

*На правах рукописи*

ЧЕРНОВ Валерий Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
ТОНКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК В ПЛАЗМЕ,  
ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ПУЧКАМИ  
НЕПРЕРЫВНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

**Научный руководитель**

Вихарев Анатолий Леонтьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

**Официальные оппоненты**

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

Кудрин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Защита состоится «29» февраля 2016 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «21» января 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Ю. В. Чугунов

### Актуальность проблемы

Современное развитие нанотехнологий неразрывно связано с поиском новых материалов, обладающих востребованными для применений физическими свойствами за счет наноструктурированности поверхности или их наноразмерных масштабов. Особый интерес представляют материалы, содержащие углерод, в силу многообразия углеродных твердых фаз и их гибридных соединений, а также модификаций, создаваемых путем встраивания других химических элементов. Повышенное внимание уделяется искусственным алмазным пленкам, обладающим удобной для применений формой и сохраняющим уникальные свойства природного материала [1]. За счет совершенствования технологии синтеза углеродных материалов двадцать лет назад были получены новые виды тонких поликристаллических алмазных пленок: ультранано- и нанокристаллические [2]. Такие пленки обладают целым рядом уникальных свойств монокристаллического алмаза, благодаря которым они находят применение в научных исследованиях и промышленных разработках.

Тонкие поликристаллические алмазные пленки используются в качестве теплоотводов для модулей мультичипов [3, 4], благодаря самой высокой теплопроводности алмаза при комнатных температурах среди других материалов. Твердость и оптическая прозрачность пленок в широком диапазоне длин волн позволили создавать износостойкие просветляющие покрытия на некоторых видах стекла [5]. Возможность получить у нанокристаллических алмазных пленок значение модуля Юнга близкое к соответствующей величине у монокристалла позволяет создавать на их основе высокочастотные механические резонаторы с частотой до 640 МГц [6]. Благодаря низкой шероховатости пленок и предельно высокой скорости звука в алмазе были созданы фильтры на поверхностной акустической волне. Данные фильтры имеют высокую рабочую частоту (до нескольких гигагерц) и используются в телекоммуникационных устройствах [7]. Биосовместимость алмаза позволила создать тонкую алмазную решетку для выращивания на ней упорядоченных долгоживущих нейронных сетей и дальнейшего их изучения [8]. Разработаны сенсоры биологических объектов, измеряющих концентрацию клеток, бактерий или органических молекул при помощи детектирования сдвига частоты механических колебаний алмазных кантилеверов [9]. Возможность создания проводимости у алмаза за счет легирования его другими элементами (азотом, бором, фосфором) открыло широкий спектр его применений в микроэлектронике. Полупроводниковые алмазные пленки оказываются перспективным материалом для создания элементов электроники (диодов и транзисторов), работающих в экстремальных условиях (при температурах более 500 °С и высоком радиационном фоне) [10, 11].

Тонкие алмазные пленки также могут оказаться подходящим материалом при разработке износостойких катодов с сильной электронной эмиссией (более  $100 \text{ A/cm}^2$ ), так как обладают, в частности, большой механической прочностью, отрицательным электронным сродством, высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии и растущим при уменьшении размеров зерна до наноразмерных масштабов коэффициентом усиления поля. В работах [12–13] отмечается перспективность использования алмазных покрытий металлических катодов для увеличения плотности тока и снижения порогов эмиссии. Однако результаты исследований в данной области разрознены. Очевидна необходимость в продолжении изучения эмиссионных свойств нанокристаллических алмазных пленок для создания на их основе катодов мощной вакуумной СВЧ электроники.

Наиболее распространенным методом получения искусственных алмазных пленок является химическое осаждение из газовой фазы (chemical vapor deposition – CVD метод) [15]. Собственно осаждение метастабильной  $sp^3$  фазы углерода (алмаза) вместо графита возможно только благодаря процессам, протекающим в неравновесной плазме. Использование газов с предельно низким содержанием примесей позволяет получать сверхчистые алмазные пленки, а жесткий контроль над условиями осаждения обеспечивает воспроизводимость результатов экспериментов при использовании CVD технологии.

В настоящее время наибольшее распространение получили CVD реакторы, в которых плазма создается с помощью СВЧ излучения. Интерес к СВЧ диапазону связан с возможностью получения плазмы, оторванной от стенок или электродов, с относительно высокой электронной концентрацией и высокой плотностью поглощаемой энергии, определяющих скорость активации газовой среды (генерации радикалов) в реакторе. В основном CVD реакторы созданы на основе объемных резонаторов различного типа с использованием частоты излучения 2,45 ГГц. Форма разряда в них определяется геометрией резонатора, а размер получаемой над подложкой однородной плазмы не превышает половину длины СВЧ волны. Типичные условия, поддерживаемые в реакторах с используемой частотой излучения 2,45 ГГц (давление газа порядка 100 Торр, удельный энергозатрат порядка  $50 \text{ Вт/см}^3$ , концентрация электронов порядка  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ , диаметр покрываемой плазмой подложки до 75 мм), обеспечивают скорости роста поликристаллических алмазных пленок на подложках диаметром 60–75 мм не более микрометра в час.

Для различных применений важным является получение поликристаллических алмазных пленок большей площади и увеличение скорости их роста при сохранении высокого качества алмазных пленок. Такие условия могут быть получены в реакторе при использовании для создания плазмы более высокой, чем 2,45 ГГц, частоты. В ИПФ РАН был разработан и реализован на практике новый тип реактора на базе гиротрона с частотой 30 ГГц [16, 17]. В данном реакторе поддержание газового разряда происходит в четырех попарно пересекающихся волновых пучках, которые позволяют создавать одно-

родный газовый разряд, прилегающий к подложке с большой площадью поверхности (диаметром до 100 мм). Использование коротковолнового излучения в реакторе имеет ряд преимуществ. Основным из них является возможность получения плотной плазмы (с удельным энергозатратом порядка  $1000 \text{ Вт/см}^3$  и концентрацией электронов порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) в различных газовых смесях. Это способствует интенсификации протекающих химических процессов за счет увеличения концентрации радикалов и химически активных частиц в СВЧ разряде, что приводит, в частности, к увеличению скорости синтеза алмазных пленок при сохранении их качества. В созданном реакторе была получена скорость роста поликристаллических алмазных пленок, в 5–7 раз превышающая скорость роста пленок в 2,45 ГГц реакторе при сохранении их качества и площади [18].

Однако исследования показали, что разработанный реактор оказался сложным в настройке и, как следствие, с его помощью не всегда удавалось обеспечить создание однородных плазменных слоев. Поэтому актуальным является разработка и исследование более совершенного реактора данного типа. Необходим реактор, в котором можно проводить исследования параметров плазмы оптическими методами, а структура разряда имеет простой вид, допускающий проведение численного моделирования СВЧ разряда в реакторе. Такие исследования, наряду с изучением свойств выращенных в реакторе алмазных пленок, позволили бы оптимизировать режим их осаждения. Такой комплексный подход, как показано в данной диссертационной работе, можно осуществить, применяя для создания плазмы в реакторе два пересекающихся волновых пучка.

В СВЧ реакторе нового типа существует значительное число параметров, влияющих на осаждение тонких алмазных пленок большой площади. Поскольку существует огромная потребность в синтезе таких пленок, необходимо исследование взаимосвязей между параметрами плазмы СВЧ разряда и их свойствами, чему и посвящена настоящая диссертация. Важной является оптимизация условий осаждения для контролируемого роста тонких алмазных пленок с максимальной скоростью и заданными свойствами. Актуальной задачей также является исследование осаждения тонких алмазных пленок на металлические подложки для получения материала, обладающего сильной электронной эмиссией.

## Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование непрерывного свободно локализованного СВЧ разряда, поддерживаемого двумя пересекающимися волновыми пучками СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн в многокомпонентной газовой среде, плазмохимического осаждения в плазме такого разряда тонких алмазных пленок и их свойств, прежде всего, эмиссионных характеристик.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование характеристик свободно локализованного непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого над подложкой в двух пересекающихся волновых пучках в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси, при изменении условий поддержания в широком диапазоне физических параметров.

2. Построение адекватной численной модели свободно локализованного непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого над подложкой в двух пересекающихся волновых пучках в многокомпонентных газовых смесях (Ar-H<sub>2</sub>-H-CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>-H-CH<sub>4</sub>).

3. Исследование поведения свободно локализованного непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого над подложкой в двух пересекающихся волновых пучках в многокомпонентной газовой смеси на основе построенной модели, при вариации внешних условий поддержания в широком диапазоне.

4. Исследование влияния условий плазмохимического осаждения нанокристаллических алмазных пленок на подложки из различных материалов на их свойства, в том числе на эмиссионные свойства пленок, покрывающих металлические подложки.

#### Научная новизна работы

1. Предложен и апробирован новый метод нанесения на неалмазные подложки алмазного нанопорошка, обеспечивающий высокую плотность (более 10<sup>10</sup> см<sup>-2</sup>) и однородность центров роста алмаза.

2. Показано, что в двух пересекающихся волновых пучках непрерывного СВЧ излучения с частотой от 20 до 60 ГГц в водород-метановой газовой смеси возможно поддержание тонкого плазменного слоя с расстоянием от его центра до подложки приблизительно равном половине длины волны СВЧ излучения. Впервые выявлены взаимосвязи между давлением газа, мощностью, конфигурацией и формой волновых пучков, частотой СВЧ излучения, необходимые для поддержания плазменного слоя над подложкой, обеспечивающего однородный поток атомарного водорода на подложку на всем ее протяжении.

3. Предложено использование величины энергии, требуемой для доставки одного атома водорода на подложку, в качестве количественного критерия для сравнения различных CVD реакторов, используемых для осаждения алмазных пленок и пластин. Указана функциональная связь данной величины с потоком атомарного водорода на подложку и поглощенной мощностью СВЧ излучения в плазме.

4. Представлены зависимости плотности тока эмиссии электронов с металлических катодов, покрытых тонкой алмазной пленкой от условий их осаждения (уровня метана и азота в рабочей газовой смеси). Впервые продемонстрировано усиление эмиссионного тока с металлических катодов за счет их

покрытия двухслойной алмазной пленкой, с проводящим первым слоем и диэлектрическим вторым слоем.

#### Основные положения, выносимые на защиту

1. Два пересекающихся над подложкой волновых пучка непрерывного СВЧ излучения с частотой от 20 до 60 ГГц в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовых смесях позволяют реализовать условия устойчивого поддержания газового разряда в виде тонкого плазменного слоя с расстоянием от его центра до подложки приблизительно равном половине длины волны СВЧ излучения. При частоте СВЧ излучения 30 ГГц плазменный слой в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> и Ar-H<sub>2</sub> газовых смесях с содержанием аргона более 50% поддерживается в диапазоне давлений газа от 150 до 400 Торр при фокусировке пучков на поверхности подложки, их ширине в фокальной плоскости перпендикулярно подложке не более 2,5 см, падающей СВЧ мощности, изменяющейся от 4 до 12 кВт.

2. Самосогласованное решение уравнений Максвелла, баланса электронов, теплопереноса в газе и массопереноса для атомарного водорода с учетом зависимостей коэффициентов в данных уравнениях от локальных газовой температуры, концентрации атомарного водорода, отношения эффективного электрического поля к концентрации газа позволяет адекватно описывать свободно локализованный над подложкой непрерывный СВЧ разряд с частотой 30 ГГц в аргон-водородной газовой смеси (Ar > 50%) с малыми добавками метана (~1%) в двух пересекающихся волновых пучках ТЕ-поляризации.

3. При создании плазменного слоя двумя пересекающимися волновыми пучками непрерывного СВЧ излучения с частотой 30 ГГц в H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси существуют комбинация параметров: давления газа, СВЧ мощности, конфигурации и формы волновых пучков, обеспечивающих однородный поток атомарного водорода на подложку диаметром 100 мм, в отличие от Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси (Ar > 50%).

4. Осаждение алмазной пленки на молибденовый катод в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси приводит к улучшению однородности и увеличению плотности тока электронной эмиссии по сравнению с катодами без алмазных пленок. Использование на молибденовом катоде двухслойного алмазного покрытия, состоящего из проводящего легированного азотом первого слоя и диэлектрического второго слоя, увеличивает эмиссионный ток по сравнению с однослойным проводящим алмазным покрытием на катоде.

#### Практическая и научная ценность

Результаты, полученные в диссертации, могут быть востребованы для фундаментальных исследований непрерывного СВЧ разряда в волновых пучках и механизмов роста моно- и поликристаллического CVD алмаза в плазме такого разряда, а также имеют практическое значение для создания новых CVD реакторов.

Возможность поддержания над подложкой тонкого слоя непрерывного СВЧ разряда, обеспечивающего однородный поток радикалов на ее поверхность, может быть использована не только для осаждения алмазных пленок, но и для обработки, травления, наноструктурирования подложек и роста на них новых материалов в других газовых смесях.

В последнее время фундаментальные исследования плазмохимического синтеза CVD алмаза переходят на стадию опытно-конструкторских разработок приборов на их основе, поэтому исследованные в диссертации условия, обеспечивающие повышение скорости роста алмазных пленок без ухудшения качества и увеличение их площади, имеют большое практическое значение.

Представленные в работе зависимости эмиссионных токов металлических катодов с алмазными пленками могут быть востребованы для фундаментальных исследований эмиссионных свойств многослойных материалов. Исследованные металлические катоды с алмазным покрытием, демонстрирующие усиление электронного эмиссионного тока, могут быть использованы при разработке и создании «холодных» катодов для мощных приборов вакуумной СВЧ электроники.

### **Степень достоверности результатов работы**

Представленные в диссертации экспериментальные результаты были получены с использованием апробированных методик на сертифицированном оборудовании. Для экспериментального исследования параметров плазмы СВЧ разряда, поддерживаемого в двух пересекающихся волновых пучках, были созданы оптические схемы и разработаны методы обработки, учитывающие ошибки измерений. Все полученные результаты являются обоснованными и обладают высокой степенью достоверности. Одним из подтверждений этого служит согласие аналитических и расчетных данных с результатами, полученными в экспериментах. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, подготовке и проведении экспериментов, проводил теоретический анализ и численное моделирование, а также обработку полученных данных и интерпретацию результатов. Диагностика СВЧ разряда в двух пересекающихся волновых пучках методами оптической эмиссионной спектроскопии проводилась совместно с Д.Б. Радищевым. Численная самосогласованная двумерная модель СВЧ разряда в двух пересекающихся волновых пучках в многокомпонентной газовой смеси была создана автором дис-

сертации на базе программы, написанной А.М. Горбачевым и М.А. Лобаевым. Расчеты характеристик СВЧ разряда и теоретический анализ их зависимостей от внешних условий был проведен автором лично. Исследование методов подготовки неалмазных подложек для последующего осаждения на них нанокристаллических алмазных пленок проводилось автором диссертации. Все эксперименты по осаждению тонких алмазных пленок на подложки из различных материалов проводились в плазмохимическом реакторе на базе гиротрона с частотой 30 ГГц совместно с А.В. Козловым. Обсуждения условий осаждения алмазных пленок на металлические катоды и механизмов эмиссии электронов с них проводились совместно с О.А. Ивановым.

Опубликованные работы написаны в соавторстве с сотрудниками, принимавшими участие в выполнении исследований, и научным руководителем. Автором внесен определяющий вклад в результаты, представленные в работах [7А, 8А, 12А, 13А, 16А]. В работах [1А, 5А, 9А, 10А, 14А] автору принадлежит основная часть проведенных измерений и их интерпретации. В работах [2А, 3А, 4А, 6А, 11А, 15А] вклад всех соавторов равноценен.

### **Публикации и апробация работы**

Настоящая работа является итогом исследований, выполненных в ИПФ РАН в 2009–2015 гг. Описанные в диссертации научные результаты докладывались на 3-м международном форуме по нанотехнологиям «Rusnanotech 2010» (2010, Москва, Россия), на международных конференциях «Advanced Carbon Nanostructures» в 2011 и 2013 гг. (Санкт-Петербург, Россия), на международной конференции по алмазу и углеродным материалам (2012, Гранада, Испания), на 8-й международной конференции «Microwave discharges: fundamentals and applications» (2012, Звенигород, Россия), на VIII и IX международной конференции «Мощные микроволны и терагерцовые волны: источники и приложения» (2011 и 2014, Нижний Новгород, Россия), на конкурсе работ молодых ученых ИПФ РАН (2012) и внутренних семинарах ИПФ РАН.

По теме диссертации опубликовано 7 статей в реферируемых российских и зарубежных научных журналах, 8 тезисов докладов на конференциях, а также получен один патент РФ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 169 страниц, включая 62 рисунка. Список литературы содержит 178 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной тематики исследований, определена цель и решаемые задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации и ее краткое содержание.

В **главе 1** дан краткий обзор современного состояния технологии плазмохимического осаждения тонких алмазных пленок в многокомпонентной газовой среде. Также в главе дается описание методов диагностики, характерных свойств и применений такого типа пленок.

В **разделе 1.1** приведены общие сведения о плазмохимических процессах роста алмазных пленок из газовой фазы. В частности, указаны типичные характеристики газового разряда, используемого для CVD синтеза алмаза. В разделе обсуждаются механизмы роста алмаза в неравновесной плазме, а также новые теории, связанные со спецификой роста нанокристаллических алмазных пленок. Акцентировано внимание на радикалах H и CH<sub>3</sub>, играющих основную роль в процессах роста алмаза. Приведена формула для скорости роста алмазной пленки  $G$  и относительной плотности дефектов алмаза  $X_{def}$  [19]:

$$G \propto \frac{[\text{CH}_3]_{sur} [\text{H}]_{sur}}{3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} + [\text{H}]_{sur}}, \quad X_{def} \propto \frac{G}{[\text{H}]_{sur}^2}, \quad (1)$$

где  $[\text{H}]_{sur}$  – концентрация атомов водорода у поверхности подложки,  $[\text{CH}_3]_{sur}$  – концентрация радикала CH<sub>3</sub> у поверхности подложки.

В **разделе 1.2** дается краткое описание основных типов CVD реакторов с СВЧ излучением дециметрового диапазона длин волн. Обсуждаются типичные условия, поддерживаемые в них для плазмохимического осаждения искусственных алмазных пленок из газовой фазы. Указаны характерные скорости роста и размеры алмазных пленок, получаемых в данных реакторах.

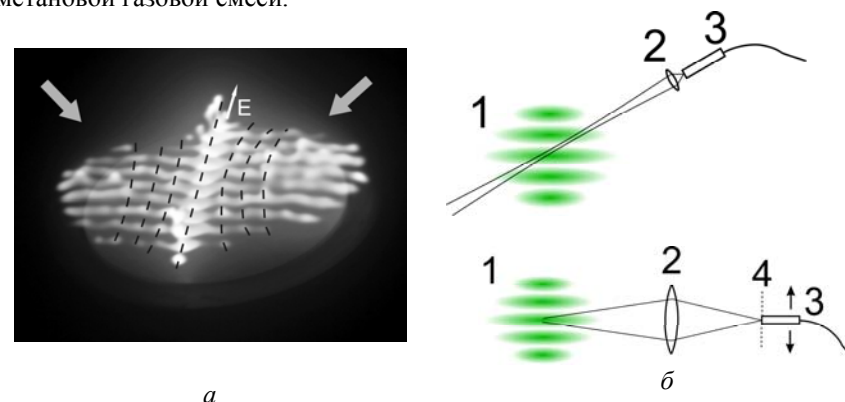
В **разделе 1.3** представлено описание плазмохимического реактора, в котором поддержание СВЧ разряда происходит в четырех попарно пересекающихся волновых пучках излучения миллиметрового диапазона длин волн. Обсуждаются достоинства увеличения частоты СВЧ излучения с точки зрения применений в CVD технологии синтеза алмазных пленок. Указана возможность перехода от реактора со сложной четырех пучковой электродинамической системой к двухпучковой. Данная модификация реактора использована в исследованиях, проведенных в диссертационной работе, и ее детальное описание дано во второй главе.

В **разделе 1.4** рассмотрены условия поддержания СВЧ разряда в многокомпонентных газовых средах. В частности, описано влияние добавок углеродсодержащего газа (на примере метана) в газовую смесь на основной ион в плазме. Рассмотрены изменения характеристик плазмы при добавке аргона или неона в газовую смесь. Отдельно обсуждаются вопросы транспортных свойств газов в многокомпонентной смеси. Представленные в данном разделе данные использовались при построении модели газового СВЧ разряда.

В **разделе 1.5** представлены сведения о плазмохимическом осаждении нанокристаллических алмазных пленок, их свойствах и применениях. В параграфе 1.5.1. акцентировано внимание на особенностях предварительной подготовки неалмазных подложек и условиях плазмохимического осаждения на них алмазных пленок. В параграфе 1.5.2 освещены типичные свойства нанокристаллических алмазных пленок. В конце раздела (параграф 1.5.3) описаны области применения нанокристаллических алмазных пленок. Особое внимание уделено результатам исследований эмиссионных свойств алмазных покрытий на металлических катодах.

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальной установки для осаждения тонких алмазных пленок в плазме непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого в двух пересекающихся волновых пучках миллиметрового диапазона длин волн, методам диагностики и экспериментальным измерениям характеристик плазменного слоя при различных условиях.

**Раздел 2.1** содержит описание используемой экспериментальной установки, в которой поддерживается газовый разряд в двух волновых пучках непрерывного излучения гиротрона с частотой 30 ГГц [10А]. Указаны параметры волновых пучков и диапазон условий поддержания СВЧ разряда. Приведены структура (рис. 1, а) и общие характеристики СВЧ разряда, поддерживаемого в волновых пучках ТЕ- и ТМ-поляризации в атмосфере аргон-водород-метановой газовой смеси.



**Рис. 1.** (а) Фотография СВЧ разряда в смеси аргона и водорода при типичных условиях поддержания над подложкой диаметром 75 мм. Стрелками указано направление распространения волновых пучков с ТЕ-поляризацией. Пунктирными линиями обозначено расположение пучностей поля в стоячей волне. (б) Схема измерения усредненного (наверху) и пространственно разрешенного (внизу) оптического излучения плазмы над подложкой. 1 – СВЧ разряд, 2 – фокусирующая линза, 3 – световод, 4 – плоскость изображения разряда

В **разделе 2.2** приведены используемые в работе методы диагностики плазмы. Описан метод оптической эмиссионной спектроскопии для исследо-

вания плазмы СВЧ разряда. Указан метод измерения в плазме температуры газа по вращательной структуре перехода  $d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$  радикала  $C_2$  и концентрации электронов по влиянию хольцмарковских полей на профиль спектральной линии  $H_\beta$  серии Бальмера [20]. Представлена модификация описанного метода, улучшающая его точность [7А]. Произведена оценка максимального уровня ошибки измерений, достигаемого при использовании этого метода.

В разделе 2.3. представлены постановка и результаты экспериментов по измерению зависимостей характеристик СВЧ разряда от условий его поддержания на основе описанных ранее методов. В частности, указано используемое в экспериментах оборудование. Приведено описание различных схем регистрации спектров излучения плазмы СВЧ разряда, рис. 1, б. В конце раздела приведены полученные зависимости температуры газа и электронной концентрации плазмы от мощности СВЧ излучения, давления и состава газовой смеси [5А].

Материалы, изложенные во второй главе, опубликованы в работах [5А, 7А, 9А и 10А].

В главе 3 дано описание численной модели непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого в двух пересекающихся над подложкой волновых пучках в многокомпонентной газовой смеси. Представлены результаты исследований характеристик СВЧ разряда на основе построенной модели в широком диапазоне условий.

В разделе 3.1 проведен анализ характеристик плазменного слоя, поддерживаемого в двух пересекающихся волновых пучках непрерывного СВЧ излучения, базирующийся на двумерной самосогласованной численной модели. В параграфе 3.1.1 рассмотрены зависимости кинетических констант от условий поддержания плазмы в  $Ar-H_2-H$  газовых смесях. Полученные аппроксимации данных зависимостей от температуры электронов использованы в численной модели разряда.

В параграфе 3.1.2 дано описание основных физических законов и принципов, на которых базируется численная модель. При расчетах параллельно решались динамические уравнения Максвелла, баланса электронов, транспорта атомов водорода, теплопереноса с использованием переменной псевдовремени и уравнение состояния газа [16А]. Самосогласованность решения обеспечивалась периодическим обменом данными между уравнениями. Расчет завершался при выходе всех параметров на стационарные значения.

Проведено сравнение и обсуждение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных для аргон-водород-метановой смеси (параграф 3.1.3). Продемонстрировано совпадение экспериментально измеренной структуры свечения линию  $H_\alpha$  серии Бальмера и расчетной формы распределения концентрации электронов. На рис. 2, а оба распределения представлены с одним и тем же пространственным масштабом. Хорошее совпадение также наблюдалось для экспериментально измеренных и рассчитанных

пространственных распределений температуры газа (рис. 2, б) и потока атомарного водорода на подложку [7А].

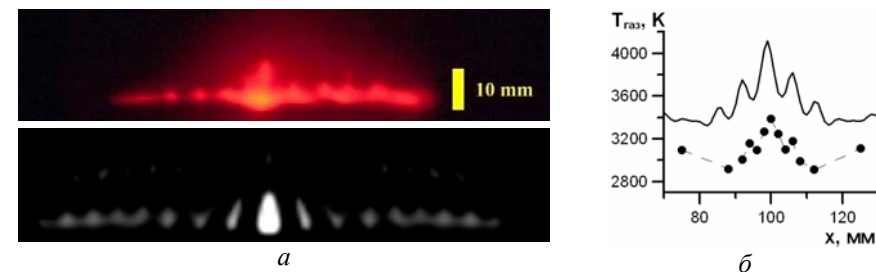


Рис. 2. (а) Фотография разряда над подложкой, полученная через фильтр, выделяющий линию  $H_\alpha$  серии Бальмера (сверху). Расчетная форма разряда (распределение электронной концентрации) с тем же пространственным масштабом (снизу). (б) Зависимости распределения температуры нейтрального газа в центре СВЧ разряда от координаты вдоль подложки. Сплошная линия – численный счет, черные круги – экспериментальные данные. Условия эксперимента при измерении температуры газа:  $P = 10$  кВт,  $p = 200$  Торр,  $Ar/H_2 = 65\%/35\%$ ,  $CH_4/H_2 = 2\%$

В конце раздела (параграф 3.1.4) представлены расчетные характеристики СВЧ разряда, поддерживаемого в атмосфере водорода с малыми добавками метана. Как предсказывает модель при полном замещении буферного газа (например, аргона) водородом пропадает ярко выраженная неоднородность в центре СВЧ разряда (см. рис. 2), а поток атомарного водорода на подложку становится однородным на всем ее протяжении [7А].

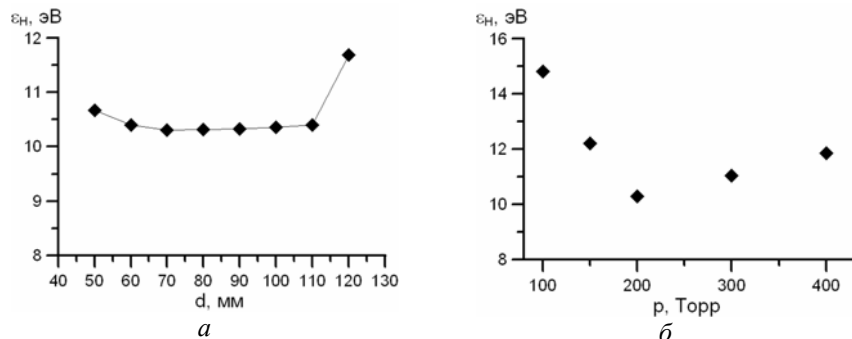
В разделе 3.2 представлены результаты исследования СВЧ разряда в двух пересекающихся волновых пучках в атмосфере водорода с малыми добавками метана при помощи численного моделирования. В начале раздела (параграф 3.2.1) рассмотрены распределения «холодных» полей двух волновых пучков над подложкой и выявлены основные принципы управления областью локализации электрического поля.

В параграфе 3.2.2 на основе построенной численной модели описано изменение характеристик СВЧ разряда от условий его поддержания (давления и состава газовой смеси, ширины пучков, расположения и мощности волновых пучков), варьируемых в широком диапазоне [16А]. В работе рассматривается зависимость распределения потока атомарного водорода на подложку от перечисленных условий поддержания плазмы. В качестве критерия сравнения СВЧ разрядов предложено использовать величину  $\epsilon_H$ , энергоцену одного атома водорода, прилетевшего на подложку. В параграфе указаны правила регулирования условий поддержания разряда, позволяющие экспериментально получить плазменный слой, обеспечивающий однородный поток атомов водорода на подложку большой площади.



В параграфе 3.2.3 представлены правила масштабирования размеров плазменных слоев вдоль подложки при фиксированной частоте ( $\lambda = 1$  см) используемого СВЧ излучения за счет изменения расположения, мощности и ширины волновых пучков. Показано, что максимальный размер области однородности потока атомов водорода на подложку составляет порядка 10 длин волн СВЧ излучения (рис. 3, а).

В параграфе 3.2.4 найдены и проанализированы оптимальные условия поддержания однородного СВЧ разряда излучением с частотой 30 ГГц для разных давлений. Показано, что существует оптимальное значение давления (в окрестности 200 Торр), при котором достигается минимум по энергоцене  $\epsilon_H$ , при фиксированном размере области однородности потока атомов водорода на подложку (рис. 3, б).



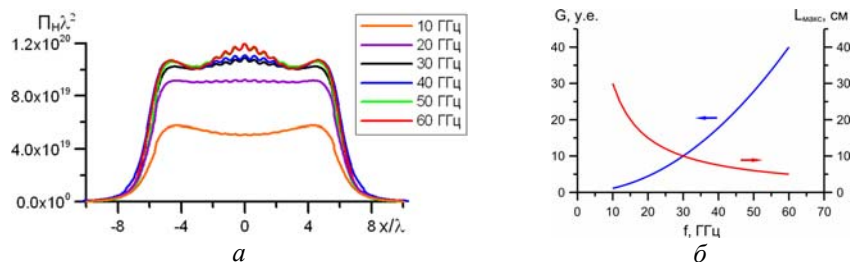
**Рис. 3.** (а) Зависимость энергоцены  $\epsilon_H$  от расстояния между точками отражения 30 ГГц волновых пучков от подложки. (б) Зависимость энергоцены  $\epsilon_H$  от давления для СВЧ разряда с однородным потоком атомарного водорода на подложку, поддерживаемого излучением с частотой 30 ГГц

В параграфе 3.2.5 определены правила преобразования оптимальных условий поддержания газового разряда, полученных для фиксированной частоты излучения, для СВЧ разрядов, поддерживаемых излучением с другими частотами. При помощи численного моделирования и указанных правил найдены область условий и диапазон частот излучения (10–60 ГГц), при которых возможно поддержание СВЧ разряда, обеспечивающего однородный поток атомарного водорода на подложку (рис. 4, а).

В параграфе 3.2.6 обсуждаются границы применимости результатов двумерной численной модели СВЧ разряда. Представлены оценки, из которых следует, что полученные ранее результаты можно использовать для описания газового разряда, поддерживаемого излучением с частотой в диапазоне от 20 до 60 ГГц. Указаны ограничения по давлению, связанные с неучтенными эффектами конвекции и неравновесной колебательной кинетики для излучения с частотой 30 ГГц.

В конце раздела (параграф 3.2.7) проанализирована практическая ценность полученных результатов для применений рассматриваемого разряда в технологии синтеза CVD алмаза. Представлены оценки, из которых следует, что с повышением частоты излучения квадратично возрастает скорость роста алмаза, но размер области его однородного осаждения уменьшается пропорционально длине волны (рис. 4, б).

Материалы, изложенные в третьей главе, опубликованы в работах [7А] и [16А].



**Рис. 4.** (а) Пространственное распределение приведенного потока атомарного водорода из плазмы СВЧ разряда в подложку для различных частот излучения (б) Зависимость скорости роста алмазной пленки и ее размера от частоты излучения при оптимальных условиях поддержания СВЧ разряда, обеспечивающего однородный поток атомарного водорода на подложку

**Глава 4** посвящена исследованию плазмохимического осаждения нанокристаллических алмазных пленок в реакторе нового типа на подложки из различных материалов.

В разделе 4.1 представлены результаты сравнения различных методов предварительной подготовки подложек. Дано описание разработанного способа нанесения центров нуклеации алмаза, основанного на методе центрифугирования. Суть метода заключается в нанесении небольшого количества суспензии алмазного нанопорошка на вращающуюся подложку. За счет сил инерции суспензия растекается по всей поверхности подложки и задерживается на ней силами поверхностного натяжения, жидкая часть высыхает, оставляя равномерно распределенный по подложке осадок из наночастиц алмаза. Описанный метод позволил достичь высокой плотности засева ( $>10^{10}$  см $^{-2}$ ) при экономном по сравнению с другими методами использовании суспензии алмазного порошка.

В разделе 4.2 описаны методы изучения морфологии поверхности и объемного фазового состава тонких алмазных пленок, а также приведено описание используемого при этом оборудования.

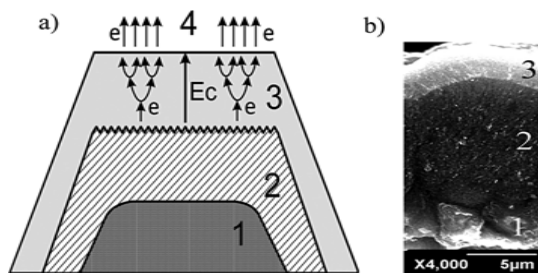
В разделе 4.3 представлены результаты исследования осаждения нанокристаллических алмазных пленок на кремниевые и кварцевые подложки в различных условиях. Приведены свойства полученных пленок и их связь с характеристиками СВЧ разряда.



В последнем разделе (4.4) представлены результаты исследований условий осаждения тонких алмазных пленок на металлические подложки и их эмиссионных свойств. В параграфе 4.4.1 описываются условия осаждения нанокристаллических алмазных покрытий на объемные молибденовые катоды. Дано описание экспериментальной установки и параметров измерения плотности эмиссионных токов с таких катодов. Приведены результаты указанных исследований для цилиндрических катодов с острой (ширина  $\sim 50 \mu\text{m}$ ) и плоской ( $\sim 1 \text{ мм}$ ) кромкой с тонким алмазным покрытием. Представлены характеристики тонких алмазных пленок, осажденных на молибден при различных условиях. Экспериментально показано увеличение плотности тока электронной эмиссии молибденовых катодов с алмазными покрытиями по сравнению с катодами без алмазных пленок в режиме больших токов ( $I > 100 \text{ А/см}^2$ ) [2А].

Параграф 4.4.2 посвящен изучению влияния на эмиссионные свойства катодов добавок азота в рабочую газовую смесь, из которой происходило осаждение алмазных пленок на их поверхность. Показано, что при небольших добавках азота ( $\sim 1\%$ ) ток эмиссии электронов резко возрастает, но при дальнейшем повышении доли азота ( $>10\%$ ) в газовой смеси происходит насыщение уровня эмиссионного тока. Указаны факторы, способствующие усилению эмиссии электронов за счет легирования алмазной пленки азотом. Рассмотрена роль неалмазной (графитовой) фазы в пленке в процессах переноса заряда и усиления электрического поля.

Последний параграф (4.4.3) посвящен наблюдаемому эффекту усиления эмиссионного тока на двухслойной алмазной пленке. Описана процедура и условия осаждения двухслойной алмазной пленки на молибденовый катод. Исследованы соотношение фаз углерода в каждом слое методами спектроскопии комбинационного рассеяния и структура поперечного скола алмазной пленки при помощи электронного сканирующего микроскопа (рис. 5, б).



**Рис. 5** (а) Схема усиления электронного пучка в процессе вторичной эмиссии электронов при прохождении его через алмазную пленку: 1 – острый край молибденового катода, 2 – НКА пленка с высокой эмиссионной способностью, 3 – диэлектрическая пленка, 4 – вакуум,  $E_c$  – внешнее электрическое поле. (б) Изображение поперечного сечения двухслойного алмазного покрытия молибденового катода, полученное электронным сканирующим микроскопом

Проведен анализ механизмов эмиссии и сделано предположение, что второй (диэлектрический) слой в двухслойном алмазном покрытии играет роль усилителя за счет вторичной электронной эмиссии внутри него (рис. 5, а).

Показано, что использование двухслойного катода с улучшенными характеристиками электронной эмиссии в переключателе активного компрессора СВЧ импульсов повысило его эффективность и увеличило коэффициент усиления мощности сжатого импульса. С таким катодом были получены рекордные параметры сжатия СВЧ импульсов: частота излучения – 11,4 ГГц, мощность выходного импульса – 165 МВт, коэффициент усиления мощности – 18–20, длительность сжатого импульса – 20 нс [21].

Материалы, изложенные в четвертой главе, опубликованы в работах [1А, 2А, 3А, 4А, 6А, 8А, 11А, 12А, 13А, 14А, 15А].

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

### Основные результаты диссертационной работы

1. Экспериментально продемонстрировано устойчивое поддержание газового разряда в виде тонкого плазменного слоя в двух пересекающихся над подложкой волновых пучках непрерывного СВЧ излучения с частотой 30 ГГц в  $\text{Ar-H}_2\text{-CH}_4$  и  $\text{Ar-H}_2$  газовых смесях с содержанием аргона более 50% в диапазоне давлений газа от 150 до 400 Торр. В двух волновых пучках с ТЕ-поляризацией излучения наблюдается стратификация разряда вдоль вектора электрического поля, отсутствующая для плазмы, поддерживаемой в волновых пучках с ТМ-поляризацией.

2. В СВЧ разряде, поддерживаемом в двух волновых пучках в  $\text{Ar-H}_2\text{-CH}_4$  газовой смеси, экспериментально получены зависимости средних значений температуры газа и электронной концентрации от содержания аргона, давления газа и падающей СВЧ мощности. Показано, что при постоянном давлении газа средняя температура газа и концентрация электронов не изменяются при увеличении падающей СВЧ мощности. Наблюдается слабое увеличение средней температуры газа с ростом его давления, во всех экспериментальных условиях она остается в диапазоне от 3000 К до 3500 К. При постоянной падающей СВЧ мощности наблюдается рост среднего значения концентрации электронов при увеличении давления газа. Экспериментально получено пространственное распределение температуры газа и потока атомарного водорода на подложку вдоль направления распространения волновых пучков. В распределениях температуры газа и электронной концентрации установлено наличие ярко выраженного максимума размером 1–2 длины волны, расположенного в окрестности центра подложки.

3. Построена двумерная численная модель, адекватно описывающая непрерывный СВЧ разряд в виде тонкого плазменного слоя, поддерживаемого в двух пересекающихся над подложкой волновых пучках миллиметрового диапазона длин волн. Показано, что распределения температуры газа в центре

разряда и потока атомарного водорода на подложку, рассчитанные при моделировании СВЧ разряда с частотой 30 ГГц в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси (Ar > 50%, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> = 1%), с точностью до погрешности измерений совпадают с данными экспериментов.

4. При помощи численной модели показано, что, в отличие от Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси с содержанием Ar > 50%, при создании плазменного слоя в H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси СВЧ излучением с частотой 30 ГГц существует комбинация параметров: давления газа, СВЧ мощности, конфигурации и формы волновых пучков, обеспечивающих однородный поток атомарного водорода на подложку диаметром 100 мм.

5. Показано, что для сравнения СВЧ разрядов, обеспечивающих однородный поток атомарного водорода на подложку, можно использовать величину энергии, требуемой для доставки одного атома водорода на подложку. Показано, что для СВЧ разрядов, поддерживаемых в H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси, при увеличении частоты излучения от 10 ГГц до 60 ГГц энергоцена монотонно падает от 22 эВ до 9,8 эВ. Показано, что однородность потока атомарного водорода на подложку нарушается при размерах плазменного слоя вдоль подложки более 10 длин волн.

6. Предложен и апробирован метод предварительной подготовки подложки, позволяющий создать плотный одночастичный слой центров роста алмаза на ее поверхности. Метод заключается в нанесении суспензии алмазного порошка наночастиц на плоскую круглую вращающуюся подложку. Получен однородный слой центров роста алмаза с плотностью нуклеации более 10<sup>10</sup> см<sup>-2</sup> на подложках диаметром от 25 до 75 мм, позволяющий выращивать однородную нанокристаллическую алмазную пленку толщиной не менее 100 нм.

7. В миллиметровом CVD реакторе получены нанокристаллические алмазные пленки толщиной от 150 нм до 300 нм на кремниевых подложках диаметром 25 и 75 мм при осаждении в Ar-H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> газовой смеси. Получены зависимости размеров кристаллов и фазового состава нанокристаллических алмазных пленок от условий их осаждения. Получены зависимости размеров кристаллов, фазового состава и электрических характеристик нанокристаллических алмазных пленок, осажденных в миллиметровом CVD реакторе, от содержания азота (от 5% до 25%) в газовой смеси.

8. Продемонстрировано осаждение тонких алмазных пленок на неплюскую, объемную металлическую подложку в миллиметровом CVD реакторе. Экспериментально показано улучшение однородности и увеличение плотности тока электронной эмиссии молибденовых катодов с алмазными покрытиями, полученными при различных условиях осаждения, по сравнению с катодами без алмазных пленок. Экспериментально продемонстрировано усиление эмиссионного тока с металлических катодов за счет их покрытия двухслойной алмазной пленкой с проводящим (легированным азотом) первым слоем и диэлектрическим вторым слоем.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1A. Chernov V.V., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Vul' A.Ya., Aleksenskii A.E. The nucleation and growth of nanocrystalline diamond films in millimeter-wave CVD reactor // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2012. V. 20. P. 600–605.

2A. Ivanov O., Isaev V., Radishev D., Lobaev M., Vikharev A., Chernov V., Kozlov A. and Hirshfield J. High Power Cold Cathode Employing Diamond and Related Films // IEEE Plasma Science. 2011. V. 39. №11. part 1. P. 2794–2795.

3A. Chernov V.V., Ivanov O.A., Isaev V.A., Radishev D.B., Vikharev A.L., Kozlov A.V. High-current electron emission of thin diamond films deposited on molybdenum cathodes // Diamond & Related Materials. 2013. V. 37. P. 87–91.

4A. Иванов О.А., Лобаев М.А., Чернов В.В., Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Исаев В.А. Экспериментальное исследование сильноточных катодов на основе алмазных пленок с использованием мощного компрессора СВЧ импульсов // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, №10. С. 797–807.

5A. Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Радищев Д.Б., Чернов В.В., Козлов А.В. Исследование непрерывного СВЧ разряда в двух пересекающихся волновых пучках миллиметрового диапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика, 2014. Т. 57, №12. С. 970–982.

6A. Ivanov O.A., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Lobaev M.A., Isaev V.A., Chernov V.V. Electron Emission Amplification of Cold Cathode by Two-layer Diamond Coating // Phys. Status Solidia. 2015. V. 212 (8). P. 1779–1784.

7A. Chernov V.V., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Radishev D.B., Kozlov A.V. Continuous microwave discharge maintained by two crossing millimeter-wave beams in hydrogen and argon. Numerical simulation and experiment // Plasma Sources, Science and Technology, 2015 (in press).

8A. Способ обработки подложек для выращивания на них нанокристаллических алмазных пленок большой площади: пат. 2471886 Рос. Федерация / Вихарев А.Л., Чернов В.В.; заявитель и патентообладатель ИПФ РАН. №2011129875; заявл. 20.07.11; опублик. 10.01.13.

9A. Chernov V.V., Radishev D.B., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. Investigation of gas discharge plasma maintained in crossed millimeter wave beams // Microwave discharges: fundamentals and applications: 8th Intern. Workshop, 10-14 September 2012. Zvenigorod, 2012. Book of abstracts. P. 72.

10A. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Radishev D.B., Chernov V.V., Kozlov A.V. Microwave discharge in intersecting millimeter wave beams and its applications // Microwave discharges: fundamentals and applications: 8th Intern. Workshop, 10-14 September 2012. Zvenigorod, 2012., Proceedings of 8th Intern. Workshop “Microwave discharges: fundamentals and applications”/ edited by Yu.A. Lebedev. Moscow: Yanus-K, 2012. P. 133-140.

11A. Bogdanov S.A., Chernov V.V., Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Vikharev A.L., Kossyi I.A., Radishev D.B. Carbon nanoparticles as precursors for diamond growth: an alternative seeding method // International Conference on Dia-

mond and Carbon Materials 2013, 2-5 September 2013. Riva del Garda, Italy, 2013.

12A. Чернов В.В., Козлов А.В., Богданов С.А. Исследование осаждения нанокристаллических алмазных пленок в плазмохимическом реакторе миллиметрового диапазона длин волн // ВНКСФ-16: всероссийская студенческая конференция, 22-29 апреля 2010. Волгоград, 2010. Материалы конференции. С. 171.

13A. Chernov V.V., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Vul' A.Ya., Aleksenskii A.E. The nucleation and growth of nanocrystalline diamond films in millimeter-wave CVD reactor / Advanced Carbon Nanostructures-2011: International conference, 4–8 July, 2011. Saint-Peterburg, 2011. Book of abstracts. P. 166.

14A. Chernov V.V., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Vul' A.Ya., Aleksenskiy A.E., Ermolaeva O.L. Nanocrystalline diamond films grown in a novel plasmochemical microwave reactor / Rusnanotech 2010: III<sup>d</sup> Int. forum of nanotechnology, 1-3 November, 2010. Moscow, 2010.

15A. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Chernov V.V., Kozlov A.V., Radishev D.B. CVD diamond films grown in millimeter-wave plasma-assisted reactor / Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications: 8<sup>th</sup> International Workshop, 9–16 July 2011. Nizhny Novgorod, 2011. Proceedings. P. 47.

16A. Chernov V.V., Gorbachev A.M. Modeling of continuous microwave discharge in two-crossed wave beams of millimeter wave band / Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications: 9<sup>th</sup> International Workshop, 24-30 July 2014. Nizhny Novgorod, 2014.

### Литература

1. Goodwin D.G. and Butler J.E. Theory of diamond chemical vapor deposition, in Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films: ed. by M.A. Prelas, G. Popovici, and L.K. Bigelow New York: Marcel Dekker, 1997. P. 527–581
2. Gruen D.M. Nanocrystalline diamond films // Annual Review of Material Science 1999 V. 29 P. 211.
3. Philip J., Hess P., Feygelson T., Butler J. E., Chattopadhyay S., Chen K.H. and Chen L.C. Elastic, mechanical, and thermal properties of nanocrystalline diamond films // J. Appl. Phys. 2003. V. 93 P. 2164.
4. Werner M. and Locher R. Growth and application of undoped and doped diamond films // Rep. Prog. Phys. 1998. V.61 P. 1665–1710.
5. Daenen M., Williams O.A., D'Haen J., Haenen K., Nesladek M. Seeding, growth and characterization of nanocrystalline diamond films on various substrates // Phys. Status Solidi a-Appl. Mater. Sci. 2006. V. 203 P. 3005.
6. Sekaric L., Parpia J.M., Craighead H.G., Feygelson T., Houston B.H., Butler J.E. Nanomechanical resonant structures in nanocrystalline diamond// Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 4455.
7. Mortet V., Elmazria O., Nesladek M., Assouar M.B., Vanhoyland G. and D'Haen J., D'Olielsaegeer M., Alnot P. Surface acoustic wave propagation in aluminum nitride-unpolished freestanding diamond structures // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 1720.
8. Specht C.G., Williams O.A., Jackman R.B., Schoepfer R. Ordered growth of neurons on diamond // Biomat. 2004. V. 25. P. 4073–4078
9. Ilic B., Czaplewski D., Craighead H.G., Neuzil P., Campagnolo C. and Batt C. Mechanical resonant immunospecific biological detector // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 450.
10. Williams O.A., Nesladek M., Daenen M., Michaelson S., Hoffman A., Osawa E., Haenen K., Jackman R.B. Growth, electronic properties and applications of nanodiamond // Diam. Relat. Mater. 2008. V. 17. P. 1080.
11. Ueda K., Kasu M. and Makimoto T. High pressure and high-temperature annealing as an activation method for ion-implanted dopants in diamond // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 122102.
12. Wang B., Xiong Y., Xia L., Zhang H., Zhang K. and Meng X. High-current electron emission characteristics of cathodes based on diamond films // Diam. Relat. Mater. 2011. V. 20. P. 433.
13. Yater J.E., Shaw J.L., Jensen K.L., Feygelson T., Myers R.E., Pate B.B. and Butler J.E. Secondary electron amplification using single-crystal CVD diamond film // Diam. Relat. Mater. 2011. V. 20. P. 798.
14. Williams O.A. Ultrananocrystalline diamond for electronic applications // Semicond. Sci. Technol. 2006. V. 21. R49–R56.
15. Diamond Films Handbook: ed. by Asmussen J., Reinhard D.K. New York: Marcel Dekker, 2001.
16. A. L. Vikharev, A.M. Gorbachev, A.V. Kozlov, V.A. Koldanov, A.G. Litvak, N.M. Ovechkin, D.B. Radishev, Yu.V. Bykov, M. Caplan Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor // Diam. Relat. Mater. 2006. V. 15. P. 502.
17. Vikharev A.L. // Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Workshop: Microwave Discharges. Fundamental and Applications: ed. by Yu. A. Lebedev Moscow: Yanus-K, 2006. P. 29.
18. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Radishev D.B., Muchnikov A.B. Microcrystalline diamond growth in presence of argon in millimeter wave plasma-assisted CVD reactor // Diam. Relat. Mater. 2008. V. 17. P. 1055.
19. Goodwin D. G. Scaling laws for diamond chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. 6888.
20. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Radishev D.B., Kozlov A.V. Gas temperature measurements in a 30GHz gyrotron-based CVD reactor // 28th ICPIG, July 15-20 2007. Prague, Czech Republic.
21. Ivanov O.A., Lobaev M.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Isaev V.A., Hirshfield J.L., Gold S.H. and Kinkead A.K. Active Microwave Pulse Compressor Using an Electron-Beam Triggered Switch // Phys. Rev. Letters. 2013. V. 110. P. 115002.

## Оглавление диссертации

Введение.....	7
<i>Глава 1.</i> Плазмохимическое осаждение алмазных пленок в многокомпонентной газовой среде. Обзор литературы.....	14
1.1. Общие сведения о плазмохимических процессах роста алмазных пленок из газовой фазы.....	16
1.2. Основные типы CVD реакторов с СВЧ излучением дециметрового диапазона длин волн.....	23
1.3. CVD реактор на основе свободно локализованного СВЧ разряда в миллиметровом диапазоне длин волн.....	25
1.4. Особенности поддержания СВЧ разряда в многокомпонентной газовой смеси.....	27
1.5. Синтез тонких (нанокристаллических) алмазных пленок и их свойства.....	30
<i>Глава 2.</i> Экспериментальное исследование газового разряда, поддерживаемого двумя пересекающимися волновыми пучками непрерывного СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн.....	42
2.1. Описание экспериментальной установки.....	43
2.2. Методы диагностики плазмы.....	48
2.3. Характеристики СВЧ разряда, поддерживаемого в различных условиях.....	53
<i>Глава 3.</i> Модель газового разряда в двух пересекающихся волновых пучках.....	61
3.1. Численная модель СВЧ разряда в многокомпонентной газовой смеси.....	61
3.2. Анализ характеристик СВЧ разрядов от условий их поддержания.....	79
<i>Глава 4.</i> Исследование осаждения на нанокристаллических алмазных пленок в миллиметровом CVD реакторе.....	114
4.1. Предварительная подготовка подложек.....	115
4.2. Методы диагностики алмазных пленок.....	121
4.3. Исследование процессов осаждения нанокристаллических алмазных пленок на диэлектрические подложки.....	123
4.4. Исследование осаждения тонких алмазных пленок на металлические подложки и изучение их эмиссионных свойств.....	135
Заключение.....	151
Приложения.....	154
Литература.....	162
Список публикаций по теме диссертации.....	168

ЧЕРНОВ Валерий Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
ТОНКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК В ПЛАЗМЕ,  
ПОДДЕРЖИВАЕМОЙ ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ПУЧКАМИ  
НЕПРЕРЫВНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Автореферат

Подписано к печати  
Формат 60 × 90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 112 (2015).

Отпечатано в типографии ИПФ РАН,  
603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46