

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ГНПО «Научно-практический центр

Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению»

В. М. Федосюк

«25» февраля 2025 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации – Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», на диссертационную работу ФАМ Ван Тунг «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники)

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Представленная к защите диссертационная работа ФАМ Ван Тунг содержит результаты выполненных им исследований закономерностей формирования пленок толщиной 35 – 1200 нм наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода ($g-C_3N_4$) скоростным химическим осаждением из паров меламин и их электропроводящих и зарядовых свойств. Выбранные объект и предмет исследования актуальны для развития физики и технологии формирования наноструктур.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) и отрасли «физико-математические науки». Область исследований соответствует пунктам 1. Методы формирования наноразмерных структур (наноструктур) и наноструктурированных материалов (наноматериалов) и 2. Свойства наноразмерных структур и наноструктурированных материалов раздела Представленные в диссертации результаты входят в области исследований, предусмотренные паспортом данной специальности, раздел III.2 паспорта данной специальности.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК на 106 страницах формата А4 и содержит введение, общую характеристику

работы, обзорную главу и четыре главы с материалами выполненного исследования, заключение, библиографический список использованных источников, из 124 наименований, включающих 10 публикаций соискателя, и приложение, в котором помещен Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс в БГУИР. Изложение результатов дано грамотным научным русским языком и исчерпывающе проиллюстрировано. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание самой диссертации.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости

Научный вклад соискателя заключается в экспериментальном установлении и физической интерпретации закономерностей.

К наиболее значимым результатам работы, отличающимся существенной научной новизной, следует отнести следующие:

2.1. Разработанный процесс скоростного химического осаждения пленок графитоподобного нитрида углерода из паровой (газовой) фазы при атмосферном давлении с использованием паров меламин позволяет формировать пленки из этого материала на поверхностях полупроводниковых (кремний), проводящих (сильнолегированный кремний, алюминий) и изолирующих (оксиды кремния и алюминия, стекло) подложек;

2.2. Обобщенная резисторная модель и основанная на ней эквивалентная электрическая схема исследуемых пленочных структур, в которой учтены два наиболее значимых токопроводящих канала – в плоскости пленки $g\text{C}_3\text{N}_4$ и параллельный ему шунтирующий канал из токопроводящего материала (Si или Al) под этой пленкой, что позволило по экспериментальным вольт-амперным характеристикам впервые рассчитать: поперечное удельное сопротивление пленочного $g\text{C}_3\text{N}_4$;

2.3. Разработана детализированная резисторная модель, описывающая протекание тока в пленках, состоящих из двумерных слоев, образованных нанокристаллическими зернами полупроводника, расчеты по которой показали, что наибольшую плотность тока следует ожидать на периферии контактов к ним, а величины локальных токов и их распределение по объему таких пленок существенно зависят от их зернистости, количества слоев и электронных свойств межзеренных и межслойных потенциальных барьеров.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Соискателю может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) за полученные новые научно обоснованные результаты, среди которых наиболее значимыми являются следующие:

3.1. Пленки графитоподобного нитрида углерода, осажденные разработанным скоростным методом, содержат до 2,9 ат.% кислорода и состоят из слоев толщиной порядка 30 нм, образованных кристаллическими зернами осажденного материала примерно таких же продольных размеров и имеющих гексагональную кристаллическую решетку, (002) плоскость которой ориентирована параллельно поверхности подложки;

3.2. Фотолюминесцентные и оптические исследования осажденных пленок показали, что их материал ведет себя как полупроводник с оптической шириной запрещенной зоны 2,95 – 2,98 эВ, что, судя по данным других исследователей, на 0,2 эВ больше, чем в объемном нелегированном графитоподобном нитриде углерода, причиной чего, вероятнее всего, является присутствие кислорода в материале пленок;

3.3. Обнаружено, что в пленочных структурах Al/g C₃N₄/Al и Al/g C₃N₄/Si проявляется мемристорное переключение электрического сопротивления в диапазоне температур от комнатной до 110 °С, выражающееся в типичных для этого эффекта петлеобразных вольт-амперных характеристиках, зависящих от направления протекания тока – поперек или вдоль плоскости пленочной структуры, а также от толщины пленки g C₃N₄; от материала подложки (Si или Al); от наличия или отсутствия под пленочной структурой диэлектрической пленки (SiO₂ или Al₂O₃), электрически отделяющей ее от подложки;

3.4. Обнаружено влияние диэлектрических пленок из SiO₂ и Al₂O₃, находящихся под пленочными структурами на основе g C₃N₄, на их зарядовые свойства, состоящие в том, что SiO₂, в отличие от Al₂O₃, приводит к немонотонному характеру вольт-фарадных характеристик и более существенному снижению электрической емкости при повышении частоты измерительного сигнала в диапазоне 100 Гц – 10 кГц, составляющему порядка 80 % и 6 % соответственно, чему дано объяснение присутствием в SiO₂ встроенного положительного заряда.

Совокупность названных результатов является существенным вкладом в физику и технологию создания пленок из наноструктурированных полупроводников для новых перспективных элементов электронной обработки информации.

4. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Представленную к защите диссертацию отличает выбор актуального с научной точки зрения объекта исследования – наноструктурированный графитоподобный нитрид углерода и пленочные структуры на его основе. Обширный экспериментальный материал, полученный с использованием современных методов исследования полупроводниковых структур, его обстоятельный анализ и предложенные соискателем оригинальные модели обладают безусловной новизной.

Требования к кандидатским диссертациям, регламентированные пп.20, 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, выполнены полностью, поскольку диссертация содержит новые научные результаты по одному из актуальных направлений научных исследований. Научная квалификация соискателя соответствует ученой степени кандидата физико-математических наук.

5. Рекомендации по практическому применению результатов работы

Диссертация содержит результаты, носящие фундаментальный характер в области физики полупроводниковых наноструктур. Их практическое применение ориентировано и рекомендуется для использования в научных организациях НАН Беларуси, в университетах и в организациях, разрабатывающих и исследующих новые перспективные наноматериалы и структуры на их основе. Подтверждением этому служит приложенный к диссертации Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс в БГУИР.

6. Замечания по работе

6.1. Не оценено количественное соответствие результатов расчетов по детализированным мемристорным моделям исследуемых пленочных структур с полученными экспериментальными данными.

6.2. В перечень исследуемых зарядовых свойств следовало бы включить плотность зарядовых состояний в созданных пленочных структурах, тем более, что полученные экспериментальные вольт-фарадные характеристики позволяют ее оценить количественно.

6.3 Не оценены перспективы практической реализации полученных знаний.

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и не умаляют общей положительной оценки диссертационной работы.

7. Заключение

Диссертация «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники), подготовлена на актуальную тему, содержит принципиально новые научные результаты и полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Ее автор – ФАМ Ван Тунг, заслуживает присуждения искомой ученой степени по названной специальности за новые научно обоснованные результаты, отмеченные в п.3 данного отзыва.

Согласно приказу Генерального директора ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» В. М. Федосюка № 07 от 17.02.2025 данный отзыв рассмотрен и принят на расширенном заседании № 5 25 февраля 2025 года, протокол № 5, на котором соискатель ФАМ Ван Тунг выступил с докладом и квалифицированно ответил на заданные ему вопросы. В заседании участвовали 24 человека из них 3 доктора наук и 15 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования участников заседания, имеющих ученые степени: «за» - 18, «против» - нет, «воздержался» - нет.

Председатель Научного совета
доктор физ.-мат. наук,
зам. ген. директора по научной и инновационной работе
ГНУ «Научно-практический центр
Национальной академии наук
Беларуси по материаловедению»

Д. В. Карпинский

Эксперт
канд. физ.-мат. наук,
зам. ген. директора по научной и инновационной работе
ГНУ «Научно-практический центр
Национальной академии наук
Беларуси по материаловедению»

О. В. Игнатенко

Ученый секретарь Научного совета

А. В. Коновалова

Ознакомл. 25.02.2025

Фам Ван Тунг

