

## Заключение

диссертационного совета 24.2.331.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16 февраля 2022 г. № 3

О присуждении Романову Даниилу Алексеевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 27.10.2021 г. (протокол заседания № 13) диссертационным советом 24.2.331.06, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г., полномочия которого установлены приказом Минобрнауки России № 561/нк от 03 июня 2021 г. на срок действия номенклатуры научных специальностей.

Соискатель Романов Даниил Алексеевич, 12 августа 1993 года рождения, в 2017 году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». В 2021 году соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по очной форме обучения по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, направленности (профилю) 01.04.07 – Физика конденсированного со-

стояния, в настоящее время работает ведущим инженером в обществе с ограниченной ответственностью «МеГа Эпитех».

Диссертация выполнена на кафедре проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук Косушкин Виктор Григорьевич, профессор, Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры проектирования и технологии производства электронных приборов.

Официальные оппоненты:

Хоконов Азамат Хазрет-Алиевич, доктор физико-математических наук, профессор, филиал Баксанская нейтринная обсерватория федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, ведущий научный сотрудник,

Исаев Евгений Игоревич, кандидат физико-математических наук, Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент Отделения лазерных и плазменных технологий дали положительные отзывы на диссертацию.

Однако имеется ряд замечаний, наиболее значимыми из которых являются следующие:

Хоконов А.Х.-А.: «В рамках динамической теории на основе анализа профиля дифракционных рефлексов удастся провести послойный анализ границы раздела, что отсутствует в представленной работе. Как ясно из текста диссертации, модификация двухкристального рентгеновского дифрактометра состоит в применении монокристалла германия (без указания его дисперсии), а также более медленного шагового двигателя. Не указано, как такая модификация соотносится с возможностями современных рентгеновских дифрактометров, оснащенных, в том числе, двойным германиевым монохроматором (например, с дифрактометрами Ultima IV RIGAKU Япония, SmartLab и др.).

В главе 4 в вводной части утверждается, что прецизионно измерен период решетки. Этого в работе нет. В главе 5 приведенное соискателем соотношение 5.3 (называемое аналогом формулы Мэтьюза) дается без вывода и представляется ошибочным. Вывод не содержится и в работе [45], на которую ссылается соискатель. Имеются также замечания по терминологии, использованной в работе».

Исаев Е.И.: «Могут ли исследования в спектрах комбинационного рассеяния, приведенные в работе, подтвердить, что структура алмаза, состоящая из подложки Ib алмаза природного изотопного состава и эпитаксиальной пленки  $^{13}\text{C}$ , не содержит включений графитной фазы? Можно ли использовать метод аналогий, на который опирается работа для сравнения процессов дефектообразования в структурах кремния и алмаза? Проводилось ли такое сравнение?».

Ведущая организация – Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова» (АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»), г. Обнинск, в своем положительном отзыве, подписанным Дуфлотом Владимиром Робертовичем, доктором химических наук, директором по инновационной деятельности и утвержденным Кононовым Олегом Евгеньевичем, кандидатом физико-математических наук, генеральным директором, указала, что диссертация Романова Д. А., посвященная изучению неразрушающими методами рентгеновской топографии и двухкристальной дифрактометрии особенностей формирования реальной структуры гомоэпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом, является законченной, самостоятельной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Отмечено, что Романовым Д.А. впервые проведено прецизионное определение периода кристаллической решетки эпитаксиальных CVD-пленок алмаза  $^{13}\text{C}$  (99,96%), выращенных на подложках алмаза типа Ib. Установлено, что уменьшение периода кристаллической решетки составляет  $(\Delta a/a)_{\text{relax}} \sim (1,1-1,2) \times 10^{-4}$  относительно алмаза с природным изотопным составом. Рассчитаны зависимости критических толщин псевдоморфных пленок алмаза от величины несоответствия периодов кристаллических решеток подложки и пленки при использовании подложек различных ориентаций. Показано, что критические толщины возрастают в последовательности ориентаций (110), (100), (111). Соискателем использован оригинальный подход, основанный на сравнительных исследованиях эпитаксиальных структур гер-

мания и алмаза, установлено, что причиной изгиба нелегированных CVD-пластин алмаза, отделенных от подложки лазерной резкой, является неоднородная по толщине пластическая деформация пленок. Ведущая организация считает, что теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что известные физические методы исследования, развитые в ней, и полученные результаты дают возможность повышения структурного совершенства пленок и могут быть использованы для совершенствования технологии выращивания эпитаксиальных CVD-пленок алмаза. Диссертационная работа выполнена с использованием современных прецизионных физических методов исследования, что наряду с подробным теоретическим обоснованием наблюдаемых закономерностей свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science опубликовано 3 работы. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации 2,46 п.л., из которых 1,35 п.л. принадлежат лично соискателю. Требования п.п. 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции постановления Правительства РФ от 20.03.2021 г. № 426), предъявляемые к публикации основных научных результатов диссертации, выполняются. Требования, установленные п. 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, соблюдаются. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. X-ray Diffraction Characterization of Epitaxial CVD Diamond Films with Natural and Isotopically Modified Composition / D.A. Romanov [et al.] // Crystallography Reports. 2016. Vol. 61, No 6. P. 979-986 (0,5 п.л./0,27 п.л.).

2. Specific Features of Distribution and Relaxation of Elastic Stresses in Homoepitaxial CVD Films of Germanium and Diamond / D.A. Romanov [et al.] // Crystallography Reports. 2019. Vol. 64, No. 3. P. 392-397 (0,38 п.л./0,2 п.л.).

3. Double-Crystal X-Ray Diffractometry and Topography Methods in the Analysis of the Real Structure of Crystals / D.A. Romanov [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14, No 6. P. 1113-1120 (0,5 п.л./0,27 п.л.).

4. Romanov D.A., Kosushkin V.G., Strelov V.I. Application of Double-Crystal X-Ray Diffractometry Methods and Topography for Characterization of Isotopically Modified CVD Diamond Films // American Scientific Journal. 2020. Vol. 1, No 43. P. 65 (0,06 п.л./0,03 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: **Силаева И.В.**, кандидата технических наук, заведующего кафедрой физики и астрономии физико-технического факультета ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет имени Коста Левановича Хетагурова»; **Якушко Е.В.**, кандидата технических наук, доцента кафедры технологии материалов электроники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; **Алмаева А.В.**, кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией металлооксидных полупроводников Центра исследований и разработок «Перспективные технологии в микроэлектронике» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», **Адарчина С.А.**, кандидата технических наук, директора по развитию и инновации ООО «ФОКОН»; **Тарала В.А.**, кандидата химических наук, заведующего научно-лабораторным комплексом чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»; **Безбаха И.Ж.**, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Лаборатории космического материаловедения ИК РАН – филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН.

Все отзывы положительные. В качестве замечаний отмечено, что проводились исследования эпитаксиальных структур алмаза, полученных при температуре 950°C, но не исследованы структуры, полученные при других режимах эпитаксиального роста (Силаев И.В.). Вводная часть автореферата содержит информацию, не относящуюся к диссертационным исследованиям. Например, перспективность алмаза, легированного бором, и преимущества метода PACVD. Отсутствует информация о том, как был определен изотопный состав эпитаксиальных пленок алмаза. Соискатель регулярно указывает серии образцов, но в автореферате отсутствует информация о разнице в режимах получения, обработке или характеристиках серий образцов. Стиль написания текста автореферата не отличается высоким уровнем (Алмаев А.В.). Недостаточно полно описано влияние и негативные последствия повышения плотности дислокаций на свойства электронных приборов вследствие превышения пленкой критической толщины и образования дислокаций несоответ-

ствия. Имеются стилистические погрешности в изложении материала (Якушко Е.В.). Отсутствует описание синтеза НРНТ пластин, используемых для осаждения CVD слоев алмаза с модифицированным изотопным составом, что ограничивает возможности оценок практического использования материала. Имеются стилистические погрешности в изложении, приведены ограниченные данные о современном автоматизированном оборудовании для рентгено-топографических исследований (Адарчин С.А.). В автореферате на рисунке с изображением конфигураций дислокаций несоответствия (Рис. 6) не отмечен масштаб структуры, не ясно, какой она толщины. Также требует разъяснения термин второй критической толщины плёнки и соответствие ему обозначений  $t_c^*$  и  $t_c^{**}$  (Безбах И.Ж.).

В то же время все специалисты, представившие свои отзывы, считают, что указанные замечания не снижают общего высокого уровня диссертационной работы Романова Д.А. В отзывах сделан вывод о том, что диссертация Романова Даниила Алексеевича отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обоснован тем, что они являются компетентными специалистами в области физики конденсированного состояния. Хоконов Азамат Хазрет-Алиевич является специалистом в области прохождения частиц высоких энергий через кристаллы и интенсивные внешние поля. Исаев Евгений Игоревич – специалист в области рентгенодифракционных исследований тонких пленок.

Выбор ведущей организации обусловлен тем, что Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова» (АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова») известно своими экспериментальными и теоретическими исследованиями свойств конденсированных сред, облучаемых частицами высокой энергии и методами получения изотопов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** применительно к формированию эпитаксиальных структур CVD-пленок алмаза экспериментальная методика определения несоответствия периодов кристаллических решеток подложки и пленки монокристаллов синтетического алмаза с модифицированным изотопным составом;

**предложены** способы устранения изгиба нелегированных CVD-пластин алмаза, отделенных от подложки лазерной резкой;  
**доказана** возможность применения метода аналогий, основанного на сравнительных исследованиях эпитаксиальных структур германия и алмаза;  
**введены** новые подходы к процессу анализа дислокационной структуры эпитаксиальных пленок при превышении пленкой критической толщины.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:  
**доказана** связь критических толщин псевдоморфных пленок алмаза в зависимости от ориентации пленки;  
**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** современные прецизионные физические методы исследования (рентгеновская топография и дифрактометрия высокого разрешения);  
**изложена** методика использования двухкристального рентгеновского дифрактометра с монохроматором из германия для прецизионного определения периода кристаллической решетки CVD-пленок алмаза  $^{13}\text{C}$ ;  
**раскрыт** способ получения высококачественных монокристаллов алмаза высокой чистоты и структурного совершенства;  
**изучена** взаимосвязь протекания релаксационных процессов в эпитаксиальных структурах германия и алмаза в зависимости от толщины структур;  
**проведено** усовершенствование методики изучения структурного совершенства кристаллов с использованием методов двухкристальной рентгеновской дифрактометрии и топографии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:  
**разработана** применительно к формированию CVD пленок алмаза экспериментальная методика определения несоответствия периодов кристаллических решеток подложки и пленки, возможность применения модели Мэтьюза для оценки критических толщин пленок, при которых процесс релаксации и образования дислокаций несоответствия становится энергетически выгодным. Имеется акт об использовании результатов диссертационной работы в рамках НИОКР по государственному заданию «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».  
**определены** возможности применения методов двухкристальной рентгеновской дифрактометрии и топографии для исследований эпитаксиальных структур германия и алмаза;

**предложены** подходы к моделированию деградационных процессов, происходящих в структурах при их эксплуатации;

**представлены** результаты анализа возможности применения монокристаллов синтетического алмаза в качестве перспективного материала для высокотехнологичных применений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**экспериментальные результаты** получены на сертифицированном современном оборудовании и характеризуются высокой воспроизводимостью;

**теории** построены на основе корректного использования методов физики конденсированного состояния, методов экспериментальной физики, математического моделирования;

**идеи** базируются на обобщении современных литературных данных и на анализе результатов, полученных экспериментальными методами;

**использовано** сравнение полученных результатов с ранее опубликованными теоретическими, вычислительными и экспериментальными результатами (в том числе, при сопоставлении результатов с работами Н.А. Holloway, Т.А. Anthony, W.F. Banholzer и других авторов);

**установлено** количественное и качественное совпадение полученных в работе результатов с независимыми экспериментальными данными;

**использованы** современные методы обработки полученных результатов, соответствующие целям и задачам исследований.

**Личный вклад соискателя состоит в:** разработке и усовершенствовании экспериментальных установок, подготовке и проведении экспериментальных работ, выборе теоретических моделей и проведении численных расчетов, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов. Все представленные результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: ограниченный набор экспериментальных образцов не позволил оптимизировать технологический процесс формирования эпитаксиальных структур алмазов.

Соискатель Романов Д. А. ответил на вопросы, задаваемые ему в ходе заседания членами диссертационного совета: д.ф.-м.н. Горбуновым А.К., д.ф.-м.н. Степановым В.А., д.т.н. Андреевым В.В., д.т.н. Прасицким В.В., д.ф.-м.н. Шагаевым В.В.; согласился с замечаниями к.т.н. Адарчина С.А., к.т.н. Якушко Е.В., к.ф.-м.н. Алмаева А.В., к.т.н. Силаева И.В., к.ф.-м.н. Без-



баха И.Ж., а также привел собственную аргументацию на замечания ведущей организации и официальных оппонентов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертационная работа Романова Д. А. «Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом» является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой. Она соответствует критериям, установленным п.п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции постановления Правительства РФ от 20.03.2021 г. № 426) и паспорту специальности Физика конденсированного состояния.

На заседании 16 февраля 2022 года диссертационный совет принял решение – за решение важной для физики конденсированного состояния научной задачи, связанной с изучением неразрушающими методами рентгеновской топографии и двухкристальной дифрактометрии особенностей формирования реальной структуры и физических процессов получения гомоэпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопическим составом для развития эффективных методов повышения их структурного совершенства – присудить Романову Д. А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета

Столяров Александр Алексеевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Лоскутов Сергей Александрович

Дата оформления заключения 16 февраля 2022 года.