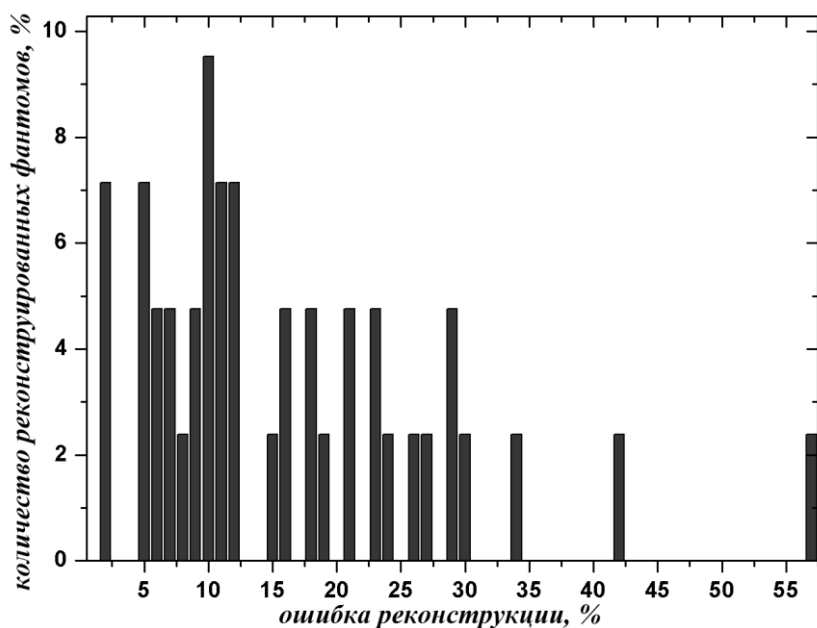


Рисунок 3. Гистограмма, описывающая качество реконструкции базовым алгоритмом фантомов, состоящих из четырех Гауссовых пиков со случайным образом заданными параметрами.

Исследование фантомов, погрешность реконструкции которых превышала 15%, выявил ряд недостатков работы базового алгоритма.

Было обнаружено, что при определенном соотношении параметров пиков и их расположении относительно ракурсов сканирования неверно определялись значение фона и амплитуда максимального в фантоме пика. Результат реконструкции существенно зависел от выбора метода первичной реконструкции, а также от особенностей итерационного процесса. Для некоторых фантомов срабатывало условие остановки итераций по относительной погрешности в лучевых суммах, несмотря на то, что абсолютное значение погрешности в лучевых суммах  $error_p$  оставалась еще достаточно велико.

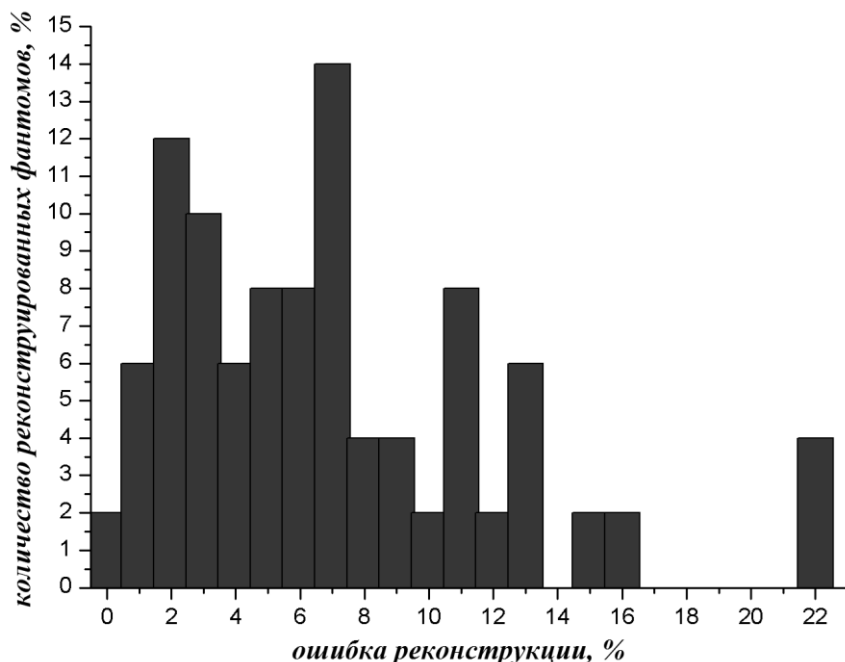
$$error_p = \frac{\sum_i (p_i - p_i')^2}{\sum_i (p_i)^2}, \quad (6)$$

где  $p_i$  и  $p_i'$  – истинная и реконструированная лучевые суммы для  $i$  – ого луча.

Проведенная оптимизация базового алгоритма привела к тому, что была:

- повышена точность определения фона,
- оптимизирован поиск максимального по амплитуде пика,
- оптимизированы принципы итерационных вычислений,
- был введен контроль максимальной невязки в лучевых суммах.

В результате оптимизации был создан и исследован окончательный алгоритм, хорошо себя проявляющий при реконструкции большинства фантомов (рис. 4), построенных в соответствии с моделью плазменных неоднородностей.



*Рисунок 4.  
Гистограмма,  
описывающая качество  
реконструкции  
оптимизированным  
алгоритмом фантомов,  
состоящих из четырех  
Гауссовых пиков со  
случайным образом  
заданными  
параметрами.*

В дальнейшем, предложенный алгоритм реконструкции был опробован на физической модели в виде трех пространственно-протяженных источников света в геометрии, повторяющей геометрию камеры плазмохимического реактора. Результат реконструкции показал согласие в определении положения источников света, а также в соотношении их интенсивностей.

**В главе 4** изложены результаты верификации предлагаемого алгоритма, которая включала данные прямого экспериментального исследования двумерного распределения ионов аргона, а также проведено томографическое исследование латерального распределения химически активных радикалов  $F^*$  и ионов  $B^+$  в технологической плазме газа  $BF_3$  в камере экспериментального плазменно-иммерсионного имплантера с удаленным планарным индуктивным ВЧ источником плазмы. Для создания в ней явных плазменных неоднородностей (с целью изучения возможностей томографического метода исследований) конструкция камеры модифицировалась, и условия разряда также варьировались.

Для верификации оптимизированного алгоритма эмиссионной томографии в реальных условиях на первом этапе был поставлен численный эксперимент, где в качестве объекта исследования была выбрана ионная компонента плазмы

аргона. В данном эксперименте реальное распределение плотности частиц  $Ar^+$  в сечении реактора измерялось с помощью инструментальной пластины с датчиками в виде плоских зондов Ленгмюра. Расчет ожидаемого поля интенсивности излучения  $Ar^+$   $f(x, y)$  проводился на основе данных экспериментально полученного распределения плотности ионов. Расчетное поле интенсивности давало возможность сформировать лучевые суммы в выбранной схеме томографического сканирования.

Такая постановка вычислительного эксперимента исключала из процедуры верификации математического алгоритма томографической реконструкции неизбежные погрешности аппаратного накопления исходных томографических данных системой оптического сканирования, и давала возможность оценить собственную погрешность алгоритма реконструкции.

Эксперимент проводился при различных давлениях в камере реактора, а также при изменении геометрии пристеночного магнитного поля. В результате верификации было показано, что данный алгоритм дает качественно верное двумерное пространственное распределение ионов аргона по сечению реактора во всех исследуемых случаях. Количественное несоответствие между работой алгоритма эмиссионной томографии и прямыми экспериментальными результатами, полученными зондовым методом, не превосходит 6%.

Результаты численного эксперимента показывают, что латеральная неоднородность плазмы  $Ar^+$  вблизи поверхности пластины, в самом наихудшем случае, не превышает 8,5%. Нарушение настроек пристеночного магнитного поля является весьма чувствительным для однородности пространственного распределения ионов  $Ar^+$  по сечению реактора в целом, а не только в его периферийных зонах.

Заключительной частью работы являлось экспериментальное исследование плазмы  $BF_3$  разработанным методом двухракурсной спектральной эмиссионной томографии. Для этого был применен томографический комплекс на основе двухканального акустооптического спектрометра «Кварц-2000». Использование метода актинометрии позволило реконструировать латеральное распределение концентрации как ионной компоненты плазмы – ионов  $B^+$ , так и незаряженных радикалов  $F^*$ .

Для исследования возможностей томографического алгоритма эксперимент проводился при различных значениях давления в камере реактора, с различными системами ввода газа, вводились искусственные неоднородности пристеночного магнитного поля, а также исследовалось влияние наличия кремниевой пластины на латеральное распределение частиц. Результаты



реконструкции качественно отражают физически ожидаемый вид латерального распределения концентрации частиц плазмы.

Характеристикой неоднородности плазмы считалась средняя концентрация частиц  $n = \langle n \rangle$ , а также относительная неоднородность  $\varepsilon$  распределения частиц в области, нахождения пластины:

$$\varepsilon = \frac{\langle n_{sd} \rangle}{\langle n \rangle} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где  $\langle n \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$  - среднее значение концентрации частиц по ячейкам сетки N,

$$\langle n_{sd} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \langle n \rangle)^2} - \text{среднеквадратичное отклонение в значении}$$

концентрации частиц по ячейкам сетки N.

Ниже приведены примеры, демонстрирующие возможности разработанного двухкурсного томографического метода реконструкции плазменных неоднородностей.

На рисунке 5 показано влияние искажения пристеночного магнитного поля на латеральное распределение ионов бора. На рисунке 5а при малых давлениях в камере хорошо виден пик концентрации ионов, соответствующий проекции дополнительного асимметричного газового ввода. Искажение пристеночного магнитного поля осуществлялось с помощью помещения постоянного магнита на стенку реактора. Из рисунка видно, что магнитное поле оказывает существенное влияние на распределение ионов бора. Т.к. магнит помещался с противоположенной стороны от газового ввода, то распределение ионов бора стало более центрально симметричным, что привело к повышению однородности в распределении ионов бора.

На рисунке 6 показано влияние загрузки реактора пластиной на распределение радикалов  $F^*$ . Кремниевая пластина является стоком для атомов  $F$ , поэтому добавление ее в камеру реактора приводит как к понижению концентрации фтора, так и к повышению аксиальной симметрии латерального распределения радикалов  $F^*$ .

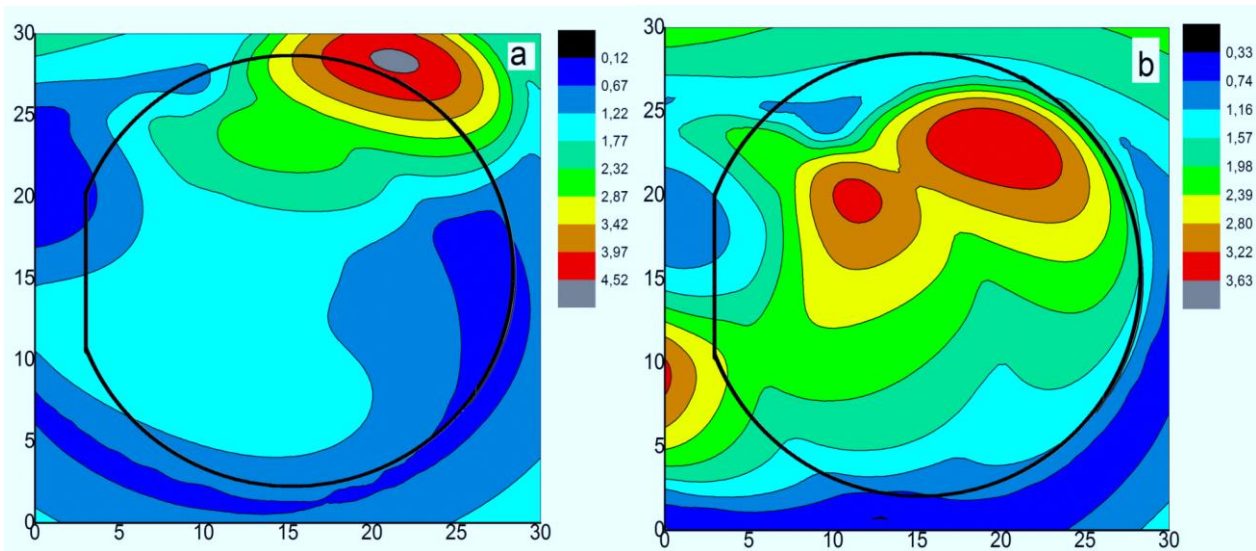


Рисунок 5. Латеральное распределение ионов бора при асимметричном газовом вводе (a) и влияние на него добавления постоянного магнита (b,) помещенного на стенку реактора, давление в камере 2 мТорр. a-( $n=1,47$ ;  $\varepsilon=48\%$ ); b-( $n=2,1$ ;  $\varepsilon=32\%$ ). Используется асимметричный газовый ввод.

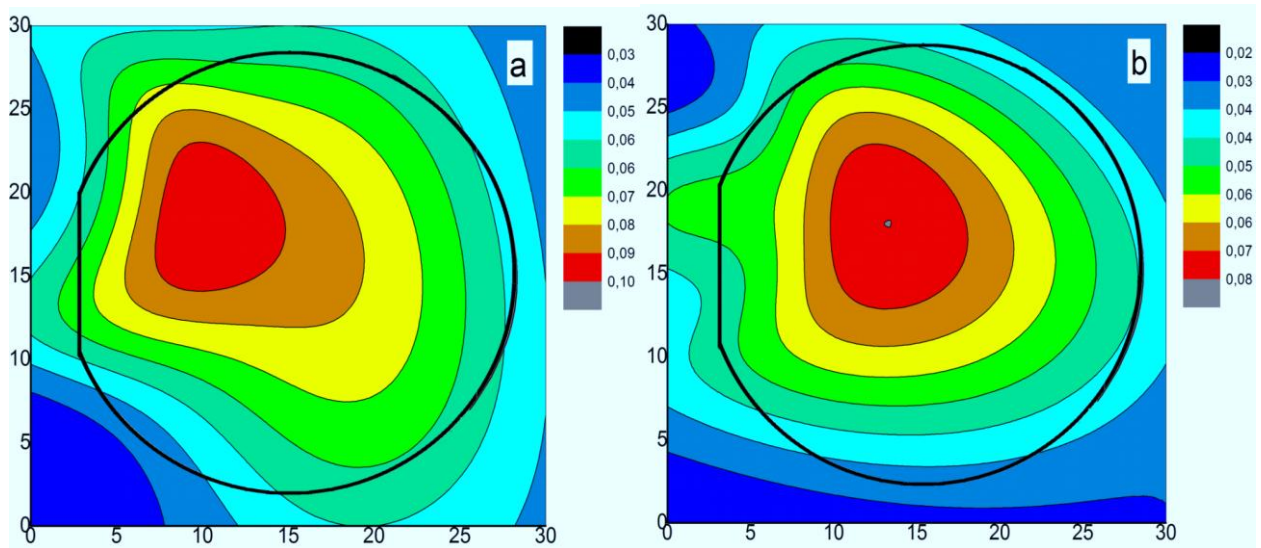


Рисунок 6. Исходное распределение концентрации атомов фтора по сечению реактора (a) и влияние на него кремниевой пластины, помещенной в реактор (b), давление в камере 6 мТорр. a-( $n=0,073$ ;  $\varepsilon=19\%$ ); b-( $n=0,056$ ;  $\varepsilon=20\%$ ).

Седловина в поле концентрации, которая наблюдается на рис. 5b, может быть связана: во-первых, с ограниченностью модели, представляющей любую плазменную неоднородность в виде конечного числа одиночных пиков; а, во-вторых, - увеличением погрешности при делении двух полей интенсивности – частицы и актинометра.

В **заключение** диссертации изложены основные выводы, составляющие научную новизну работы.

1. Предложена модель, согласно которой распределение частиц в низкотемпературной плазме можно представить в виде конечного числа единичных («элементарных») пространственных неоднородностей плотности частиц (одиночных пиков), надстроенных над однородным полем (фон). На основании модели был предложен, создан, исследован и оптимизирован алгоритм двумерной эмиссионной томографической реконструкции при двухракурсной веерной схеме сканирования.

2. Создано программное обеспечение, с помощью которого можно контролировать латеральную неоднородность, как ионов, так и свободных радикалов плазмы по ее эмиссионному излучению. Данный алгоритм был апробирован на статистически большом множестве математических фантомов. Было установлено, что для 80% случайных фантомов погрешность реконструкции не превышает 15%.

3. Проведен модельный эксперимент в геометрии плазмохимического реактора по реконструкции положения трех источников света с переменной интенсивностью и расположением. Реконструкция лучевых сумм, снятых томографическим комплексом в веерной геометрии, показала верное расположение: как источников света, так и соотношения их интенсивностей.

4. Проведена верификация алгоритма реконструкции в численном эксперименте на плазме аргона. Латеральное распределение ионов аргона было реконструировано по лучевым суммам, построенным на основе экспериментальной информации о распределении латеральной ионной плотности в плазме, измеренной зондовыми методами. Результаты реконструкции качественно отражают физически ожидаемый вид латерального распределения концентрации частиц плазмы.

5. Двухракурсной эмиссионной томографией исследовано двумерное распределение ионов  $V^+$  и нейтральных радикалов  $F^*$  в плазме  $VF_3$ . Эксперимент проводился при различных условиях в камере реактора. Дана физическая интерпретация реконструированного распределения концентрации частиц плазмы.

В **приложении** приведены коды программы томографической реконструкции на языке C++, отражающие основные элементы предлагаемого алгоритма.

## Публикации автора по теме диссертации

A1. Rudenko K.V., **Fadeev A.V.**, Orlikovsky A.A., Valiev K.A. Tomographic reconstruction of space plasma inhomogeneities in wide aperture plasma technology equipment under strong restriction on the points of view // Proc. of International Conf. "Micro- and nanoelectronics", Zvenigorod, p. P1-49 (2003).

A2. Rudenko K.V., **Fadeev A.V.**, Orlikovsky A.A. and Valiev K.A. Tomographic reconstruction of space plasma inhomogeneities in wide aperture plasma sources under strong restriction on the points of view // Proc. of International Conf. Intern. Conf. "Micro- and nanoelectronics" ", Zvenigorod, v. 5401, pp. 79-85 (2004).

A3. K.V. Rudenko, **A.V. Fadeev**, A.A. Orlikovsky, K.A. Valiev The study of radical density distribution in plasma etchers by emission tomography technique // Proc. of 16<sup>th</sup> International Vacuum Congress, Book 2, Page 896 , June 28 – July 2, Venice, Italy (2004).

A4. Rudenko K.V., **Fadeev A.V.**, Averkin S.N., Rudenko M.R., Tyurin I., Rylov A.A., Orlikovsky A.A. Investigation of plasma uniformity in processing chambers of plasma tools for microelectronics by computer-aided tomography. Proc. of Intern. Conference on Micro- and Nanoelectronics – 2007, Book of Abstracts, p.O2-16 (2007).

A5. **Fadeev A.V.**, Rudenko K.V., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A. Emission Tomography Algorithm Optimization: Applications for Microelectronic Plasma Equipment. // Proc. of Intern. Conference on Micro- and Nanoelectronics – 2009, Book of Abstracts, p. P2-37 (2009).

A6. Аверкин С.Н., Аверкина Т.И., Валиев К.А., Кабановский А.С., Наумов В.А., Орликовский А.А., Руденко К.В., Рылов А.А., Суханов Я.Н., **Фадеев А.В.** Плазменно-иммерсионный имплантер для формирования супермелкозалегающих р-п переходов // Труды Всероссийской конференции «Микро- и нано- электроника 2001», Звенигород, т. 1, с О1-5 (2001).

A7. Rudenko K.V., **Fadeev A.V.**, Orlikovsky A.A. and Valiev K.A. Tomographic reconstruction of space plasma inhomogeneities in wide aperture plasma sources under strong restriction on the points of view // Proc. of SPIE v. 5401 (SPIE, Bellingham, WA, 2004), pp. 79-85 (2004).

A8. Руденко К.В., **Фадеев А.В.**, Орликовский А.А. Малоракурсная 2D-томография пространственных неоднородностей плазмы в технологических реакторах микроэлектроники // Труды ФТИАН «Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника», т. 19, с. 208 – 218 (2005).

А9. Аверкин С.Н., Валиев К.А., Мяконьких А.В., Орликовский А.А., Руденко К.В., Рылов А.А., Тюрин И.А., **Фадеев А.В.**, Юрков А.Е. Разработка низкотемпературных плазмохимических процессов и серии плазменных установок для микро- и нанотехнологий // Труды ФТИАН «Квантовые компьютеры, микро- и нано-электроника», т. 19, с. 121 – 137 (2005).

А10. **Фадеев А.В.**, Руденко К.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А. Эмиссионная томография плазмы в технологических реакторах микроэлектроники // Микроэлектроника, т.38, № 2, с. 107-121 (2009).

А11. **Фадеев А.В.**, Руденко К. В., Лукичев В. Ф., Орликовский А. А. Оптимизация томографического алгоритма реконструкции плазменных неоднородностей в технологических реакторах микроэлектроники // Микроэлектроника, т. 40, № 2, с. 1–11 (2011).

А12. **Фадеев А.В.**, Руденко К.В., Верификация алгоритма эмиссионной томографии плазменных неоднородностей в плазмохимическом реакторе с помощью ленгмюровского мультизонда // Микроэлектроника, т.43, № 4, с.256-262 (2014).

А13. **Фадеев А.В.**, Руденко К.В., Исследование латерального распределения частиц  $BF_3$  плазмы с помощью двухракурсной эмиссионной томографии // Микроэлектроника, т.43, № 6, с.435-440 (2014) (принята в печать).

### Список цитируемой литературы

1. 450 mm Equipment Performance Metrics. ISMI/SEMATECH Revision 2 IST Final Review 0309, <http://ismi.sematech.org/research/450/> (2009).

2. Руденко К.В., Суханов Я.Н., Орликовский А.А. Диагностика *in situ* и управление плазменными процессами в микроэлектронной технологии / Раздел V, Гл. 1, в кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы» / Под ред. Ю.А. Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова. М., Изд. «Янус-К», т. XII-5, с. 381 - 436. (2006).

3. Bechu S., Boisse-Laporte C., Leprince P., Marec J. Homogeneity characterization of large microwave plasma // J. Vac. Sci. Technol. A, v.15, no. 3, pp. 668 - 672 (1997).

4. Beale D.F., Wendt A.E., Mahoney L.J. Spatially resolved optical emission for characterization of a planar radio frequency inductively coupled discharge // J. Vac. Sci. Technol. A, v.12, no. 5, pp. 2775 - 2779 (1994).

5. Steffens K.L., Sobolewski M.A. Planar laser-induced fluorescence of  $\text{CF}_2$  in  $\text{O}_2/\text{CF}_4$  and  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{F}_6$  chamber-cleaning plasmas: Spatial uniformity and comparizon to electrical measurements // J. Vac. Sci. Technol. A, v.17, no. 2, pp. 517 - 527 (1999).
6. Okigawa A., Tadakoro M., Itoh A, Nakano N., Petrovic Z. Lj., Makabe T. Three Dimensional Optical Emission Tomography of an Inductively Coupled Plasma // Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, v. 36, no. 7B, pp. 4605-4616 (1997).
7. Пикалов В.В., Мельникова Т.С. Томография плазмы / Новосибирск, «Наука», (1995).
8. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. / Москва, «Мир», 352 с. (1983).
9. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы / Москва, «Физматлит», 471с. (2006).
10. Liberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing / New York, by JOHN WILEY & SONC, INC, 572p. (1994).
11. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы / Москва, «Атомиздат», 384с. (1977).