

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Богданова Сергея Александровича «Исследование плазмохимического синтеза алмазных пленок в газах с контролируемой добавкой примесей», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертационная работа С.А. Богданова посвящена экспериментальному исследованию плазмы непрерывного СВЧ разряда в реакторе на основе объемного резонатора, процессов плазмохимического синтеза алмаза в плазме такого разряда. В последнее время искусственный алмаз стал рассматриваться в качестве перспективного материала как для создания мощных и высокочастотных электронных приборов, так и для разработки твердотельной основы для целого ряда квантовых технологий, которые используют уникальные свойства центров окраски в алмазе. Следует отметить, что технология плазмохимического синтеза, которая была использована в диссертационной работе, достигла значительных успехов в росте алмаза без примесей и позволяет на сегодняшний день выращивать высококачественные слои алмаза. Однако, возможности этого метода позволяют легко вводить необходимое количество примесей в состав газовой смеси и модифицировать тем самым свойства получаемого материала. Эти свойства (такие, как проводимость, теплопроводность, оптическая прозрачность) зависят как от величины добавки примесей, так и от условий роста. При этом механизмы влияния примесей не изучены в полной мере, а их теоретическое изучение сталкивается с проблемой учета большого количества химических реакций как в плазме разряда, так и на поверхности алмаза. Исследование получения алмаза в газовом разряде с помощью добавок примесей представляет большой интерес для создания новых материалов, обладающих уникальными физическими свойствами. В связи с этим, тематика диссертационной работы является, безусловно, важной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списков цитированной литературы и публикаций автора по теме диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, кратко изложено содержание работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён обзор наиболее значимых работ, посвященных влиянию различных примесей (азот, бор, кислород) на процессы плазмохимического синтеза алмаза. Обсуждается влияние удельного энерговклада на скорость роста алмаза. Также обсуждаются существующие теоретические представления механизмов влияния примеси азота на рост алмаза, приводящие к увеличению скорости роста. Приведены основные результаты исследования легирования алмаза бором, отмечаются некоторые проблемы, возникающие при получении сильнолегированных слоёв. Обосновывается актуальность исследования легированного алмаза как нового полупроводникового материала, перспективного для создания мощных электронных приборов.

Во второй главе приведено описание экспериментальных установок, использованных в работе (СВЧ реакторов, возбуждаемых магнетроном на частоте 2.45 ГГц), а также методов диагностики плазмы и выращенных алмазных плёнок.

Третья глава посвящена исследованию плазмы СВЧ разряда при условиях высокого удельного энергозатрата. Предложен метод определения величины удельного энергозатрата, лишённый недостатков произвольности определения плазменного объёма, обнаружен эффект пространственной неоднородности удельного энергозатрата. Показано, что этот эффект сильнее проявляется при высоких давлениях газа. Приведены результаты исследования пространственного распределения интенсивности излучения основных компонент разряда с помощью метода оптической эмиссионной спектроскопии, при этом в диагностических целях использовались малые добавки аргона. Представлены пространственные распределения интенсивности линии $H\alpha$ серии Бальмера, линии радикала C_2 , а также линий излучения аргона (750.4 и 811.5 нм). Обнаружен эффект контракции разряда, возникающий при превышении порогового давления (375 Торр).

Четвёртая глава посвящена исследованию процессов легирования бором в многокомпонентной Н/В/С/О газовой смеси. Представлены результаты исследования процессов синтеза монокристаллических алмазных слоёв легированных бором с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, а также исследования выращенных легированных слоёв с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии. Изучено влияние кислорода на эффективность встраивания бора. Определены условия синтеза сильнолегированных слоёв высокого кристаллического совершенства с гладкой поверхностью роста. Экспериментально продемонстрировано, что в кислородсодержащих смесях возможен синтез толстых сильнолегированных (с концентрацией бора выше 10^{20} см^{-3}) слоёв при высокой скорости роста 4 мкм/ч и без образования сажи в реакторе, которое наблюдалось при легировании бором в газовых смесях без использования кислорода. Таким образом, было установлено, что использование кислородсодержащих газовых смесей в сочетании с условиями высокого удельного энергозатрата (130 Вт/см^3) позволяет решить проблему долговременного осаждения сильнолегированных слоёв.

Пятая глава содержит результаты исследования влияния малых добавок азота на скорость роста алмазных плёнок, а также на образование NV центров в процессе роста. Исследование влияния азота на скорость роста алмазных плёнок проведено при различном удельном энергозатрате. Показано, что при более высоком удельном энергозатрате максимальное увеличение скорости роста оказывается более значительным (6.5 раз при удельном энергозатрате 40 Вт/см^3 и 14 раз при удельном энергозатрате 110 Вт/см^3). Также продемонстрировано, что использование малых добавок азота (50 ppm) позволяет повысить скорость роста толстых алмазных пленок в 2.5 раза без существенного ухудшения основных характеристик алмаза (теплопроводность и диэлектрические потери), что дает возможность использования таких алмазных пластин (дисков) в качестве выходных окон гиротронов. Заключительная часть главы посвящена исследованию образования NV центров в процессе CVD синтеза. Получены зависимости концентрации азота в алмазе от условий роста (поток

азота, содержание метана в газовой смеси, температура подложки). В частности, установлено, что более низкие температуры подложки способствуют увеличению встраивания азота. Обсуждаются вопросы формирования NV центров в процессе роста, определена эффективность конверсии азота в NV центры. Достигнут синтез чрезвычайно тонких легированных азотом слоёв (так называемых дельта-слоёв толщиной 3 нм) и изучено образование NV центров в них с помощью конфокальной микроскопии. Экспериментально продемонстрировано, что облучение образца с дельта-слоем с последующим отжигом позволяет повысить концентрацию NV центров приблизительно на три порядка и получить ансамбли NV центров с рекордной поверхностной плотностью ~ 2500 мкм⁻². Подобные ансамбли представляют значительный практический интерес для создания высокочувствительных сенсоров магнитных полей на их основе.

Полученные в диссертации результаты являются новыми, их достоверность и обоснованность не вызывают сомнений. Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается применением апробированных методов физики плазмы и радиофизики, а также, в частных случаях, согласием результатов, полученных в диссертации, с данными исследований других авторов.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В разделе 3.1, посвященном методам определения удельного энерговклада в плазму, применялось численное моделирование СВЧ разряда с помощью двумерной самосогласованной модели. Автором, однако, не приводятся ни основные уравнения этой модели, ни какие-либо ссылки на соответствующие теоретические исследования. Приведены лишь результаты расчетов и их сравнение с экспериментом (рисунок 3.3). На мой взгляд, проведение подобных расчетов является нетривиальной задачей и наличие некоторого теоретического раздела в третьей главе могло бы органично дополнить диссертацию, посвященную экспериментальным исследованиям.
2. Значительная часть четвертой главы диссертации посвящена исследованию плазмы СВЧ разряда при добавлении бора в газовую смесь, при этом обстоятельно прослеживается поведение линии радикала ВН в оптических спектрах. Однако, помимо радикалов ВН, при легировании бором также представляет интерес излучение атомов бора (В). Экспериментальные данные об излучении атомов бора в плазме отсутствуют в работе.
3. В пятой главе диссертации обсуждается синтез эпитаксиальных слоёв с высокой концентрацией азота. Подобные слои могут представлять интерес для изучения плотных ансамблей взаимодействующих NV центров. Однако, из приведенных экспериментальных данных остаётся неясным, какова величина максимально достижимой концентрации азота в эпитаксиальных слоях.

Указанные замечания не могут влиять на общую положительную оценку диссертации С.А. Богданова, её научной и практической значимости. В работе получен ряд новых результатов, важных в практическом плане. Достоинством работы является возможность

повторения полученных экспериментальных результатов (по поводу влияния примесей) на любом плазмохимическом реакторе, благодаря тому, что автор не ограничивается только лишь перечислением условий синтеза, а приводит подробное исследование характеристик плазмы СВЧ разряда. Полученные экспериментальные результаты представляют собой существенный вклад в развитие микроволновой технологии плазмохимического синтеза алмаза. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в международных и российских научных журналах из списка ВАК, 8 работах в сборниках трудов российских и международных конференций.

Диссертационная работа С.А. Богданова выполнена на актуальную тему, удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям. У меня нет сомнений, что С.А. Богданов заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации

Официальный оппонент,
доцент кафедры распространения радиоволн
и радиоастрономии Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского,
кандидат физико-математических наук

 Е.Ю. Петров

Контактная информация:
Петров Евгений Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры распространения радиоволн
и радиоастрономии Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского",
603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.
Тел.: +7 910 874 70 37, E-mail: epetrov@rf.unn.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.03 -
радиофизика.

Подпись доцента кафедры распространения радиоволн
и радиоастрономии ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
к.ф.-м.н. Е.Ю. Петрова заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского





Л.Ю. Черноморская