

*На правах рукописи*



БОГДАНОВ Сергей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК В ГАЗАХ  
С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДОБАВКОЙ ПРИМЕСЕЙ**

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), 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: Манкелевич Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), г. Москва;

Петров Евгений Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), г. Нижний Новгород.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топичева Российской академии наук (ИНХС РАН), г. Москва.

Защита состоится 18 октября 2021 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [ipfran.ru](http://ipfran.ru) Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики Российской академии наук.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

В настоящее время в исследованиях, посвященных созданию новых материалов, большое внимание уделяется искусственному алмазу. Алмаз является все более доступным перспективным материалом благодаря бурному развитию методов синтеза искусственного алмаза, произошедшему за последние годы и позволившему получать алмаз с контролируруемыми свойствами. На сегодняшний день существует два метода синтеза алмаза — метод HPHT (High Pressure High Temperature), в котором алмаз растет в равновесных условиях, близких к природным, и метод CVD (Chemical Vapor Deposition), в котором рост алмаза происходит в неравновесной среде водорода и углеродосодержащего газа (как правило, метана) при низком давлении (50–500 Торр) [1]. Происходящий в газовой смеси комплекс объемных химических реакций, в которых ключевую роль играет атомарный водород, приводит к формированию сложного многокомпонентного состава газовой смеси. Различные компоненты, среди которых атомарный водород и углеродсодержащие радикалы (например,  $\text{CH}_3$  радикалы) диффундируют к поверхности подложки и приводят к росту алмаза в результате протекания поверхностных реакций при высокой температуре подложки (700–1000 °C) [2]. В настоящее время большое распространение получила плазменная технология синтеза алмаза – так называемая микроволновая CVD (microwave plasma assisted chemical vapor deposition) технология, в которой активация газовой смеси происходит с помощью СВЧ-разряда [3]. Как правило, СВЧ реакторы создаются на основе объемного резонатора с использованием частоты излучения 2.45 ГГц. Форма разряда близка к сферической или полусферической, а размер плазмы имеет величину порядка половины длины волны СВЧ излучения. Существуют и другие типы CVD реакторов, например, реакторы с горячей нитью, в которых активные компоненты нарабатываются на поверхности металлической нити, разогретой до высоких температур ~ 2000 °C. Однако, по сравнению с другими методами активации газовой смеси, микроволновая CVD технология обладает рядом преимуществ и позволяет выращивать наиболее высококачественные слои CVD алмаза с крайне малым содержанием примесей.

Актуальность исследования влияния примесей на процесс CVD синтеза алмаза обусловлена двумя основными причинами. Во-первых, значительный интерес представляет получение полупроводникового CVD алмаза с помощью добавок легирующих примесей. Этот интерес вызван многими уникальными свойствами алмаза, а также поиском новых широкозонных полупроводниковых материалов для создания мощных полупроводниковых приборов нового поколения. Во-вторых, некоторые примеси (азот, кремний, германий), будучи встроены в решетку алмаза могут образовывать оптически-активные центры (NV, SiV, GeV - центры), которые представляют значительный интерес

для развития квантовых технологий и очень активно исследуются в настоящее время [4–6].

Алмаз сочетает в себе превосходные механические (наибольшая твердость), тепловые (наивысшая теплопроводность), электронные (высокая подвижность электронов и дырок), а также оптические (прозрачность в широком диапазоне от ближнего УФ до дальнего ИК диапазона) свойства. Однако вплоть до настоящего времени уникальные свойства алмаза были фактически не доступны для применений в электронике из-за дороговизны и редкости природного алмаза, а также из-за малости его размеров. Благодаря появлению в конце 1980х годов технологии CVD синтеза впервые удалось получить алмазные пластины большой площади ( $> 100$  мм в диаметре) [2], а также монокристаллы алмаза с крайне низким содержанием примесей  $< 1$  ppb (1 ppb соответствует концентрации  $1.77 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) [7]. Хотя искусственный алмаз уже успешно применяется для создания выходных окон мощных источников СВЧ излучения [8], детекторов ионизирующих излучений [9], теплоотводов для лазеров и приборов силовой электроники [7, 10–12], эксплуатирующих его неординарные механические, оптические и тепловые свойства, в области полупроводниковой электроники алмаз все ещё не используется в полной мере. Последние достижения в технологии CVD синтеза алмаза позволяют рассчитывать на то, что потенциал CVD алмаза для создания полупроводниковых приборов будет реализован в ближайшем будущем [7].

На пути к реализации потенциала алмаза для полупроводниковой электроники необходимо преодолеть две главные проблемы: проблему легирования и проблему недостаточной площади доступных на сегодня монокристаллов алмаза. По сравнению с традиционными полупроводниками, примеси в алмазе (бор, фосфор, азот) имеют более глубокие энергетические уровни, а это означает, что для получения высокой концентрации носителей заряда необходимо достижение более высокого уровня легирования. Должны быть минимизированы все возможные эффекты, приводящие к уменьшению концентрации носителей заряда. Кроме того, при разработке некоторых типов электронных приборов, таких как высоковольтные диоды Шоттки и р-і-п диоды, требуются не только тонкие эпитаксиальные слои (толщиной порядка нескольких мкм), но также и значительно более толстые ( $> 100$  мкм) сильнолегированные слои, которые после отделения от подложки можно использовать в качестве основы для электронных приборов вертикальной структуры [13]. Синтез таких слоёв представляет собой непростую задачу, поскольку высокие уровни легирующих примесей могут приводить к изменениям в плазме, препятствующим долговременному осаждению [13]. Таким образом, исследование процесса CVD синтеза с добавками легирующих примесей представляет собой одну из важнейших задач на пути к реализации полупроводниковых приборов на алмазе.

Другой актуальной задачей является исследование образования перспективных центров окраски в процессе CVD синтеза, среди которых особое ме-

сто занимают NV центры, благодаря своим уникальным спиновым свойствам [14]. К настоящему времени получено множество конкретных научных результатов, демонстрирующих возможность создания реальных схем квантовой обработки информации и квантовой коммуникации при помощи NV-центров [15]. Среди самых последних результатов, особый интерес представляют исследования создания запутанных состояний, которые являются фундаментальной основой для квантовых технологий. В частности, продемонстрирована генерация запутанных состояний между удалёнными спиновыми кубитами [16], а также разрабатываются протоколы квантовой обработки информации в системе взаимодействующих близко расположенных NV центров [17]. Таким образом, достижения последних лет позволяют рассчитывать на то, что на основе NV-центров в алмазе может быть создана твердотельная система с возможностью адресной генерации и манипулирования квантовыми состояниями даже при комнатной температуре. Эти ожидания стимулируют интерес к разработке методов создания NV центров, в частности, изучению образования NV центров в процессе CVD синтеза, а также исследованию методов повышения концентрации NV центров в уже выращенном CVD алмазе.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является исследование процессов CVD синтеза алмаза в водород-метановой газовой смеси, содержащей добавки различных примесей (азота, бора, кислорода), изучение влияния примесей на качество, скорость роста и свойства выращенных поли- и монокристаллических алмазных слоёв. Особое внимание уделено выявлению связи параметров плазмохимического осаждения с характеристиками выращенного алмаза, в частности, с достигаемой концентрацией примесей в алмазе, а также с эффективностью встраивания примесей в алмаз в многокомпонентной газовой смеси.

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

1. Экспериментальное исследование плазмы СВЧ разряда с помощью оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) при высоких значениях удельного энерговклада (мощности СВЧ излучения, поглощаемой в единице объёма плазмы, более  $200 \text{ Вт/см}^3$ ).

2. Экспериментальное исследование синтеза монокристаллических слоёв полупроводникового алмаза, легированного бором в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси при различном уровне кислорода, в том числе исследование синтеза толстых сильнолегированных слоёв с гладкой поверхностью роста.

3. Экспериментальное исследование влияния малых добавок азота в газовую смесь на скорость роста и качество поликристаллических алмазных плёнок, выращенных при различных удельных энерговкладах в плазму.

4. Исследование эффективности встраивания азота и образования NV центров в монокристаллических слоях CVD алмаза, в том числе в дельта-слоях, выращенных в газовой смеси с добавлением азота, при различных условиях роста.

### Научная новизна работы

1. Обнаружен и исследован эффект локализации удельного энерговклада вблизи подложки, который наблюдается при кажущейся однородности интегрального оптического свечения плазмы. Впервые экспериментально установлен переход разряда в контрагированную форму с ярким тонким цилиндрическим филаментом, вытянутым вдоль направления электрического поля при удельном энерговкладе  $\sim 550 \text{ Вт/см}^3$ .

2. Предложен и апробирован метод экспериментального определения величины удельного энерговклада в плазму, основанный на использовании пространственного распределения светимости линии атомарного водорода H $\alpha$  серии Бальмера. Метод свободен от субъективности определения плазменного объёма и позволяет проводить корректное сравнение условий роста в разных CVD реакторах.

3. Показано, что использование кислорода в процессе CVD синтеза позволяет получать сильнолегированные эпитаксиальные слои (с концентрацией бора выше  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) высокого кристаллического совершенства (ширина алмазного пика  $1.8 \text{ см}^{-1}$ ) с гладкими поверхностями (шероховатость поверхности  $\sim 0.3 \text{ нм}$ ). Продемонстрирован рост толстых сильнолегированных слоёв толщиной  $130 \text{ мкм}$  с концентрацией бора  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , выращенных с использованием кислородсодержащих смесей в течение одного CVD процесса.

4. Показано, что влияние малых добавок азота на рост поликристаллических алмазных плёнок зависит от удельного энерговклада. Получены зависимости скорости роста и качества поликристаллических алмазных плёнок от содержания азота в газовой смеси в условиях разного удельного энерговклада ( $40$  и  $100 \text{ Вт/см}^3$ ). Обнаружено, что увеличение скорости роста при помощи малых добавок азота сильнее проявляется при более высоком удельном энерговкладе.

5. Исследовано образование NV центров в дельта-слоях, легированных азотом, толщиной  $3 \text{ нм}$  и концентрацией азота выше  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что концентрация NV центров в дельта-слое может быть увеличена (приблизительно на три порядка) с помощью облучения электронным пучком с энергией электронов  $200 \text{ кэВ}$  и отжига в вакууме при температуре  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Впервые получены ансамбли NV центров в дельта-слое с высокой поверхностной плотностью ( $\sim 2500 \text{ мкм}^{-2}$ ) и временем спиновой когерентности  $T_2 \sim 33 \text{ мкс}$ .

## Основные положения, выносимые на защиту

1. В СВЧ реакторе в водород-метановой газовой смеси при удельном энергокладе в плазму  $550 \text{ Вт/см}^3$  разряд переходит в контрагированную форму с ярким тонким цилиндрическим филаментом, вытянутым вдоль направления электрического поля, при пороговом давлении газа 375 Торр.

2. Совместное использование кислородсодержащих газовых смесей (с малыми добавками кислорода,  $O/C = 0.1$ ) и высоких удельных энергокладов в плазму ( $\sim 130 \text{ Вт/см}^3$ ) в СВЧ реакторе позволяет синтезировать толстые сильно легированные бором алмазные слои (толщиной более 100 мкм и концентрацией бора более  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) с высокой скоростью роста 4 мкм/ч в течение одного длительного процесса осаждения.

3. В СВЧ реакторе в водород-метановой газовой смеси увеличение скорости роста поликристаллических алмазных пленок без существенного ухудшения их качества достигается добавкой азота в газовую смесь, величина которой зависит от удельного энергоклада в плазму и составляет не более 50 ppm и 100 ppm при энергокладах  $40 \text{ Вт/см}^3$  и  $100 \text{ Вт/см}^3$ , соответственно. В СВЧ реакторе при удельном энергокладе в плазму  $30 \text{ Вт/см}^3$  увеличение скорости роста толстых поликристаллических алмазных пленок в 2.5 раза, при сохранении таких характеристик пленок, как тангенс угла потерь на частоте 170 ГГц и теплопроводность, реализуется при величине добавки азота в газовую смесь равной 50 ppm по отношению к концентрации водорода.

4. Дельта-легирование алмаза азотом позволяет получать сверхтонкие слои толщиной 3 нм с высокой концентрацией азота ( $1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) с одиночными NV центрами, образованными в процессе роста монокристаллического алмаза. Поверхностная плотность NV центров в дельта-слое составляет  $3.9 \pm 0.6 \text{ мкм}^{-2}$ . Облучение электронным пучком с энергией электронов 200 кэВ с последующим высокотемпературным отжигом позволяет повысить концентрацию NV центров на три порядка и получить локализованные ансамбли NV центров в дельта-слое с рекордной поверхностной плотностью  $\sim 2500 \text{ мкм}^{-2}$ .

## Практическая и научная ценность

Результаты, полученные в диссертации, могут быть востребованы для фундаментальных исследований непрерывного СВЧ разряда в CVD реакторах, используемых для синтеза алмаза, процессов роста моно- и поликристаллического CVD алмаза в плазме такого разряда. Эффект локализации удельного энергоклада, продемонстрированный в работе, имеет значение для совершенствования технологии CVD синтеза толстых монокристаллических алмазных слоёв.

В настоящее время фундаментальные исследования плазмохимического синтеза полупроводникового CVD алмаза переходят на стадию разработки электронных приборов на его основе. Поэтому полученные в диссертационной работе результаты исследования процессов легирования бором в много-

компонентной кислород-содержащей газовой смеси, а также демонстрация синтеза толстых сильнолегированных бором слоёв в такой смеси, имеют большое практическое значение.

Представленные в работе зависимости скорости роста алмазных плёнок от содержания азота в газовой смеси при разном удельном энергозатрате могут быть востребованы как для фундаментальных исследований механизмов влияния азота на процессы роста алмаза, так и для практических применений алмазных плёнок. Демонстрация синтеза толстых алмазных дисков без существенной потери качества при увеличении скорости роста в 2.5 раза за счёт добавок азота имеет практическое значение для использования CVD алмаза в качестве выходных окон гиротронов и других мощных источников СВЧ излучения.

Исследованные в работе методы создания и повышения концентрации NV центров в CVD алмазе имеют практическое значение для совершенствования сенсоров магнитных и электрических полей на основе NV центров и разработки твердотельной системы спиновых кубитов, используемой в области квантовой информации и квантовой коммуникации.

### **Степень достоверности результатов работы**

Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты были получены с использованием апробированных методик на современном оборудовании. Все полученные результаты являются обоснованными и обладают высокой степенью достоверности. Полученные в диссертационной работе результаты неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, обсуждались на семинарах ИПФ РАН, а также в дискуссиях с российскими и зарубежными научными сотрудниками, и опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах.

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. В частности, при ключевом участии автора происходила постановка задач, подготовка и проведение экспериментов. Большая часть экспериментов, описанных в диссертационной работе, проведена автором лично. Автор проводил обработку полученных экспериментальных данных, анализ и обсуждение результатов выполнялись при непосредственном участии автора.

### **Публикации и апробация работы**

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, выполненных в ИПФ РАН в 2013–2020 гг. Описанные в диссертации научные результаты докладывались на семинарах ИПФ РАН и на конкурсе работ мо-

лодых учёных (2016 год); на международной конференции по алмазным и углеродным материалам «International Conference on Diamond and Carbon materials» в 2013 и 2014 годах; на XII российской конференции по физике полупроводников в 2015 году; на всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» в 2016 году; на международной конференции «Наука будущего» в 2016 году; на международной конференции «Frontiers of Nonlinear Physics» в 2016 и 2019 годах; на международной конференции «SBDD XXII Hasselt Diamond Workshop» в 2017 году; на международной конференции «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications» в 2017 году; на международной конференции «10-th International Workshop on Microwave discharges» в 2018 году, на международном симпозиуме «Нанофизика и Наноэлектроника» в 2018 и 2019 годах, на международной конференции «Modern Development of Magnetic Resonance» в 2020 году и опубликованы в работах [1А–20А].

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и списка работ автора. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, включая 77 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 126 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранного направления исследований, определена цель и решаемые задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации и её краткое содержание.

В **главе 1** дан краткий обзор современного состояния исследований плазмохимического осаждения алмаза в многокомпонентных газовых смесях с добавками примесей, таких как азот, бор, кислород. Также в главе обсуждаются применения CVD алмаза, выращенного с добавками бора или азота.

В **разделе 1.1** обсуждается современное понимание процессов, происходящих в плазмохимическом реакторе для синтеза алмаза, подробно рассматривается связь величины удельного энерговклада в плазму со скоростью роста и качеством алмаза. Приведены типичные характеристики СВЧ разряда в CVD реакторах, используемых для роста алмаза. В разделе кратко обсуждаются механизмы роста алмаза в неравновесной плазме с акцентом на радикалах Н и  $\text{CH}_3$ , играющих основную роль в процессах роста алмаза. Также в разделе обосновывается значение удельного энерговклада как параметра, позволяющего проводить сравнение условий роста в различных CVD реакторах.

В **разделе 1.2** приведены наиболее значимые сведения о влиянии малых добавок азота на процессы плазмохимического синтеза алмаза и характеристики выращенных алмазных плёнок. Основное внимание уделено много-

кратному увеличению скорости роста алмаза при наличии добавок азота в составе газовой смеси, а также образованию дефектов, вызванных наличием азота, и их влиянию на характеристики алмаза. Приведены зависимости скорости роста поликристаллических алмазных плёнок, а также монокристаллических алмазных слоёв от величины добавки азота. Обсуждаются механизмы влияния азота на рост алмаза, отдельно рассматривается вопрос о влиянии малых добавок азота на скорость роста и морфологию поверхности монокристаллических алмазных слоёв.

В разделе 1.3 проведено сравнение результатов исследования синтеза легированных бором монокристаллических алмазных слоёв, проведенных ведущими научными группами за последние годы. Основное внимание уделено исследованиям встраиваемости бора в решетку алмаза в процессе роста, и, в частности, влиянию удельного энерговклада на встраиваемость бора. Обсуждаются вопросы влияния кислорода на процессы легирования бором, а также проблемы синтеза толстых сильнолегированных слоёв.

В разделе 1.4 обсуждается применение монокристаллических алмазных слоёв, легированных бором, в полупроводниковой электронике. Проводится сравнение ключевых характеристик полупроводникового алмаза (ширина запрещенной зоны, пробойное поле, подвижность носителей заряда, теплопроводность) с другими широкозонными полупроводниками. Рассматриваются различные варианты разрабатываемых электронных приборов на основе полупроводникового алмаза, таких как высоковольтные диоды Шоттки.

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальных установок, использованных в работе, методов диагностики плазмы СВЧ разряда, а также методов диагностики выращенных алмазных плёнок.

Раздел 2.1 содержит описание плазмохимического реактора на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого магнетроном на частоте 2.45 ГГц, который был использован в большей части экспериментов, представленных в работе. Приведена блок-схема установки и условия поддержания СВЧ разряда. В параграфе 2.1.1 описан специально разработанный модуль для легирования бором в процессе выращивания CVD алмаза (барботёр) в многокомпонентной кислородсодержащей газовой смеси.

В разделе 2.2 описан плазмохимический реактор на основе цилиндрического резонатора с быстрой сменой газовых смесей, который был использован для экспериментов по синтезу дельта-слоёв, легированных азотом. Приведены условия поддержания СВЧ разряда в этом реакторе, позволяющие получать тонкие (толщиной несколько нанометров) слои, легированные бором или азотом.

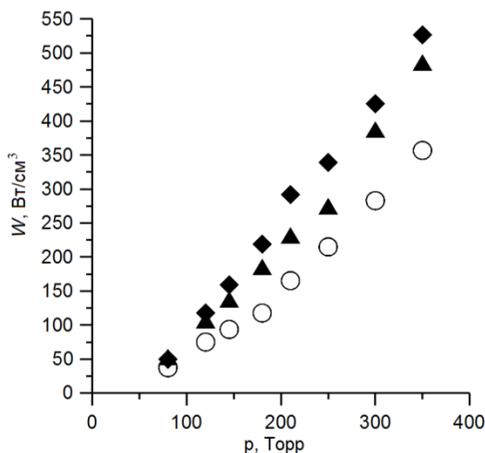
В разделе 2.3 описаны методы диагностики плазмы и выращенных алмазных плёнок. В параграфе 2.3.1 описана схема измерений оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС). В параграфе 2.3.2 описаны методы исследования выращенных алмазных плёнок и монокристаллических алмазных слоёв, использованные в работе: микро-рамановская спектроскопия, вторично-ионная

масс-спектрометрия (ВИМС), температурная спектроскопия адмиттанса, а также конфокальная микроскопия.

**Глава 3** посвящена подробному исследованию плазмы СВЧ разряда при условиях высокого удельного энерговклада в плазму. Представлены результаты исследований характеристик СВЧ разряда при различном давлении газовой смеси.

В разделе 3.1 обсуждаются вопросы корректного сравнения условий роста алмаза в различных реакторах, отмечается наличие неопределенности, возникающей при визуальном определении объема плазмы, и, как следствие, величины удельного энерговклада. Центральным вопросом при этом является вопрос о связи области наблюдаемого оптического свечения разряда с областью пространства внутри резонатора, где происходит поглощение СВЧ энергии. Показано, что в водород-метановой смеси при высоких давлениях область пространства внутри резонатора, где происходит поглощение энергии, может не совпадать с областью наблюдаемого оптического свечения разряда, что приводит к существенным ошибкам при визуальном определении объема плазмы. Описывается разработанный в работе метод экспериментального определения величины удельного энерговклада, свободный от субъективности определения плазменного объема и позволяющий проводить корректное сравнение условий роста в разных CVD реакторах. Для определения объема плазмы предлагается использовать распределение интенсивности свечения линии  $H\alpha$  атомарного водорода, полученное после обработки фотографий СВЧ разряда, сделанных с помощью цифровой зеркальной камеры через фильтр  $H\alpha$ . Было проведено сравнение расчетного (полученного с помощью двумерной самосогласованной модели) и экспериментального изображения разряда, полученного через фильтр  $H\alpha$ . Эксперименты проводились при следующих условиях: поглощенная мощность 2.3 кВт, поток газа 300 sccm (количество стандартных кубических сантиметров в минуту), давление водорода или водород-метановой газовой смеси (с 1% содержанием метана) варьировалось в пределах 80–350 Торр.

На Рисунке 1 приведены полученные в эксперименте зависимости удельного энерговклада от давления газовой смеси при определении объема плазмы различными способами. Объем плазмы определялся по измерениям интегральной светимости плазмы для разряда в чистом водороде и в водород-метановой газовой смеси, а также по измерениям распределения интенсивности линии  $H\alpha$  атомарного водорода для разряда в водород-метановой газовой смеси. Граница области плазмы определялась для всех измерений по 15 % уровню интенсивности. В проведенных экспериментах наибольшее значение удельного энерговклада оказалось равным 500 Вт/см<sup>3</sup> при давлении 350 Торр (получено при определении объема плазмы по распределению интенсивности линии  $H\alpha$  атомарного водорода).



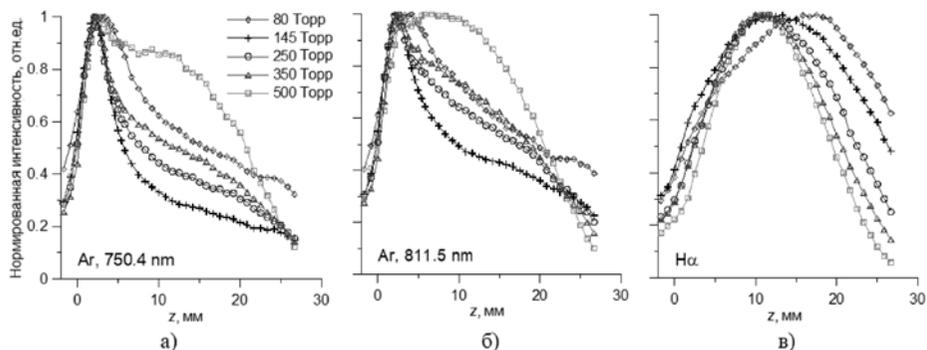
**Рис. 1.** Зависимость удельного энерговклада в плазму от давления газа измеренная в водород метановой газовой смеси с 1% содержанием метана по интегральной светимости плазмы (ромбы); по распределению интенсивности линии  $H\alpha$  для водорода (треугольники); а также измеренная по интегральной светимости плазмы для разряда в чистом водороде (круги) при поглощенной мощности 2.3 кВт

В разделе 3.2 обсуждается наличие существенной неоднородности пространственного распределения удельного энерговклада, а также особенности пространственного распределения основных компонент плазмы СВЧ разряда в водороде с малыми добавками аргона.

В разделе представлены результаты экспериментального исследования СВЧ разряда (в том числе, в условиях высокого удельного энерговклада) с помощью оптической эмиссионной спектроскопии. Основное внимание уделено исследованию пространственного распределения интенсивности излучения линий атомарного водорода и аргона в СВЧ разряде, поддерживаемом в CVD реакторе (рис. 2). Полученные профили интенсивности излучения атомов аргона характеризуют распределение удельного энерговклада и позволяя определить вид и масштаб его неоднородности в плазме.

В параграфе 3.2.1 представлены результаты экспериментальных исследований пространственных распределений интенсивностей линий излучения аргона и атомарного водорода в плазме с помощью оптической эмиссионной спектроскопии в широком диапазоне давлений от 40 до 500 Торр. В экспериментах проводились измерения интенсивности следующих линий излучения: атомарного водорода  $H\alpha$  (656.3 нм),  $H\beta$  (486.1 нм),  $H\gamma$  (434.0 нм), аргона  $Ar$  (750.4 нм и 811.5 нм), молекулы  $C_2$  ( $d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$  (полоса Свана), около 516 нм) и радикала  $CH$  ( $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ , около 430 нм). Результаты экспериментов свидетельствуют о существовании эффекта локализации удельного энерго-

вклада вблизи подложки, которое имеет место, несмотря на кажущуюся однородность интегрального оптического свечения плазмы.



**Рис. 2.** Распределение интенсивности линий излучения аргона 750.4 нм (а), 811.5 нм (б) и атомарного водорода  $H\alpha$  (в) вдоль оси разряда  $Z$  при различном давлении

В [разделе 3.3](#) представлены результаты продолжения экспериментальных исследований пространственных распределений интенсивностей линий излучения аргона и атомарного водорода с помощью оптической эмиссионной спектроскопии в диапазоне давлений от 40 до 500 Торр в случае водород-метановой газовой смеси при различном содержании метана (0.1 и 1%). Показано, что даже малое содержание метана порядка 0.1% уже существенным образом влияет на интенсивность излучения разряда, появление углеродосодержащих компонент в газовой смеси приводит к значительному увеличению интенсивности всех линий излучения. Однако добавка метана не влияет в целом на форму пространственных распределений интенсивностей различных линий.

В [разделе 3.4](#) представлены результаты экспериментов по исследованию плазмы СВЧ разряда в области высоких давлений 300–500 Торр, в ходе которых впервые обнаружено, что в водород-метановой газовой смеси существует пороговое давление (375 Торр), начиная с которого происходит контракция микроволнового разряда – форма разряда скачкообразно меняется, разряд переходит в контрагированную форму с ярким тонким цилиндрическим филаментом, вытянутым вдоль направления электрического поля (рис. 3).

Материалы, изложенные в третьей главе диссертации, опубликованы в работах [1А–3А, 13А].

**Глава 4** посвящена исследованию плазмохимического синтеза алмазных плёнок, легированных бором. При этом особое внимание уделено выявлению связи процессов, происходящих в плазме (таких, как наработка борсодержащих радикалов), и эффективности встраивания бора в решётку алмаза, за которое ответственны поверхностные процессы.

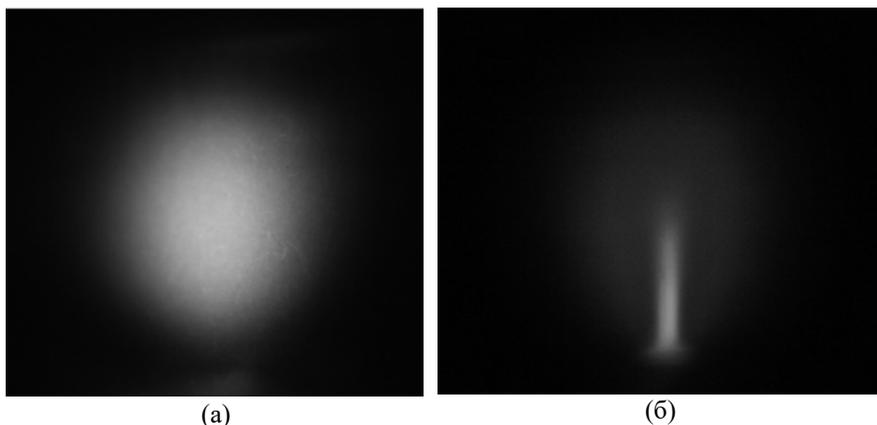
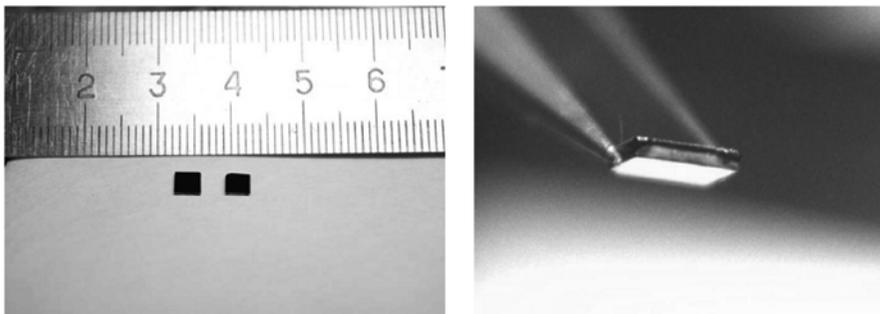


Рис. 3. Фотографии разряда: диффузная форма при давлении 350 Торр (а) и контрагированная при давлении 380 Торр (б)

В разделе 4.1 представлены результаты экспериментального исследования синтеза эпитаксиальных слоёв монокристаллического CVD алмаза, легированного бором, в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси. Обсуждаются вопросы о влиянии кислорода на процессы легирования бором, изменении встраиваемости бора в присутствии кислорода, а также возможности синтеза сильнолегированных (с концентрацией выше  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) алмазных слоёв в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси. Получена серия образцов с легированными монокристаллическими алмазными слоями с концентрацией бора в пределах  $2.9 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , выращенных при различном содержании бора и различном уровне кислорода ( $\text{В/С} = 2400 - 18000 \text{ ppm}$ ,  $\text{О/С} = 0.04 - 0.16$ ). Легированные алмазные слои с толщинами 2-2.7 мкм были выращены в условиях с высоким удельным энерговыделением ( $\sim 130 \text{ Вт/см}^3$ ), позволяющих получать алмаз высокого кристаллического совершенства при достаточно высокой скорости роста  $\sim 4 \text{ мкм/ч}$ . Концентрация бора в образцах была определена с помощью вторично-ионной масс спектрометрии (ВИМС).

В разделе 4.2 обсуждаются преимущества многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси, которая была впервые использована для роста толстых ( $> 100 \text{ мкм}$ ) сильнолегированных слоёв с концентрацией бора  $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Экспериментально установлено, что в кислородсодержащих смесях возможен синтез толстых сильнолегированных слоёв (толщиной  $> 100 \text{ мкм}$ ) при высокой скорости роста  $4 \text{ мкм/ч}$  и без образования сажи в реакторе. Показано, что использование кислородсодержащих смесей в процессе легирования в сочетании с условиями высокого удельного энерговыделения ( $130 \text{ Вт/см}^3$ ) позволяет решить проблему синтеза толстых высококачественных сильнолегированных слоёв CVD алмаза. Выращенные толстые сильнолегированные алмазные слои (рис. 4) могут быть использованы для создания мощных электронных

приборов, в частности, диодов Шоттки и р-і-n диодов с вертикальной структурой.



**Рис. 4.** Сильнолегированные алмазные слои ( $[B]=2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной 130 мкм

В [разделе 4.3](#) представлены результаты детального исследования процессов синтеза монокристаллических алмазных слоёв легированных бором в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, а также исследования выращенных легированных слоёв с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии. Получена серия образцов с легированными монокристаллическими алмазными слоями с концентрацией бора в пределах  $2.35 \cdot 10^{18} - 1.8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , выращенных при различном содержании бора и различном уровне кислорода ( $B/C = 500 - 40000 \text{ ppm}$ ,  $O/C = 0.1, 0.5$ ). Изучено поведение линии излучения молекулы ВН для различных значений  $O/C$  с увеличением отношения  $B/C$  в газовой фазе.

В параграфе 4.3.1 рассматривается вопрос о механизмах влияния кислорода на синтез легированных бором алмазных слоёв. Приведены результаты исследования легированных бором слоёв, выращенных при разном уровне кислорода ( $O/C = 0.1$  и  $O/C = 0.5$ ). В параграфе 4.3.2 рассматривается вопрос о связи процессов, происходящих в плазме с поверхностными процессами, ответственными за встраивание бора.

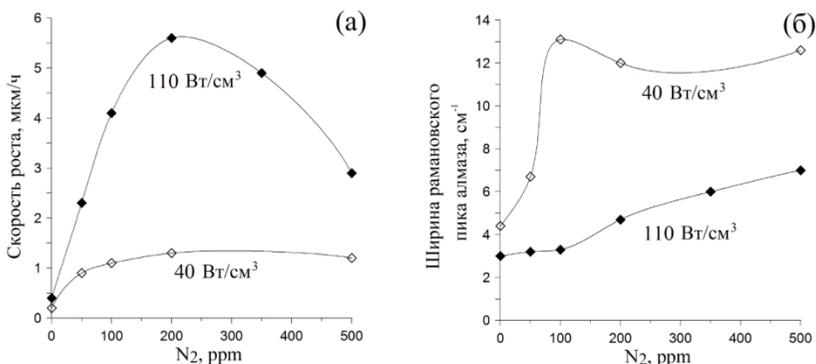
В [разделе 4.4](#) приведены результаты исследования электрических характеристик монокристаллических алмазных слоёв, легированных бором, с помощью температурной спектроскопии адмиттанса.

Материалы, изложенные в четвёртой главе диссертации, опубликованы в работах [4А–6А, 14А–16А].

**Глава 5** посвящена исследованию влияния малых добавок азота на процесс плазмохимического синтеза поли- и монокристаллических алмазных плёнок.

В [разделе 5.1](#) приведены результаты исследования зависимости скорости роста и качества поликристаллических алмазных плёнок от содержания азота в газовой смеси в условиях разного удельного энергозатрата. Представлены

результаты двух серий экспериментов, в которых алмазные плёнки выращивались в водород метановой газовой смеси с добавками азота ( $N_2$ ) на кремниевых подложках диаметром 22 мм (рис. 5). При этом доля азота в газовой смеси изменялась в пределах от 0 до 500 ppm (1 ppm выражает миллионную долю азота по отношению к концентрации водорода в газовой смеси). Обнаружено, что увеличение скорости роста при помощи малых добавок азота сильнее проявляется при более высоком удельном энергокладе. В параграфе 5.1.1 приведены результаты серии экспериментов, проведенной при удельном энергокладе 110 Вт/см<sup>3</sup>. В параграфе 5.1.2 приведены результаты серии экспериментов, проведенной при удельном энергокладе 40 Вт/см<sup>3</sup>.



**Рис. 5.** Зависимость скорости роста алмазных плёнок (а) и ширины рамановского пика алмаза (б) от содержания азота в газовой смеси

В параграфе 5.1.3 обсуждаются механизмы влияния азота на процессы плазмохимического синтеза алмаза, при этом основное внимание уделяется роли активных CN радикалов. В параграфе 5.1.4 приведены результаты длительного процесса синтеза поликристаллического алмазного диска толщиной 0.4 мм, выращенного с добавлением 50 ppm азота. Изучены свойства выращенного диска, такие как теплопроводность и диэлектрические потери в микроволновом диапазоне. Показано, что выращенный с добавлением 50 ppm азота алмазный диск имеет тангенс угла потерь, пригодный для использования в качестве выходных окон мощных гиротронов и других мощных источников СВЧ излучения, при этом скорость роста в 2.5 раза выше, чем скорость роста в аналогичном режиме без использования малых добавок азота.

В разделе 5.2 приведены результаты исследования встраиваемости азота в эпитаксиальных слоях монокристаллического CVD алмаза. В параграфе 5.2.1 представлены результаты исследования влияния условий роста на встраиваемость азота. Определено значение эффективности встраивания азота, равное  $8 \cdot 10^{-6}$ . Получены зависимости концентрации азота в алмазе от потока азота,

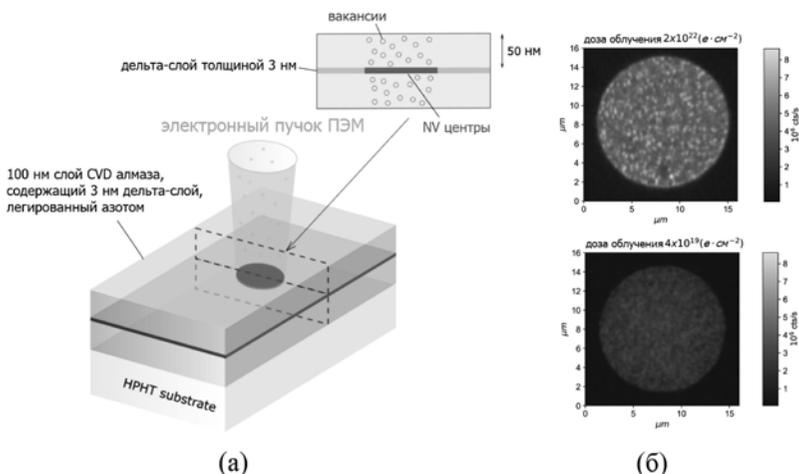
содержания метана в газовой смеси и температуры подложки. Установлено, что более низкие температуры подложки способствуют увеличению концентрации азота в алмазе.

В разделе 5.3 приведены результаты исследования образования NV центров в однородно легированных азотом монокристаллических слоях CVD алмаза. В параграфе 5.3.1 приведены результаты измерения концентрации NV центров в однородно легированных азотом слоях и определения значения эффективности конверсии азота в NV центры. Обсуждаются вопросы формирования NV центров в процессе роста. В параграфе 5.3.2 изучено влияние угла разориентации (угла между нормалью к поверхности и кристаллографическим направлением  $\langle 100 \rangle$ ) на образование NV центров.

В разделе 5.4 представлены результаты исследования синтеза дельта-слоёв, легированных азотом, толщиной 3 нм. В разделе 5.5 приведены результаты исследования фотолюминесценции и спиновых свойств NV центров, образованных в дельта-слоях. Проведено наблюдение одиночных NV центров в дельта-слоях с помощью конфокальной микроскопии. Также исследован метод повышения концентрации NV центров в дельта-слое с помощью облучения электронным пучком с энергией электронов 200 кэВ и высокотемпературного отжига. Впервые получены ансамбли NV центров в дельта-слое с высокой поверхностной плотностью ( $\sim 2500 \text{ мкм}^{-2}$ ) и временем спиновой когерентности  $T_2 \sim 33 \text{ мкс}$  (рис. 6).

Материалы, изложенные в пятой главе диссертации, опубликованы в работах [7А–12А, 17А–20А].

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.



**Рис. 6.** Схема эксперимента и структура исследуемого образца (а); изображение облученных областей, полученное с помощью конфокального микроскопа (б)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Экспериментально изучено пространственное распределение интенсивности излучения основных компонент плазмы, поддерживаемой в CVD реакторе с частотой СВЧ излучения 2.45 ГГц (СВЧ реакторе) в водороде и водород-метановой газовой смеси в условиях высокого удельного энерговклада в плазму (более  $200 \text{ Вт/см}^3$ ). Обнаружен эффект локализации удельного энерговклада в плазму вблизи подложки, наблюдаемый при кажущейся однородности интегрального оптического свечения плазмы и связанный с перераспределением электрического поля в плазме с концентрацией электронов выше критической. Эффект локализации удельного энерговклада в плазму проявляется при высоких давлениях и становится ярко выраженным при давлении более 150 Торр.

2. Разработан метод экспериментального определения средней величины удельного энерговклада в плазму, основанный на определении объема плазмы по пространственному распределению светимости линии атомарного водорода  $\text{H}\alpha$  серии Бальмера. Метод свободен от субъективности определения плазменного объема и позволяет проводить корректное сравнение условий роста алмаза в СВЧ реакторах различной конструкции.

3. В СВЧ реакторе в водород-метановой газовой смеси при удельном энергокладе в плазму  $\sim 550 \text{ Вт/см}^3$  впервые экспериментально установлен переход разряда в контрагированную форму с ярким тонким цилиндрическим филаментом, вытянутым вдоль направления электрического поля. Изучено пространственное распределение интенсивности излучения атомарного водорода и молекулы  $\text{C}_2$  в контрагированном разряде и обнаружено увеличение интенсивности излучения атомарного водорода более чем в 10 раз при контракции разряда. Установлено, что разряд переходит в контрагированную форму при пороговом давлении газа 375 Торр. Контрагированная форма разряда наблюдается в водород-метановой смеси (при содержании метана  $\sim 1\%$ ) и не наблюдается в чистом водороде.

4. В СВЧ реакторе проведено исследование процессов легирования бором монокристаллических алмазных слоёв в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси с помощью оптической эмиссионной спектроскопии. Исследовано поведение интенсивности излучения радикала ВН (433.2 нм) в зависимости от отношения содержания атомов бора к углероду в газовой фазе ( $\text{В/С} = 500 - 40000 \text{ ppm}$ ) при различном уровне кислорода ( $\text{О/С} = 0.02, 0.1$  и  $0.5$ ). Экспериментально установлено, что увеличение содержания кислорода в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси приводит к уменьшению интенсивности излучения бор-содержащих радикалов в плазме СВЧ разряда и концентрации бора в алмазе. Эффективность встраивания бора уменьшается от 0.025 до 0.009 при увеличении отношения  $\text{О/С}$  от 0.1 до 0.5. При малых добавках кислорода ( $\text{О/С} = 0.1$ ) использование высоких значений отношения

В/С в газовой смеси (выше 40000 ppm) позволяет синтезировать сильно легированные алмазные слои толщиной 2.5–4 мкм и с концентрацией бора более  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , отличающиеся высоким кристаллическим совершенством (ширина рамановского пика  $1.8 \text{ см}^{-1}$ ) и гладкой поверхностью (шероховатость поверхности  $\sim 0.3 \text{ нм}$ ).

5. В СВЧ реакторе проведено осаждение легированных бором монокристаллических алмазных слоёв в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси. Установлено, что совместное использование кислородсодержащих газовых смесей (с малыми добавками кислорода,  $\text{O/C} = 0.1$ ) и высоких удельных энергокладов в плазму ( $\sim 130 \text{ Вт/см}^3$ ) позволяет синтезировать толстые сильно легированные бором алмазные слои (толщиной более 100 мкм и концентрацией бора более  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) с высокой скоростью роста 4 мкм/ч в течение одного длительного процесса осаждения.

6. В СВЧ реакторе проведено исследование влияния малых добавок азота на осаждение поликристаллических алмазных плёнок в водород метановой газовой смеси. Установлено, что увеличение скорости роста поликристаллических алмазных пленок без существенного ухудшения их качества достигается добавкой азота в газовую смесь, величина которой зависит от удельного энергоклада в плазму и составляет не более 50 ppm и 100 ppm при энергокладах в плазму  $40 \text{ Вт/см}^3$  и  $100 \text{ Вт/см}^3$ , соответственно. В реакторе при энергокладе в плазму  $30 \text{ Вт/см}^3$  увеличение скорости роста толстых поликристаллических алмазных пленок в 2.5 раза, при сохранении таких характеристик пленок, как тангенс угла потерь на частоте 170 ГГц и теплопроводность, реализуется при добавке азота в газовую смесь равной 50 ppm по отношению к концентрации водорода.

7. Проведено исследование концентрации встроенного азота в эпитаксиальных слоях монокристаллического CVD алмаза в зависимости от условий роста (величины добавки азота, содержания метана, температуры подложки) и от угла разориентации подложки. Определено значение эффективности встраивания азота в однородно легированных азотом слоях, равное  $8 \cdot 10^{-6}$ . Установлено, что эффективность встраивания азота растёт с уменьшением температуры подложки (приблизительно в 4 раза при изменении температуры подложки от 900 до 750 °C). Показано, что эффективность встраивания азота возрастает в 2 раза при увеличении угла разориентации от 0 до 4°.

8. Проведено исследование дельта-легирования монокристаллического алмаза азотом и образования NV центров в дельта-слоях. Установлено, что в слое толщиной 3 нм с высокой концентрацией азота ( $1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) поверхностная плотность NV центров, образованных в процессе роста дельта-слоя, составляет  $3.9 \pm 0.6 \text{ мкм}^{-2}$ . Также исследован метод повышения концентрации NV центров в дельта-слое с помощью облучения электронным пучком с энергией электронов 200 кэВ и высокотемпературного отжига. Показано, что эффективность конверсии азота в NV центры достигает величины 6% при дозе

облучения  $2 \cdot 10^{22}$  е/см<sup>2</sup>, что соответствует увеличению концентрации NV центров приблизительно на три порядка. Впервые получены ансамбли NV центров в дельта-слое с высокой поверхностной плотностью ( $\sim 2500$  мкм<sup>-2</sup>) и временем спиновой когерентности  $T_2 \sim 33$  мкс.

### Цитируемая литература

1. Pierson H.O., Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes, Noyes Publications, 1994.
2. Dischler B., Wild C. Low-Pressure Synthetic Diamond, Springer, 1998.
3. Asmussen J., Reinhard D.K., Diamond Films Handbook, Marcel Dekker, 2002.
4. Jelezko F. and Wrachtrup J. // Phys. Stat. Sol. (a). 2006. Vol. 203. P. 3207.
5. Mildren R.P., Rabeau J.R. Optical Engineering of Diamond, Wiley, 2013.
6. Praver S. and Aharonovich I. Quantum Information Processing with Diamond, Elsevier, 2014.
7. Koizumi S., Umezawa H., Pernot J., Suzuki M., Power Electronics Device Applications of Diamond Semiconductors, Elsevier, 2018.
8. Brandon J.R., Coe S.E., Sussmann R.S., Sakamoto K., Sporl R., Heidinger R., Hanks S. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications // Fusion Engineering and Design. 2001. Vol.53. P. 553.
9. Manfredotti C. CVD diamond detectors for nuclear and dosimetric applications // Diamond & Related Materials. 2005. Vol. 14. P. 531.
10. Geis M.W., Wade T.C., Wuorio C.H., Fedynyshyn T.H., Duncan B., Plaut M.E., Varghese J.O., Warnock S.M., Vitale S.A., Hollis M.A. Progress Toward Diamond Power Field-Effect Transistors // Phys. Status Solidi A. 2018. Vol. 215. P. 1800681.
11. Koizumi S., Nebel C., Nesladek M. Physics and Applications of CVD Diamond, Wiley, 2008.
12. Sussman S. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors // Wiley, 2009.
13. Issaoui R., Achard J., Silva F, Tallaire A., Tardieu A., Gicquel A., Pinault M. A., and Jomard F. Growth of thick heavily boron-doped diamond single crystals: Effect of microwave power density // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 182101.
14. Doherty M.W., Manson N.B., Delaney P., Jelezko F., Wrachtrup J., Hollenberg L.C.L. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond // Physics Reports. 2013. Vol. 528. No. 1. P. 1.
15. Pezzagna S., Meijer J. Quantum computer based on color centers in diamond // Appl. Phys. Rev. 2021. Vol. 8. P. 011308.
16. Bernien H., Hensen B., Pfaff W., Koolstra G., Blok M.S., Robledo L., Tamini- au T.H., Markham M., Twitchen D.J., Childress L., Hanson R. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres // Nature. 2013. Vol. 497. P. 86.

17. Xu Z., Yin Z., Han Q., Li T. Quantum information processing with closely-spaced diamond color centers in strain and magnetic fields // *Optical Materials Express*. 2019. Vol. 9. No. 12. P. 4654.

**Основные материалы диссертации опубликованы в работах**

- 1A. Lobaev M.A., Bogdanov S.A., Radishev D.B., Vikharev A.L., Gorbachev A.M. Method of power density determination in microwave discharge, sustained in hydrogen–methane gas mixture // *Diamond & Related Materials*. 2016. Vol. 66. P. 177.
- 2A. Bogdanov S.A., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Radishev D.B., Lobaev M.A. Study of microwave discharge at high power density conditions in diamond chemical vapor deposition reactor by optical emission spectroscopy // *Diamond & Related Materials*. 2019. Vol. 97. P. 107407.
- 3A. Богданов С.А., Горбачев А.М., Радищев Д.Б., Вихарев А.Л., Лобаев М.А. Контракция микроволнового разряда в реакторе для газофазного осаждения алмаза // *Письма в Журнал технической физики*. 2019. Т. 45(3). С. 30.
- 4A. Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Drozdov M.N., Radishev D.B. Synthesis of thick and high-quality homoepitaxial diamond with high boron doping level: Oxygen effect // *Diamond & Related Materials*. 2017. Vol. 74. P. 59.
- 5A. Zubkov V.I., Kucherova O.V., Bogdanov S.A., Zubkova A.V., Butler J.E., Ilyin V.A., Afanas'ev A.V., and Vikharev A.L. Temperature admittance spectroscopy of boron doped chemical vapor deposition diamond // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118. P. 145703.
- 6A. Суровегина Е.А., Демидов Е.В., Дроздов М.Н., Мурель А.В., Хрыкин О.И., Шашкин В.И., Лобаев М.А., Горбачев А.М., Вихарев А.Л., Богданов С.А., Исаев В.А., Мучников А.Б., Чернов В.В., Радищев Д.Б., Батлер Д.Е. Атомный состав и электрофизические характеристики эпитаксиальных слоев CVD алмаза, легированных бором // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50(12). С. 1595.
- 7A. Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Muchnikov A.B., Radishev D.B., Ovechkin N.M., Parshin V.V. Growth-rate Enhancement of High-quality, Low-loss CVD-produced Diamond Disks Grown for Microwave Windows Application // *Chem. Vap. Deposition*. 2014. Vol. 20. P. 32–38.
- 8A. Lobaev M.A., Gorbachev A.M., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Radishev D.B., Isaev V.A., Chernov V.V., Drozdov M.N. Influence of CVD diamond growth conditions on nitrogen incorporation // *Diamond & Related Materials*. 2017. Vol. 72. P. 1.
- 9A. Lobaev M.A., Gorbachev A.M., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Radishev D.B., Isaev V.A., Drozdov M.N. NV-center formation in single crystal diamond at different CVD growth conditions // *Physica Status Solidi A*. 2018. Vol. 215(22). P. 1800205.

- 10A. Богданов С.А., Горбачев А.М., Радишев Д.Б., Вихарев А.Л., Лобаев М.А., Гусев С.А., Татарский Д.А., Большедворский С.В., Акимов А.В., Чернов В.В. Создание локализованных ансамблей NV-центров в CVD-алмазе с помощью облучения электронным пучком // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45(6). С. 36.
- 11A. Bogdanov S.A., Bolshedvorskii S.V., Zelenev A.I., Soshenko V.V., Rubinas O.R., Radishev D.B., Lobaev M.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Drozdov M.N., Sorokin V.N., Akimov A.V. Optical investigation of as-grown NV centers in heavily nitrogen doped delta layers in CVD diamond // Materials Today Communications. 2020. Vol. 24. P. 101019.
- 12A. Bogdanov S.A., Gorbachev A.M., Radishev D.B., Vikharev A.L., Lobaev M.A., Gusev S.A., Tatarskiy D.A. Investigation of High-Density Nitrogen Vacancy Center Ensembles Created in Electron-Irradiated and Vacuum-Annealed Delta-Doped Layers // Physica Status Solidi – Rapid Research Letters. 2021. P. 2000550.
- 13A. Lobaev M.A., Bogdanov S.A., Radishev D.B., Vikharev A.L., Gorbachev A.M. Investigation of microwave discharge in cavity reactor excited in the TM<sub>013</sub> mode // Proceedings of IX International workshop “Microwave discharges: fundamentals and applications”, September 7–11, 2015, Cordoba (Spain), P.83.
- 14A. Богданов С.А., Вихарев А.Л., Дроздов М.Н. Исследование синтеза полупроводникового CVD алмаза при высокой степени легирования // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1(1). С. 79.
- 15A. Зубков В.И., Кучерова О.В., Зубкова А.В., Butler J., Вихарев А.Л., Богданов С.А. Исследования примесного уровня бора в полупроводниковом алмазе методом температурной спектроскопии адмиттанса // Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников, Ершово, 21–25 сентября 2015 г., С. 337.
- 16A. Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Radishev D.B., Zubkov V.I., Solomnikova A.V., Kucherova O.V. Investigation of synthesis and electronic properties of semiconductor CVD diamond with high boron doping level // Proceedings of VII International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics (FNP–2016)", Nizhny Novgorod – St. Petersburg – Nizhny Novgorod, Russia, July 17–July 23, 2016, P. 321.
- 17A. Bogdanov S.A., Lobaev M.A., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Radishev D.B., Isaev V.A., Drozdov M.N., Gusev V.A., Tatarsky D.A. Investigation of optical properties of different color centers in diamond // Proceedings of VII International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics (FNP–2019)", Nizhny Novgorod – Saratov – Nizhny Novgorod, Russia, June 28–July 4, 2019, P. 269.
- 18A. Lobaev M.A., Gorbachev A.M., Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Radishev D.B., Isaev V.A., Chernov V.V., Drozdov M.N., Yunin P.A. Influence of CVD diamond growth conditions and misorientation angle on nitrogen incorporation // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. P. 02003.

- 19A. Bogdanov S.A., Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Lobaev M.A., Drozdov M.N., Radishev D.B., Chernov V.V. Study of the controlled creation of NV-centers ensembles in CVD diamond by method of delta doping // Proceedings of VII International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics (FNP-2016)", Nizhny Novgorod – St. Petersburg – Nizhny Novgorod, Russia, July 17–July 23, 2016, P. 330.
- 20A. М.А. Лобаев, А.М. Горбачев, С.А. Богданов, М.Н. Дроздов, А.Л. Вихарев, Д.Б. Радищев, В.А. Исаев, П.А. Юнин Исследование процессов выращивания легированных азотом тонких слоев алмаза для создания пространственно локализованных NV центров // Нанопизика и наноэлектроника. Труды XXII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 12–15 марта 2018 г.), Т. 2, С. 689–690.

БОГДАНОВ Сергей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА  
АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК В ГАЗАХ  
С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДОБАВКОЙ ПРИМЕСЕЙ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 2.07.2021 г.  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 25(2021).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН,  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46