



НИФХИ  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «РХК»

**Акционерное общество  
«Ордена Трудового Красного  
Знамени научно-исследовательский  
физико-химический институт  
имени Л.Я. Карпова»  
(АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»)**

Киевское шоссе, д. 6, г. Обнинск,  
Калужская область, 249033,  
Телефон (484) 396-39-32, факс (484) 396-39-11  
E-mail: fci@karpovipc.ru  
ОКПО 00208982, ОГРН 5137746240979  
ИНН 7709944065, КПП 402501001

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**  
Генеральный директор  
АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»  
**О.Е. Кононов**  
2021 г.

## **ОТЗЫВ**

**Ведущей организации  
АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»  
на диссертационную работу Романова Даниила Алексеевича  
«Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных  
CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным  
составом»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности  
1.3.8. Физика конденсированного состояния**

### **Актуальность темы исследования**

Диссертация Романова Даниила Алексеевича посвящена изучению неразрушающими методами рентгеновской топографии и двухкристальной дифрактометрии особенностей формирования реальной структуры гомоэпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом.

Исследование влияния изотопного состава алмаза на его свойства представляет значительный интерес, так как изотопическое модифицирование

позволит реализовывать новые свойства, которые превосходят свойства естественных кристаллов.

Для изучения физических процессов, происходящих в эпитаксиальных пленках, в настоящее время широко используются рентгеноструктурные методы исследования, позволяющие получить детальную информацию о таких важнейших параметрах структур, как величина несоответствия, уровень упругой и скачки пластической деформаций на границах раздела фаз даже в многослойных гетероструктурах.

Однако, исследование структурных особенностей эпитаксиальных структур алмаза затруднено в связи с высокой твердостью и химической инертностью. Тем не менее, принимая во внимание, что алмаз является кристаллографическим аналогом германия, можно предположить, что процессы релаксации и дефектообразования в этих материалах проходят схожим образом.

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является изучение 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.

### **Структура, содержание и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, заключения и списка использованных источников из 62 наименований. Объем диссертации составляет 100 страниц, включая 54 рисунка и 8 таблиц. В автореферате перечислены основные публикации автора по теме диссертации.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель исследования, определены задачи и методы исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указаны основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации полученных результатов.

В **первой главе** представлен литературный обзор по свойствам, методам получения и характеристике эпитаксиальных пленок алмаза. Рассмотрены структура, физические свойства, дефекты и применение алмаза. Также рассмотрено получение эпитаксиальных пленок алмаза методом осаждения из газовой фазы. Рассмотрены рентгенодифракционные методы исследований, такие как дифрактометрия высокого разрешения и рентгеновская топография.

Выдвинуто предположение, что поскольку германий является кристаллографическим аналогом алмаза, то многие процессы

дефектообразования в этих структурах проходят схожим образом. Отсюда следует, что на основе исследования процессов дефектообразования в эпитаксиальных структурах германия можно спрогнозировать, какие структурные особенности и дефекты можно ожидать в эпитаксиальных пленках алмаза.

Во **второй главе** приведены методы получения, общая характеристика образцов и методы исследования. В работе описана технология синтеза образцов эпитаксиальных двухслойных структур алмаза CVD/HPHT с природным и модифицированным изотопическим составом.

**Третья глава** посвящена исследованиям образцов эпитаксиальных пленок алмаза с природным изотопическим составом и образцам, отделенным от подложки. Показано, что кривые качания для образца АО25 с толщиной пленки  $t \sim 3$  мкм, полученные в режиме с полным омытием образца пучком уширены. Уменьшение исследуемой области на образце до размера  $\sim 1 \times 1$  мм<sup>2</sup> позволило значительно улучшить параметры кривых качания до значений полуширины кривых качания  $\Delta\omega_{A1/2} \sim 5,7''$  и  $\Delta\omega_{B1/2} \sim 4,9''$ .

В **четвертой главе** рассмотрены эпитаксиальные структуры алмаза с модифицированным изотопическим составом. Методами рентгеновской дифрактометрии определено несоответствие периодов кристаллических решеток подложки и пленки образца ТШ-3 (CVD<sup>13</sup>C/HPHT Ib).

**Пятая глава** посвящена особенностям пластической деформации эпитаксиальных структур германия и алмаза.

В **Общих выводах** и заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов**

В диссертационной работе впервые проведено прецизионное определение периода кристаллической решетки эпитаксиальных CVD-пленок алмаза <sup>13</sup>C (99,96%), выращенных на подложках алмаза типа Ib. Установлено, что изменение (уменьшение) периода кристаллической решетки составляет  $(\Delta a/a)_{\text{relax}} \sim (1,1-1,2) \times 10^{-4}$  относительно алмаза с природным изотопическим 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). Использован оригинальный подход, основанный на сравнительных исследованиях эпитаксиальных структур германия и алмаза, установлено, что причиной изгиба нелегированных CVD-пластин алмаза, отделенных от подложки лазерной резкой, является неоднородная по толщине пластическая деформация пленок. Сформулированы возможные способы устранения изгиба. Объяснены наблюдаемые физические особенности в распределении дислокаций в толстых пленках. Установлено различие в протекании релаксационных процессов в эпитаксиальных структурах германия и алмаза.

В процессе релаксации упругих напряжений в эпитаксиальных структурах германия на межфазной границе формируется сетка дислокаций несоответствия. Следов пластической деформации с образованием дислокаций несоответствия в исследованных эпитаксиальных структурах алмаза с модифицированным изотопическим составом и толщиной пленки, превышающей критическое значение, не наблюдается. Причина этого, по-видимому, связана с тем, что температура эпитаксиального роста  $950^{\circ}\text{C}$  мала, поэтому дислокации малоподвижны и эффективная пластическая деформация, которая наблюдается в эпитаксиальной структуре германия, в пленке алмаза не происходит.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы**

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что известные физические методы исследования, развитые в работе и полученные результаты, дают возможность повышения структурного совершенства пленок и могут быть использованы для совершенствования технологии выращивания эпитаксиальных CVD-пленок алмаза.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности**

Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, в части формулы специальности: «Основой специальности является теоретическое и экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в твердом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях»;

в части областей исследования:

«Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы»;

«Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами».

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает содержание, научные положения, выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертации, содержит информацию об основных результатах и позволяет сделать заключение о научном уровне работы.

## **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, личный вклад автора**

Работа выполнена с использованием современных прецизионных физических методов исследования (рентгеновская топография и дифрактометрия высокого разрешения), что наряду с подробным теоретическим обоснованием наблюдаемых закономерностей, свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов.

Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Автор проводил эксперименты и анализировал полученные результаты, в частности, о подборе оптимальных условий исследования монокристаллов алмаза методами двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии и топографии с использованием монохроматора из германия. Модернизировал исследовательское оборудование, обеспечившее необходимую скорость углового вращения образца. Анализировал, систематизировал и интерпретировал полученные экспериментальные данные. При подготовке публикаций вместе с соавторами принимал участие в постановках экспериментов, обсуждении результатов, оформлении и редактировании текстов. Часть результатов была получена во время выполнения проекта, поддержанного Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК».

## **Апробация работы**

Основные результаты, полученные автором в полной мере отражены в 11 научных работах, из которых 3 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также были доложены и обсуждены на научно-технических конференциях.

## **Замечания по содержанию диссертации**

1) Во введении автор указывает, что для высокочастотных и силовых приборов наиболее интересны алмазы, легированные бором, как очень перспективные материалы, однако в самой работе эта тема не раскрывается.

2) Эпитаксиальные пленки алмаза отделялись от подложек методом лазерной резки. Автор не раскрывает, как удалялись структурные нарушения поверхности после этой операции.

3) В работе рассмотрено поведение дислокаций в монокристаллических алмазных структурах. Проводились ли аналогичные исследования на поликристаллических структурах?

4) Не представлены характеристики исходных подложек для выращивания CVD-пленок алмаза.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и имеют характер пожеланий.

### **Заключение по работе**

Диссертация «Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом» Романова Даниила Алексеевича является законченной, самостоятельной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Автореферат и опубликованные работы верно отражают содержание диссертации, результаты и выводы.

На основании изложенного, считаем, что диссертация Романова Даниила Алексеевича «Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом» по актуальности, степени научной новизны и практической значимости, объему исследований и их ценности соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию Романова Д.А. «Особенности формирования реальной структуры эпитаксиальных CVD-пленок алмаза с природным и модифицированным изотопным составом» обсужден и утвержден на заседании научно-технического совета АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» заседание от 26.11.2021, протокол № 1.

### **Отзыв составил**

Директор по инновационной деятельности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»,  
д.х.н. В.Р. Дуфлот

«26» ноября 2021 г.

### **Сведения о ведущей организации**

АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»)

Почтовый адрес: 249033, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д.6.

Телефон: +7 (484) 397-47-49,

Адрес электронной почты организации: [fci@karpovipc.ru](mailto:fci@karpovipc.ru),

Адрес официального сайта организации: <http://www.karpovipc.ru>)