

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.01 (Д 002.069.02),
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.10.2021 № 140

О присуждении Богданову Сергею Александровичу, гражданину РФ,

учёной степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Исследование плазмохимического синтеза алмазных плёнок в газах с контролируемой добавкой примесей» по специальности 01.04.08 – Физика плазмы принята к защите 24.06.2021 г., протокол № 130, диссертационным советом Д 002.069.02 созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ 561/нк от 09.11.2012 г.

Соискатель, Богданов Сергей Александрович, 1987 года рождения, в 2011 году окончил ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", в 2014 году окончил аспирантуру ИПФ РАН, работает младшим научным сотрудником в ИПФ РАН.

Диссертация выполнена в отделе физики плазменных технологий ИПФ РАН.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук Вихарев Анатолий Леонтьевич, заведующий отделом ИПФ РАН.

Официальные оппоненты, Манкелевич Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ОМЭ НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина, МГУ им. М.В. Ломоносова, и Петров Евгений Юрьевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии Нижегородского

государственного университета им. Н.И. Лобачевского, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топичева Российской академии наук (ИНХС РАН, г. Москва), в своём положительном заключении, подписанном и.о. заведующего лабораторией плазмохимии и физикохимии импульсных процессов, доктором физ.-мат.наук, Лебедевым Юрием Анатольевичем, и утверждённом директором ИНХС РАН, чл.-корр. РАН Максимовым Антоном Львовичем, указала, что диссертация С.А.Богданова удовлетворяет критериям п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Соискатель имеет по теме диссертации 20 опубликованных работ, в том числе: 12 статей в рецензируемых научных журналах. Наиболее значимыми работами являются:

1. 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.
2. 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 // Diam. Relat. Mater. 2017. Vol. 74. P. 59–64.
3. 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 // Diam. Relat. Mater. 2019. Vol. 97. P. 107407.
4. 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.
5. 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

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов. Все отзывы положительные, в них отмечаются актуальность диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Положительный отзыв ведущей организации содержит следующие замечания: следует сообщить подробнее о численной модели разряда, использованной в работе, в частности, о том, какие процессы учитывались при моделировании водородной линии; следует пояснить, какой смысл имеет средний удельный энерговклад; при анализе различий пространственных распределений интенсивностей линий аргона (750.4 нм и 811.5 нм) не учитываются различные механизмы заселения состояний; не объясняется, почему выбран раствор триметилбората в этаноле для легирования бором.

Положительный отзыв официального оппонента д.ф.-м.н. Ю.А. Манкелевича содержит замечания: об отсутствии учёта влияния поглощения СВЧ мощности за пределами излучающего плазменного объёма на величину определяемого среднего удельного энерговклада; о необходимости уточнения значений коэффициентов диссоциативной электрон-ионной рекомбинации углеродсодержащих ионов и H_3^+ ; о недостатках высказанной гипотезы проявления влияния кислорода на процессы легирования бором. Положительный отзыв официального оппонента к.ф.-м.н. Е.Ю. Петрова содержит замечания о необходимости более детального описания численной модели разряда; об отсутствии данных об излучении атомов бора в плазме СВЧ разряда при легировании; а также об отсутствии сведений о максимально достижимой концентрации азота в CVD слоях.

Положительный отзыв на автореферат к.ф.-м.н. С.А. Тарелкина (ФГБНУ ТИСНУМ, г. Москва, г. Троицк) содержит замечание о необходимости объяснения целесообразности исследования плазмы с аргоном, а также замечания о необходимости упоминания электрических характеристик выращенных образцов и кристаллической ориентации алмазных подложек. Положительный отзыв на автореферат д.х.н. Б.В. Спицына (ФГБУН ИХФЭ РАН, г. Москва)

содержит замечание об отсутствии сведений о структурном состоянии примесного азота, не вошедшего в состав NV центров. Положительный отзыв на автореферат д.ф.-м.н. А.В. Соломонова (ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург) содержит замечание о невозможности отнести условия роста НРНТ алмаза к равновесным. Положительные отзывы д.ф.-м.н. В.Ю. Юрова (ФГБУН ФИЦ ИОФ РАН, г. Москва) и к.ф.-м.н. Е.И. Липатова (ФГБУН ИСЭ СО РАН, г. Томск) замечаний не содержат.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- впервые экспериментально обнаружена контракция разряда в СВЧ реакторе в водород-метановой газовой смеси. Установлено, что при высоком удельном энергокладе в плазму (550 Вт/см^3) переход разряда в контрагированную форму с ярким тонким цилиндрическим филаментом наступает при повышенных давлениях и имеет порог по давлению;
- установлено, что совместное использование кислородсодержащих газовых смесей и высоких удельных энергокладов в плазму ($\sim 130 \text{ Вт/см}^3$) в СВЧ реакторе позволяет синтезировать толстые сильнолегированные бором алмазные слои (толщиной более 100 мкм и концентрацией бора более 10^{20} см^{-3}) с высокой скоростью роста 4 мкм/ч в течение одного длительного процесса осаждения;
- установлено, что 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 Вт/см^3 и 100 Вт/см^3 , соответственно. Продемонстрировано увеличение скорости роста толстых поликристаллических алмазных пленок в 2.5 раза при удельном энергокладе в плазму 30 Вт/см^3 при величине добавки азота в газовую смесь, равной 50 ppm по отношению к концентрации водорода;
- разработан метод повышения концентрации NV центров в дельта-слое, формируемом в CVD алмазе, 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 $2 \cdot 10^{22} \text{ e/cm}^2$, что соответствует увеличению концентрации NV центров приблизительно на три порядка. Впервые получены ансамбли NV центров в дельта-слое с высокой поверхностной плотностью ($\sim 2500 \text{ мкм}^{-2}$) и временем спиновой когерентности $T_2 \sim 33 \text{ мкс}$.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что полученные результаты исследования плазмы СВЧ разряда представляют собой обширный материал для изучения плазмохимических процессов в многокомпонентных смесях и совершенствования теоретических моделей разряда.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в работе результаты исследования процессов легирования бором, а также демонстрация синтеза толстых сильнолегированных бором слоёв, позволят усовершенствовать активно разрабатываемые в настоящее время электронные приборы на основе алмаза. Эффект локализации удельного энерговклада, продемонстрированный в работе, имеет практическое значение для совершенствования технологии CVD синтеза толстых монокристаллических алмазных слоёв. Достигнутое увеличение скорости роста толстых поликристаллических алмазных пленок в 2.5 раза с помощью малых добавок азота без существенного ухудшения их характеристик имеет практическое значение для создания алмазных выходных окон мощных источников излучения. Разработанный в работе метод повышения концентрации NV центров в CVD алмазе имеет практическое значение для повышения чувствительности сенсоров магнитных и электрических полей на основе NV центров.

Достоверность результатов исследования обеспечена тем, что они были получены на современном оборудовании с использованием апробированных методик исследования плазмы СВЧ разряда и методов исследования свойств выращенного алмазного материала.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он принимал ключевое участие в постановке и проведении всех описанных в работе экспериментов. Им лично были разработаны диагностические методы исследования плазмы СВЧ разряда,

описанные в работе, выполнены обработка и интерпретация основных результатов.

На все вопросы и замечания, высказанные в ходе защиты и содержащиеся в отзывах, С.А.Богдановым были даны ответы и комментарии.

На заседании от 18.10.2021 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, присудить Богданову С.А. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 25 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.08, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящего в состав совета, проголосовали: за – 24, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного совета,

академик РАН



Литвак Александр Григорьевич

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук



Абубакиров Эдуард Булатович

18 октября 2021 г.

