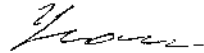


На правах рукописи

УСАТОВ ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ



**УСТРОЙСТВО РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ И  
ВТОРИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
КОМПЛЕКСА ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДА УСТАНОВОК  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

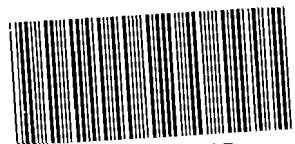
Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

12 ДЕК 2013

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2013



005543348

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Царьгородцев Юрий Петрович**

Официальные оппоненты:

**Пушкин Николай Моисеевич**, доктор технических наук, НПО Измерительной техники, заместитель главного конструктора  
**Снедков Александр Борисович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», заведующий кафедрой ПР-1

Ведущая организация:

**ФГУП НПП «Исток»**

Защита состоится “ 25 “ декабря 2013 г. в *11* часов на заседании диссертационного совета Д212.146.04 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса» по адресу: 141005, Мытищи-5, Московской области, 1-я Институтская ул., д.1, МГУЛ, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МГУЛ.

Автореферат разослан “ *21* “ ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Тарасенко П.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Технология производства наноматериалов является быстро развивающейся областью исследований и охватывает множество дисциплин: физику и химию, электронику, материаловедение и физику твердого тела и ряд смежных дисциплин техники. Область исследований в этом направлении постоянно расширяется и охватывает уже не только и не столько фундаментальные научные разработки, но и промышленные применения наноструктур в различных сферах, от электроники до медицины.

Термин «наноструктуры» в настоящее время применяется в достаточно широком смысле, а именно там, где нанометровый размер объекта определяет ключевые свойства в данном приложении. Разнообразие наноструктурных объектов на сегодняшний день очень велико. В настоящей работе речь идет в основном о тонких пленках, получаемых методом физического распыления, так называемый PVD метод. В данном методе в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке.

Кроме микроэлектроники и оптики, развитие пленочных технологий стимулировали исследования в области материаловедения. В частности, использование пленок оксидов, нитридов и карбидов на поверхности ответственных деталей машин кардинально повышает их твердость, износостойкость и коррозионную устойчивость, зачастую недостижимые иными способами.

Начиная с 80-х годов интенсивно исследуются так называемые источники высокоплотной плазмы (терминология относится к области плазменных технологий). Эти источники создают плазму с концентрацией более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup> в объеме нескольких литров. Получение пленок в таких установках стимулируется большими потоками ионов, что позволяет получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокие адгезия, прочность, теплопроводность, износостойкость). Плазма таких источников является существенно неравновесной. Как следствие, процесс образования пленок также существенно неравновесный, что и является одной из причин уникальности их свойств.

Совершенно очевидно, что существует определяющая связь между структурой пленки и параметрами осаждения. И хотя эта связь исследуется давно, многие ее аспекты остаются совершенно не ясными. Ясно одно, что понимая механизмы образования пленки, можно создавать их с заданной микро-и-наноструктурой для специальных технологических применений. Эти механизмы, в свою очередь, определяются параметрами плазмы, в которой происходит формирование наноструктур.

Восстановление комплекса параметров плазмы является актуальной задачей по крайней мере по двум причинам. Во-первых, для управления процессами плазменного осаждения структуры на базе того или иного типа установок; во-вторых, с целью исследования механизмов образования наноструктур с заданными свойствами, коррелированными с параметрами

осаждения. Данные измерения относятся к разряду косвенных и методически сложных, а алгоритмы обработки данных предполагают использование достаточно нетривиальных моделей. Поэтому измерения эти, в особенности комплексные, практически невозможно осуществить без применения вычислительных средств. На это указывает относительно малое число отечественных и зарубежных публикаций на эту тему.

**Цель работы** - разработка и программно-аппаратная реализация устройства регистрации и обработки информации для восстановления комплекса параметров разряда установок, используемых для осаждения наноструктурных пленок. Предполагаются следующие характеристики плазмы:

- концентрация электронов и ионов –  $(10^9 \dots 10^{12}) \text{ см}^{-3}$ ;
- температура электронов –  $(1 \dots 10) \text{ эВ}$ ;
- температура атомов и ионов  $< 0,5 \text{ эВ}$ ;
- рабочее давление буферного газа –  $(0,3 \dots 10) \text{ мТорр}$ ;
- мощность в разряде – до  $12 \text{ кВт}$ .

В работе представлено описание аппаратной и программной частей устройства обработки информации, описание моделей, методов и алгоритмов, на основе которых производится восстановление параметров, приведены методы и результаты проверки и калибровки системы, а также результаты измерений в плазме магнетрона с полым катодом при различных параметрах разряда.

#### **Задачи работы**

1. Разработка и реализация аппаратной части и управляющей программы для регистрации вольтамперных характеристик одиночных зондов Ленгмюра, функционирующих в плазме с указанными выше параметрами, в том числе содержащей атомы и ионы металла.
2. Разработка алгоритмов и программ восстановления из зондовых вольтамперных характеристик следующих параметров плазмы:
  - потенциала плазмы;
  - плавающего потенциала;
  - температуры электронов;
  - функции распределения электронов по энергиям;
  - средней по ансамблю температуры электронов;
  - концентрации электронов и ионов в плазме.
3. Разработка датчика (первичного преобразователя), аппаратного и программного обеспечения системы измерения тепловых потоков в плазменном разряде, в том числе в присутствии атомов и ионов металла.
4. Разработка электронно-оптического метода определения степени ионизации потока распыленных атомов металла, а также реализующих его датчика, алгоритмов и программ.
5. Проверка разработанного программно-аппаратного комплекса при измерениях параметров плазмы в магнетронном разряде с полым катодом.

#### **Методика исследований**

При анализе методов диагностики плазмы использовались основные положения и результаты теории газового разряда и низкотемпературной

плазмы. Рассмотрение зондовых методов диагностики, моделирование вольтамперных характеристик и разработка алгоритмов расчета параметров плазмы проводилось в рамках моделей электростатических и тепловых зондов, базирующихся на уравнениях математической физики и решаемых численными методами. Проектирование аппаратной части устройства измерений проводилось методами полупроводниковой схемотехники и оптоэлектроники с учётом основных положений теории измерений. Разработка программной части системы осуществлялась методами математического программирования. Здесь использовались: теория сплайн-функций, методы фильтрации дискретных сигналов (КИХ-фильтр Савицкого-Голая), методы нелинейной аппроксимации (в частности метод Левенберга-Марквардта) и специфические методы теории плазмы.

Предложенный метод определения степени ионизации атомов металла основан на теории взаимодействия электромагнитного излучения с тонкими пленками.

### **Научная новизна**

Разработано и реализовано устройство регистрации и обработки информации для восстановления комплекса параметров плазмы, использующее три типа первичных преобразователей: электростатические зонды, датчики теплового потока и электронно-оптический датчик степени ионизации потока атомов металла. Совместное использование трех методов измерения позволяет не только повысить уровень достоверности и надежности результатов, но и проводить измерения концентрации ионов распыляемого металла, - важного параметра плазмы, который невозможно измерить в рамках каждого из трех отдельно взятых методов. В системе зондовых измерений используются алгоритмы, основанные на пяти моделях электростатического зонда, что также повышает уровень достоверности результатов.

Разработан электронно-оптический метод измерения степени ионизации потока атомов металла в плазме, характеризующийся сравнительной простотой и низкой стоимостью аппаратных и программных средств. Его реализация включает в себя аппаратную часть электронно-оптических измерений, алгоритмы и программы обработки.

Посредством разработанного устройства регистрации и обработки проведены несколько серий измерений в плазме магнетронного разряда с полым катодом, а результаты приведены в работе.

**Достоверность результатов** обеспечивается: применением в составе устройства современных средств регистрации электрических сигналов; корректным использованием сразу нескольких моделей обработки вторичной информации, не противоречащих основным положениям теории газового разряда; корректным применением математического аппарата обработки данных; комплексным использованием, по крайней мере, трех практически независимых методов измерения параметров разряда; хорошим совпадением результатов измерений соискателя с результатами других авторов, полученных ими в аналогичных условиях; хорошей повторяемостью результатов при измерении в плазме с фиксированными параметрами.

### **Практическая значимость**

Разработанное устройство ориентировано на применение в плазменных установках для определения параметров разряда. Указанные измерения могут проводиться как с исследовательской целью, так и в целях контроля того или иного процесса получения материалов. Система обладает высокой эффективностью (в смысле возможности определения всех основных параметров плазмы с достаточной точностью) при сравнительно низкой стоимости аппаратных средств. Детальное описание конструкции датчиков, аппаратных средств, методов, алгоритмов и программ достаточно для воспроизводства данного комплекса в условиях более-менее оснащенной исследовательской или технологической лаборатории. Автоматизированная система измерений построена таким образом, что позволяет, в том числе, проводить некоторый объем вычислительных экспериментов с данными первого уровня в исследовательских целях. Удобный и понятный интерактивный интерфейс, возможность запуска программ из сервера виртуальных приборов, позволяют работать с системой исследователю, не обладающему навыками профессионального программиста.

### **Апробация результатов исследования**

Результаты работы прошли апробацию на научных конференциях: 5-я Российская конференция по теплообмену, Москва, 2010; VII-я Международная НПК "Нанотехнологии производству 2010", Фрязино, 2010; 9-я Международная НПК «Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Санкт-Петербург, 2010; VI международная НПК «Информационные технологии в науке, технике и образовании». 20 сентября – 1 октября 2010, Пицунда; 12-й международная НПК «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Санкт-Петербург, 2011; Международной конференции «Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе», МГУЛ, 2012; НПК МГУЛ в 2010- 2013 гг., 11-я Всероссийская НПК «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, 2012.

### **Личное участие**

В ходе работы диссертант принимал непосредственное участие в моделировании процессов взаимодействия исследуемого объекта с первичными преобразователями; проектировании, изготовлении и калибровке первичных преобразователей (датчиков) аппаратной части устройства; разработке методов, алгоритмов и программ регистрации и обработки первичной и вторичной информации.

**Публикации.** Результаты диссертации изложены в 12 печатных работах (5 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для кандидатских диссертациях), в том числе 2 в иностранных журналах.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 82 наименований и приложения. В работе содержится 12 таблиц и 90 рисунка. Объем основной части работы – 183 страниц, объем приложения – 21 страниц.

### Научные результаты, выносимые на защиту

1. Алгоритмы, программы и аппаратные средства устройства обработки информации для восстановления параметров плазменного разряда, отличающиеся тем, что в целях повышения надежности и достоверности результатов позволяют проводить комплексные измерения в рамках нескольких методов, в том числе и в условиях металлической плазмы.
2. Электронно-оптический метод определения степени ионизации потока атомов металла в плазме, его алгоритмы, программная и аппаратная реализация в составе устройства.
3. Результаты восстановления пространственных распределений параметров плазмы в установке нового типа – магнетронного разряда с полым катодом.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Рассматриваются основные направления развития плазменных микро-и-нанотехнологий, как наиболее перспективных в данном технологическом секторе. Обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования.

#### Глава первая

Плазма, как объект измерений, представляет собой в общем случае неравновесную, многокомпонентную и неоднородную систему со множеством параметров. Поэтому измерения в плазме, всегда косвенные, сопровождаются техническими и принципиальными трудностями, главная из которых состоит в сложной связи измеряемых величин с параметрами плазмы. Установление этой связи требует выбора определенной плазменной модели. Её часто приходится формулировать априорно. Затем в рамках модели реализуют конкретный метод измерения и далее, интерпретируя результаты, контролируют адекватность принятой модели.

Методы диагностики по воздействию на исследуемый объект можно разделить на контактные и бесконтактные. Электростатические зонды – типичный пример контактного метода. В одиночном зонде имеется один электрод (цилиндрической или сферической формы) погруженный в плазму и соединенный с источником питания, так что зонд может находиться под различными потенциалами, как положительными, так и отрицательными, относительно плазмы. Процесс измерений заключается в регистрации тока в цепи зонда в зависимости от его потенциала. В качестве второго электрода, замыкающего цепь, используется чаще всего проводящая стенка плазменной камеры. Таким образом, измерения одиночным зондом – это регистрация вольтамперной характеристики (ВАХ) существенно нелинейной цепи «зонд – плазма».

Теория электрических зондов сложна тем, что поверхности зондов, как бы они ни были устроены, являются граничными по отношению к плазме. Вблизи зонда существует тонкий слой объемного заряда, называемый дебаевским, в котором возникают сильные электрическое поле. Это поле существенно определяет параметры движения частиц, собираемых зондом и, как следствие, вид вольтамперной характеристики зонда.

В главе проведен критический анализ нескольких моделей призондового

слоя (и их уравнений), а именно, Чайлда-Ленгмюра, Аллена – Бойда – Рейнольдса, Бернштейна – Рабиновича – Лафрамбойза, Чена и Шеридана. Четыре последние модели решались численными методами, и для практического использования результатов потребовалась их параметризация, варианты которой рассмотрены в главе. С целью повышения достоверности результатов выбраны все пять моделей в качестве рабочих, поскольку все они имеют определенные достоинства и адекватны параметрам разряда в определенных условиях.

Далее, в главе проведён анализ работы известных типов датчиков теплового потока и их математических моделей. Определены конструкции двух типов датчиков наиболее подходящих для работы в установках высокоплотной металлической плазмы,- стационарного датчика теплового потока и нестационарного калориметра.

Проведен обзор современных компьютерных аппаратных средств сбора данных и выбран оптимальный образец, соответствующий целям и задачам диссертационной работы,- плата сбора данных М-серии фирмы National Instruments.

Обоснован выбор среды программирования измерительного оборудования и приведены ее основные характеристики. Таковой является среда визуального программирования LabVIEW.

Рассмотрены некоторые зарубежные прототипы автоматизированных систем диагностики плазмы и публикации на эту тему.

Сформулированы этапы выполнения диссертационной работы и их содержание.

Приведена структурная схема разработанного устройства сбора и обработки информации (рисунок 1).

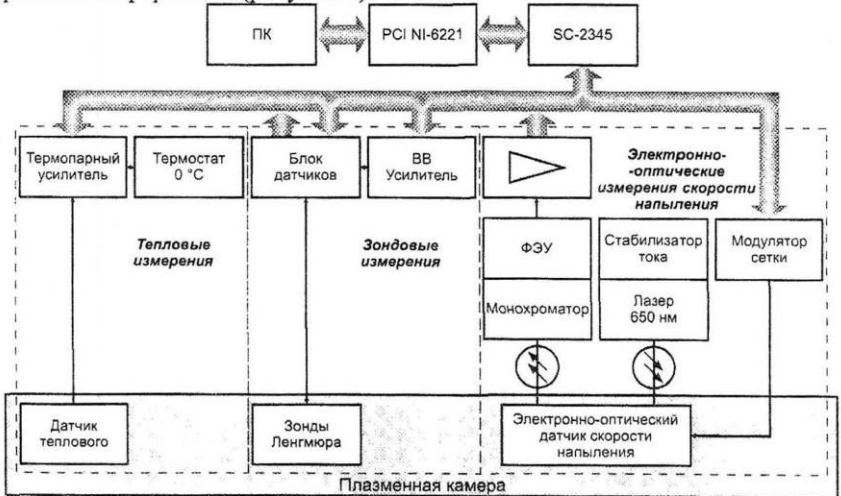


Рисунок 1 – Структурная схема устройства регистрации и обработки информации.



**Глава вторая** посвящена описанию подсистемы определения тепловых потоков, где применяется два типа датчиков теплового потока (ДТП).

Сформулированы специфические требования к ДТП, функционирующим в условиях высокоплотной металлической плазмы.

Приведены конструкция и описание разработанных в соответствии с требованиями по эксплуатации и изготовленных датчиков: один из которых стационарного теплообмена (рисунок 2),

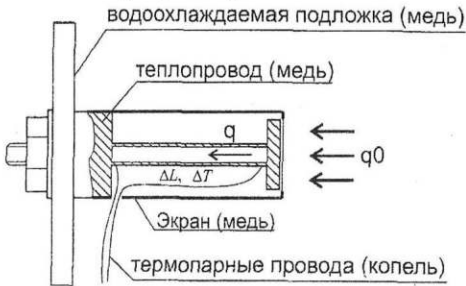


Рисунок 2 – Устройство стационарного ДТП.

а другой – нестационарный калориметр (рисунок 3).

Для обоих ДТП получены формулы расчета тепловых потоков из температурного хода этих датчиков и расчетные характеристики ДТП. Так, для стационарного ДТП тепловой поток  $q_0$  ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ) из плазмы определяется из соотношения

$$q_0 = K(S/S_0)(\Delta T/\Delta L), \quad (1)$$

где  $K$  и  $S$  – коэффициент теплопроводности и площадь сечения трубчатого теплопровода,  $\Delta T$  – разность температур теплопровода на расстоянии  $\Delta L$  между спаями дифференциальной термопары,  $S_0$  – площадь поверхности, воспринимающей тепловой поток. В нестационарном датчике расчет теплового потока производится по разности производных по времени температурного хода калориметрического тела на этапе нагревания (плазма включена) и охлаждения (плазма выключена):

$$q_0 = S^{-1} \cdot m \cdot c(T_h) \cdot \left[ \left( \frac{dT_h}{dt} \right)_H - \left( \frac{dT_h}{dt} \right)_{O_T} \right], \quad (2)$$

где  $T_h$  – температура тела-калориметра;  $c(T_h)$  – его удельная теплоемкость;  $m$ ,  $S$  – его масса и площадь соответственно.

Определена конфигурация аппаратной части подсистемы тепловых потоков. Рассмотрены принципиальная схема и описание усилителя сигнала термопар с гальванической развязкой между входом и выходом.

Приведено описание программной части подсистемы тепловых измерений в составе двух программ: регистрации температурного хода ДТП и вычисления тепловых потоков из данного температурного хода.

Разработана методика калибровки подсистемы тепловых измерений и произведена ее калибровка на специально изготовленном стенде.

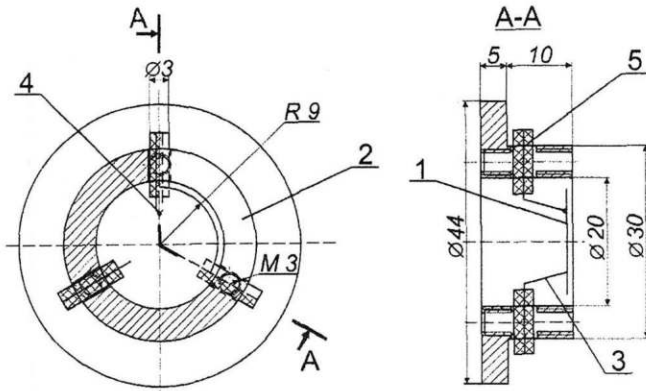


Рисунок 3 – Конструкция нестационарного датчика теплового потока.  
1 – диск-калориметр; 2 – охрannое кольцо; 3 – проволочки-растяжки (2 шт); 4 – термопара; 5 – керамические втулки (3 шт).

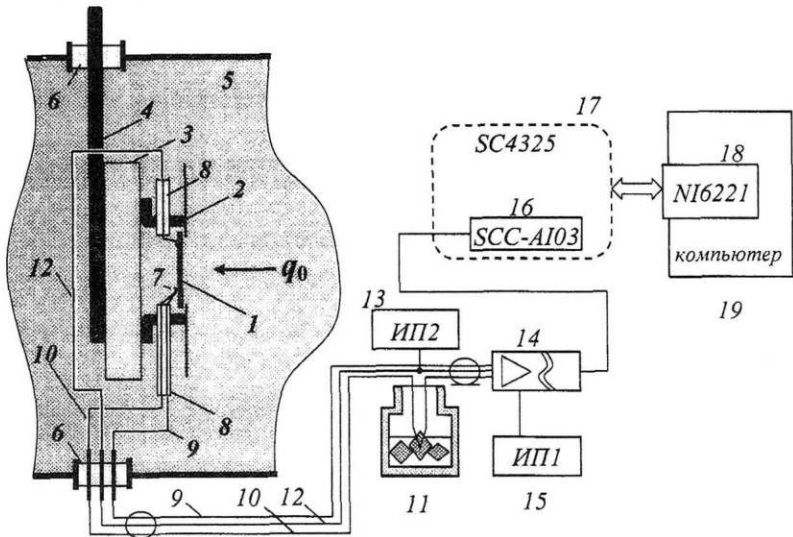


Рисунок 4 – Блок-схема аппаратной части подсистемы тепловых измерений.  
1 – калориметрическое тело ДТП, 2 – тепловой экран ДТП, 3 – водоохлаждаемая подложка, 4 – трубки охлаждения, 5 – плазма, 6 – вакуумные вводы, 7 – термопара ДТП, 8 – изоляторы, 9, 10 – провода термопары, 11 – сосуд Дьюара 0°C, 12 – провод подачи смещения, 13 – источник смещения, 14 – дифференциальный усилитель с гальванической развязкой, 15 – источник питания усилителя, 16 – модуль гальванической развязки, 17 – блок подготовки сигналов, 18 – плата сбора данных, 19 – компьютер.

Результаты калибровки и последующие натурные испытания (см. главу 6) показали, что разработанная подсистема восстановления тепловых потоков соответствует поставленным требованиям.

**Глава третья** посвящена описанию зондовой подсистемы, где в качестве первичных преобразователей применяются два типа электростатических зондов Ленгмюра, - цилиндрический и плоский. Она предназначена для восстановления следующих основных параметров плазменного разряда в диапазоне давлений  $p=(0.5..10)$  мТорр при вкладываемых мощностях до 12 кВт.

1. Плавающий потенциал  $V_f$  в диапазоне  $(-80..+80)$  В. Это потенциал, который приобретает электрически изолированное тело, помещенное в разряд.
2. Потенциал плазмы  $V_s$  в диапазоне  $(-50..+50)$  В. Это потенциал пространства плазменного разряда.
3. Функция распределения электронов по энергиям  $F(\varepsilon)$  в диапазоне энергий  $\varepsilon=(0..100)$  эВ.
4. Функция вероятностного распределения электронов по энергиям  $f_p(\varepsilon) = F(\varepsilon) \cdot \varepsilon^{-1/2}$  в диапазоне энергий  $\varepsilon=(0..100)$  эВ.
5. Максвелловская температура электронов  $T_e$  в диапазоне  $(1..10)$  эВ.
6. Средняя температура электронов в диапазоне  $(1..10)$  эВ.
7. Концентрация электронов  $N_e$  и ионов  $N_i$  в диапазоне  $(10^9..10^{12})$  см<sup>-3</sup>.

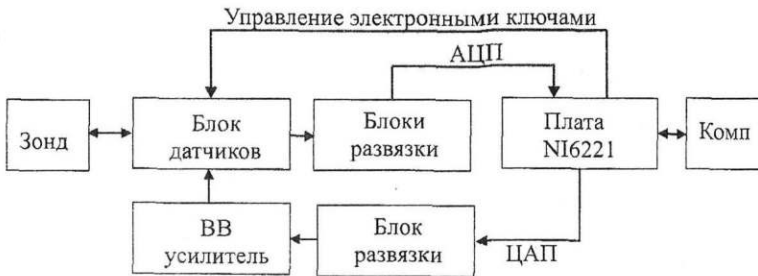


Рисунок 5 – Структурная схема аппаратной части подсистемы зондовых измерений

В рамках модели зонда Бернштейна-Рабиновича-Лафрамбойза на основе граничных параметров измеряемой плазмы по концентрации и температуре выполнено моделирование вольтамперной характеристики (ВАХ) цилиндрического зонда. По результатам моделирования установлены пределы регистрируемых токов и напряжений, а также допустимые погрешности их измерений.

Разработаны конструкции двух зондов, - цилиндрического и плоского, с учётом условий их работы в плазме, содержащей атомы и ионы металлов. С учётом требований к вакуумной части установок высокоплотной плазмы разработана конструкция вакуумного ввода зондов в плазму, позволяющая зонды передвигать в процессе работы установки.

Определены структура и состав аппаратной части подсистемы зондовых

измерений с учётом требований гальванической развязки измерительных цепей (см. рисунок 5). Спроектированы и изготовлены: блок датчиков с электронной коммутацией и высоковольтный усилитель зондового напряжения.

Разработан алгоритм измерения ВАХ в двух режимах,- с ручным и автоматическим выбором диапазонов измерения и программа регистрации ВАХ, обладающая возможностью интерактивного управления процессами регистрации, визуализации и сохранения данных первого уровня.

На основе моделей (теорий) электростатического зонда Чайлда-Ленгмюра, Аллена-Бойда-Рейнольдса, Бернштейна-Рабиновича-Лафрамбойза, Шеридана и Чена, разработаны алгоритмы восстановления заявленных параметров плазмы. Алгоритмы реализованы в двух программах обработки ВАХ,- для цилиндрического и плоского зондов. Программы построены таким образом, что позволяют пользователю восстанавливать параметры плазмы из данных первого уровня в рамках упомянутых моделей, а также производить некоторый объем численных экспериментов с ними.

Типичная ВАХ электростатического зонда приведена на рисунке 6.

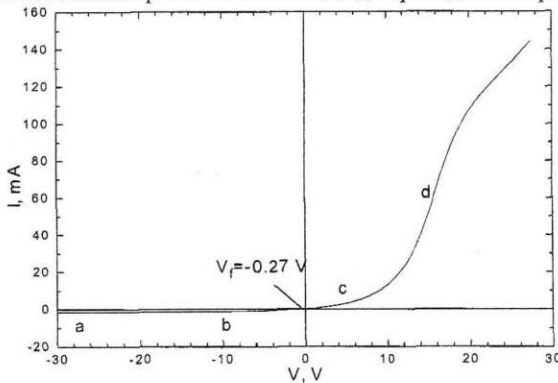


Рисунок 6 – Типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) цилиндрического зонда

В процессе обработки выполняются следующие действия.

1. Производится регуляризация данных измеренной ВАХ кубическими сглаживающими сплайнами или фильтром Савицкого-Голая (по выбору оператора) и вычисление первых двух производных.
2. Определяются потенциал плазмы по максимуму первой производной сглаженного тока по напряжению  $V_s = V \Big|_{dI/dV=0}$ , и плавающий потенциал, который соответствует нулевому значению тока на зонд  $V_f = V \Big|_{I=0}$ .
3. Максвелловская температура электронов восстанавливается на участке *c-d* ВАХ по формуле Ленгмюра

$$I_e = SeN_0 \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \exp\left(\frac{eV_p}{k_B T_e}\right), \quad (3)$$

из которой следует расчетная формула

$$T_e = \frac{e}{k_B} \left[ \frac{\Delta(\ln \mathcal{A} / \partial V_p)}{\Delta V} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Здесь предполагается, что на участке  $c-d$  электронный ток изменяется гораздо быстрее, чем ионный:  $\partial I_i / \partial V_p \ll \partial I_e / \partial V_p$  и можно положить, что  $\partial I_i / \partial V_p \approx \partial I_e / \partial V_p$ .

4. Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) вычисляется по методу Дривестейна, окончательная формула которого имеет вид

$$F(\varepsilon) = \frac{4}{S_p} \sqrt{\frac{m_e}{2e^3}} \sqrt{\varepsilon(\varepsilon B)} \left| \frac{d^2 I}{dV_p^2} \right|. \quad (5)$$

Здесь  $V_p = V - V_s \leq 0$  – потенциал зонда относительно плазмы,  $S_p$  – физическая площадь собирающей поверхности зонда.

5. Из ФРЭЭ определяется средняя температура электронов

$$\langle T_e \rangle = \frac{2}{3} \int_0^\infty \varepsilon F(\varepsilon) d\varepsilon \bigg/ \int_0^\infty F(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6)$$

6. и концентрация электронов (как один из методов)

$$N_e = \int_0^\infty F(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (7)$$

7. На основании модели Бернштейна-Рабиновича-Лафрамбойза восстанавливаются из ВАХ значения концентрации электронов и ионов. Численные результаты указанных авторов в приближении холодных ионов  $T_i \ll T_e$  представляют собой семейство графиков зависимостей нормированного тока на зонд от нормированного потенциала, т.е.

$$f(\chi), \text{ где } \chi = \frac{(V - V_s)}{T_e(\varepsilon B)}, \quad (8)$$

причем для различных отношений радиуса зонда к дебаевской толщине призондового слоя (эта отношение фактически является параметром)

$$R_D = \frac{R}{\lambda_D} = R \sqrt{\frac{eN_0}{\varepsilon_0 T_e(\varepsilon B)}}. \quad (9)$$

Для указанных зависимостей используется нелинейное приближение вида

$$I = I_{i0} f_i(-\chi) + I_{e0} \exp(\chi), \quad \chi < 0, \quad (10)$$

$$I = I_{e0} f_e(\chi), \quad \chi \geq 0, \quad (11)$$

где

$$I_{i0} = eN_i S \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_i} \right)^{1/2}, \quad I_{e0} = eN_e S \left( \frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$f_i(-\chi) = a_i (b_i + \chi)^{c_i}, \quad f_e(\chi) = a_e (b_e + \chi)^{c_e}. \quad (13)$$

Коэффициенты приближения  $a$ ,  $b$  и  $c$  для электронов получены Маусбахом, а для ионов – автором работы. Здесь программой обработки выполняются следующие операции. Сглаженная ВАХ приводится в нормированному потенциалу  $\chi$  (8) и разделяется на три области, – ионного насыщения, переходную и электронного насыщения. Методом Левенберга-Марквардта

производится нелинейное приближение нормированной экспериментальной ВАХ функциями (10)-(13) с целью определения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  для электронной и переходной ветвей. Методом интерполяции по значениям этих коэффициентов вычисляется параметр  $R_D$ , из которого по (9) вычисляется концентрация электронов. Концентрация ионов восстанавливается методом Сони́на.

8. Для определения концентрации ионов в программе используется еще один алгоритм, основанный на методе плавающего потенциала, предложенный Ф.Ченом. Было замечено, что ионный ток в области насыщения, по крайней мере, для ВЧ-разряда пропорционален потенциалу зонда в степени  $4/3$  и может быть аппроксимирован данной степенной функцией. Причем показатель степени показывает, что для призондового слоя выполняется закон Чайлда-Ленгмюра. В результате аппроксимации, можно интерполировать ионный ток на значение плавающего потенциала. Ионный же ток при значении нормированного плавающего потенциала зонда  $\eta_f$  может быть представлен в виде

$$|I_i(\eta_f)| = \alpha_0 \cdot N_i \cdot e \cdot S_s(\eta_f) \cdot c_s, \quad \eta_f = (V_s - V_f) \tilde{\gamma}_e^{-1}, \quad (14)$$

где  $\alpha_0$  константа, равная  $\exp(-1/2) = 0.61$  для  $T_i = 0$  и равная 0.5 при  $T_i$  порядка 1000 К;  $c_s$  – ионно-звуковая скорость (1.22);  $S_s(\eta_f)$  – площадь цилиндрической поверхности призондового слоя при плавающем потенциале. Данную площадь можно представить как

$$S_s(\eta_f) = 2\pi(R_p + d(\eta_f))L, \quad (15)$$

где  $R_p$ ,  $L$  – радиус и длина зонда, а  $d(\eta_f)$ , толщина слоя объемного заряда, которая в соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра равна

$$d(\eta_f) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\alpha_0}} (2\eta_f)^{3/4} \lambda_D = 1.018 \eta_f^{3/4} \lambda_D, \quad \lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 \tilde{\gamma}_e}{N_i e} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Совместным решением уравнений (14-16) определяется концентрация ионов.

В подпрограмме реализован ещё один метод определения концентрации ионов, который отличается от описанного тем, что толщина слоя объемного заряда  $d(\eta_f)$  определяется в рамках модели Аллена-Бойда-Рейнольдса (АБР) (глава 1), точнее на параметрической формуле этой модели. В (15) заменим

$$(R_p + d(\eta_f)) = R_p \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right), \quad \frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 + E \cdot \exp(-F \cdot R_D^G). \quad (17)$$

Теперь концентрацию ионов можно представить в виде

$$N_i = \frac{|I_i^*|}{2\pi R_p L \alpha_0 c_s e} \cdot \frac{1}{1 + EE/\exp(F \cdot R_D^G)}. \quad (18)$$

Здесь  $N_i$  восстанавливается в итерационном процессе, поскольку  $N_i$  зависит от  $R_D$ , который зависит от  $\lambda_D$ , которая зависит от  $N_i$ .

Программа обработки ВАХ плоского зонда отличается от программы для цилиндрического зонда только способом вычисления концентрации. Последняя определяется только для ионов и только одним методом, а именно в рамках модели Шеридана.

В процессе написания программного обеспечения подсистемы, математическая библиотека LabVIEW была дополнена несколькими подпрограммами-функциями.

**Глава четвертая** посвящена разработке электронно-оптического метода измерения степени ионизации потока распрыснутых в плазме атомов металла  $\alpha$ . Суть метода заключается в следующем (рисунок 7). На пути потока атомов и ионов металла устанавливается диафрагмированная плоскопараллельная кварцевая пластина, на которой осаждается металлическая пленка. При помощи оптической системы, состоящей из полупроводникового лазера, световода, монохроматора и ФЭУ, измеряется коэффициент отражения металлической пленки  $R$ , который зависит от ее толщины  $d$ , когда она много меньше длины световой волны лазера. Пленка напыляется на кварцевую пластину через систему из двух сеток, первая из которых находится под плавающим потенциалом, а потенциал второй можно менять посредством электронных ключей. Когда на второй сетке плавающий потенциал, электрическое поле между сетками отсутствует, и на пленке осаждаются и атомы и ионы металла. Когда на второй сетке относительно первой отрицательный потенциал, поле между сетками отсекает ионы и на пленке осаждаются только атомы металла. Скорость осаждения в первом случае больше, чем во втором. В обоих случаях скорость осаждения пропорциональна тангенсу угла наклона  $B$  зависимости  $R(t)$ . Степень ионизации тогда вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{\Gamma_{M+}}{\Gamma_{M+} + \Gamma_M} = \frac{B(Cu + Cu^+) - B(Cu)}{B(Cu + Cu^+)}. \quad (19)$$

Режим отсечки ионов включается и выключается десятки раз за время напыления пленки.

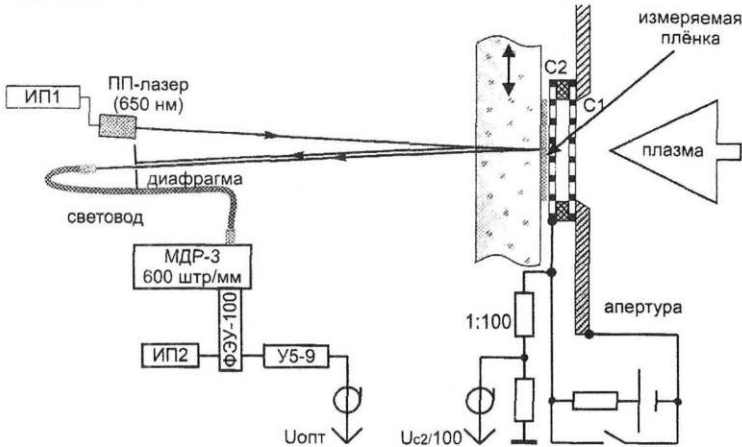


Рисунок 7 – Схема электронно-оптического метода измерения степени ионизации потока атомов металла

Среди достоинств метода – невысокая стоимость и возможность измерений  $\alpha$  непосредственно в плазме *in situ*. Надежность и достоверность

результатов разработанного электронно-оптического метода измерения степени ионизации потока были подтверждены измерениями с помощью сеточных кварцевых микровесов и профилометра.

**Глава пятая** описывает сервисное программное обеспечение.

Разработана программа «Сервер виртуальных приборов», которая упрощает оператору использование разработанного устройства, вызывая необходимые программы в режиме регистрации и обработки информации.

Разработан ряд вспомогательных программ производящих предварительную обработку и сортировку полученных данных, а также преобразующих рассчитанные параметры плазмы в вид удобный для дальнейшей обработки в программах сторонних разработчиков.

Создана программа анализа вкладов в тепловой поток различных энергетических факторов теплового потока, создаваемого электронами  $q_e$ , ионами  $q_i$ , нейтральными частицами буферного газа и металла  $q_n$ , энергией, высвобождаемой в результате рекомбинации  $q_{rec}$  и конденсации  $q_{con}$  атомов металла, излучением из плазмы и от конструктивных поверхностей  $q_{rad}$ . Определение вкладов позволяет сопоставлять (проверять) с достаточной степенью точности результаты зондовых и тепловых измерений. Тем самым обеспечиваются комплексность измерений, позволяющая повысить уровень достоверности результатов.

**Глава шестая** посвящена испытаниям разработанного устройства регистрации и обработки информации на плазменной установке – магнетроне с полым катодом. Посредством системы были успешно проведены несколько серий измерений в плазме  $Ar+Cu$ .

1. При рабочих давлениях 5 и 10 мТорр на расстоянии 20 см от среза катода получена зависимость концентрации плазмы, температуры электронов, плазменного и плавающего потенциалов от мощности разряда в диапазоне (0.25 – 4.5) кВт (рис. 8).

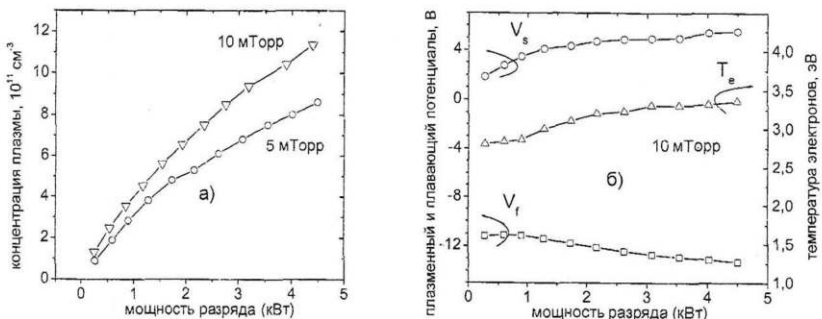


Рисунок 8 – Зависимость от мощности: а) концентрации плазмы; б) средней температуры электронов  $T_e$ , плавающего потенциала  $V_f$  и плазменного потенциала  $V_s$ . Ток электромагнита  $I_{эл} = -0.6$  А. Диаметр катода 80 мм.



2. При мощности разряда 3 кВт, рабочем давлении 10 мТорр и различной конфигурации магнитного поля измерены радиальные распределения концентрации плазмы, температуры электронов, плазменного и плавающего потенциалов (рис.9).

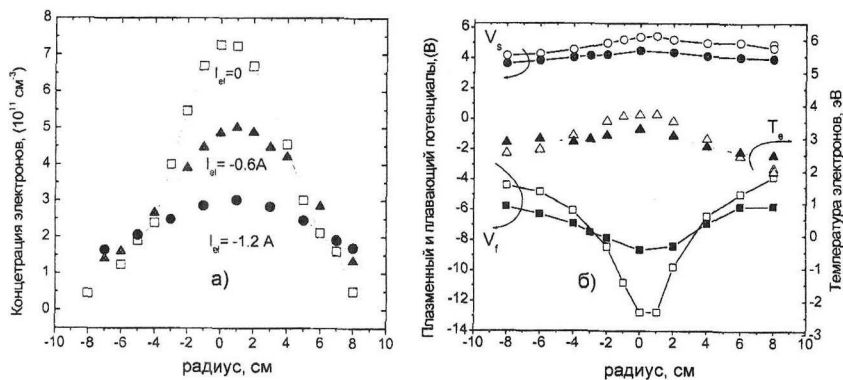


Рисунок 9 – Радиальные профили: а) концентрации плазмы; б) температуры электронов  $T_e$ , плавающего потенциала  $V_f$  и плазменного потенциала  $V_s$ . Расстояние от катода 20 см. Светлые значки  $I_{зм}=0$  А, темные значки  $I_{зм}=-0.6$  А. Диаметр катода 80 мм.

3. При мощности разряда 1.3 кВт, рабочих давлениях 2 и 5 мТорр получены аксиальные распределения концентрации плазмы, температуры электронов, плазменного и плавающего потенциалов (рис.10).

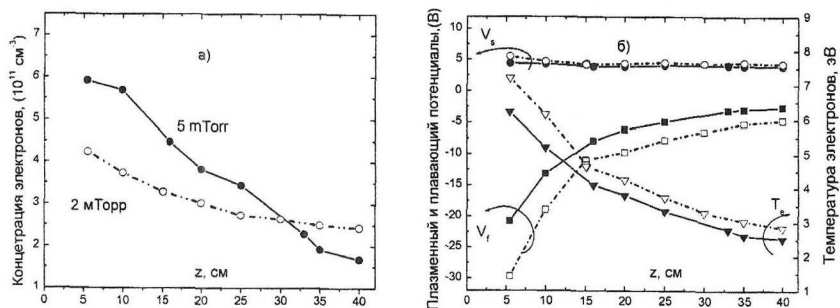


Рисунок 10 – Распределение по длине от среза катода: а) концентрации электронов; б) температуры электронов  $T_e$ , плазменного  $V_f$  и плавающего  $V_s$  потенциалов.  $I = 4$  А,  $U = 323$  В,  $I_{зм} = 0$  А. Сплошные линии:  $p = 5$  мТорр, пунктирные линии:  $p = 2$  мТорр. Диаметр катода 80 мм.

4. При мощности разряда 1.7 кВт и давлении 5 мТорр на различных расстояниях от среза катода измерены функции распределения электронов по энергиям и функции их вероятностного распределения (рис.11).

5. При давлениях 5 и 10 мТорр измерена зависимость теплового потока

плазмы и его компонентов от мощности разряда (рис. 12).

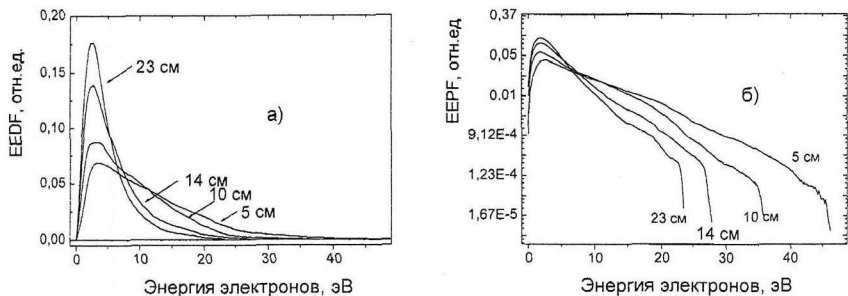


Рисунок 11 – Распределения электронов: а) по энергиям (EEDF); б) вероятности по энергиям (EPPF). Давление  $p=5$  мТорр,  $I_{эм} = -0.5$  А. Диаметр катода 80 мм.

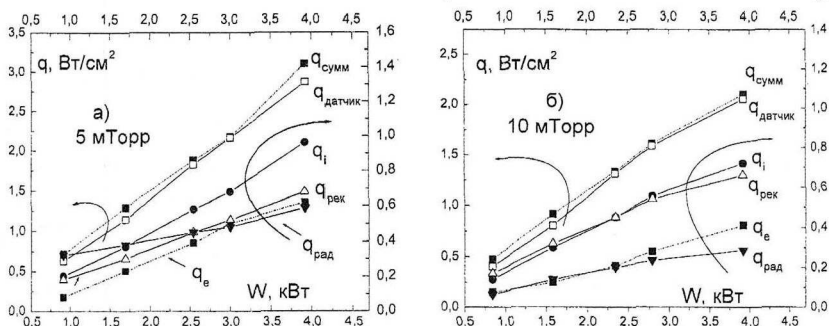


Рисунок 12 – Зависимость теплового потока плазмы и его компонентов от мощности разряда при разных давлениях.  $q_i$ ,  $q_e$  – вклады ионов и электронов;  $q_{рек}$  – рекомбинация ионов;  $q_{рад}$  – излучение;  $q_{сумм}$  – сумма вкладов.

Результаты измерений основных параметров плазмы на установке магнетрона с полым катодом хорошо согласуются с результатами исследований других авторов, полученных на аналогичных установках в аналогичных условиях.

**Приложение** содержит блок-диаграммы программ; блок-схемы подпрограмм и их описание; чертежи и фотографии некоторых элементов системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем.

1. Разработаны и реализованы алгоритмы, программы и аппаратные средства устройства регистрации и обработки первичной и вторичной

информации для восстановления параметров плазменного разряда, базирующаяся на трех методах плазменной диагностики: электростатические зонды, датчики теплового потока и электронно-оптический датчик степени ионизации потока атомов металла. Совместное использование трех методов измерения позволяет не только повысить уровень достоверности результатов, но и проводить измерения концентрации ионов распыляемого металла, - важного параметра плазмы, который невозможно измерить в рамках каждого из трех отдельно взятых методов.

2. Разработан электронно-оптический метод определения степени ионизации потока атомов металла в плазме, характеризующийся сравнительной простотой и низкой стоимостью аппаратных и программных средств. Его реализация включает в себя аппаратную часть электронно-оптических измерений, алгоритмы и программы обработки.

3. В зондовой подсистеме данного устройства используются разработанные автором алгоритмы, основанные на пяти моделях электростатического зонда, что также повышает уровень достоверности результатов.

4. Посредством разработанного устройства проведены несколько серий измерений в плазме магнетронного разряда с полым катодом и их результаты опубликованы.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- 1.\* Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Камышов И.А., Усатов И.И. Нанесение металлических пленок с использованием магнетронного разряда в системе с полым катодом. Известия высших учебных заведений. Электроника. 2009, №4, с. 19 - 24.
2. Царьгородцев Ю.П., Усатов И.И., Харченко В.Н. Тепловые потоки в магнетронном разряде с полым катодом. 5-я Рос. Нац. конф. по теплообмену. Москва., Изд-во МЭИ 2010, т.1, с.142-145.
3. Кубарев Ю.В., Полуэктов Н.П., Царьгородцев Ю.П., Усатов И.И., Журавлёв А.А. Экспериментальное исследование МПДУ для нейтрализации заряда космических аппаратов. Сб. трудов VI Международной НТК «Информационные технологии в науке, технике и образовании», Пицунда, Изд-во МГУ ПИ, 20 сентября – 1 октября 2010, с. 67-73.
4. Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Камышов И.А., Усатов И.И. Исследование пространственных характеристик магнетронного разряда с полым катодом. Сб. трудов VI Международной НТК «Информационные технологии в науке, технике и образовании», Пицунда, Изд-во МГУ ПИ, 20 сентября – 1 октября 2010, с. 255-260.
5. Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П. Система зондовых измерений для плазменных технологических установок. Сб. статей 12-й международной НПК «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та 2011, том 3, часть 2., с. 20-22.
- 6.\* Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П. Автоматизированная система контроля параметров плазмы для получения

наноструктурных пленок. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, №3(86) 2012, с.166-170.

7.\* Харченко В.Н., Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П. Автоматизированная система измерений тепловых потоков для технологических установок с высокоплотной плазмой. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник №4(87) 2012, с.123-127.

8.\* Усатов И.И. Автоматизированная система зондовых измерений в металлической плазме. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник №7(90) 2012, с.166-172.

9.\* Ю.П.Царьгородцев, Н.П.Полуэктов, В.Н.Харченко, Усатов И.И. Получение наноструктурных пленок в установках высокоплотной плазмы. Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник №7(90) 2012, с.173-178.

10. Yu. Tsar'gorodsev , N. Poluektov , V. Kharchenko , I. Usatov. Deposition of nanofilms in high density plasma devices. Scientific Israel- Technological Advantages, 2012, V.14, № 1, pp.24-30.

11. N. P. Poluektov, Yu P. Tsar'gorodsev, I. I. Usatov, A. G. Evstigneev, I. A. Kamyschov. Probe and Emission Spectrometry Diagnostics in Hollow Cathode Magnetron. Journal of Modern Physics, 2012, 3, 1494-1502.

12. Ю.П.Царьгородцев, Усатов И.И., Н.П.Полуэктов, Евстигнеев А.Г. Магнетронный разряд с полым катодом для осаждения пленок на рельефных субмикронных поверхностях. Сб. трудов 11-й Всероссийской НТК «Быстрозакаленные материалы и покрытия», МАТИ, Москва, 27-28 ноября 2012 г, с. 283-289.

\* – работы, опубликованные в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
представленного оригинал-макета

Подписано в печать 18.11 2013. Формат 60x90 1/16 Бумага 80 г/м<sup>2</sup>  
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 1,0  
Тираж 100 экз. Заказ № 250.

Издательство Московского государственного университета леса  
141005, Мытищи-5, Московская обл., 1-ая Институтская, 1, МГУЛ  
E-mail: [izdat@mgul.ac.ru](mailto:izdat@mgul.ac.ru)