

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
ФАМ Ван Тунг «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства плёнок 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 диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите**

Диссертационная работа ФАМ Ван Тунг «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства плёнок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода» посвящена разработке инновационного метода химического осаждения пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) толщиной 35 – 1200 нм, отличающегося от известных продолжительностью, сокращенной более, чем на порядок (до 3 – 10 мин), и установлению структурных особенностей, электропроводящих и зарядовых свойств создаваемых этим методом пленок. Объект, предмет и методы исследования полностью соответствуют специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) и отрасли «физико-математические науки». Представленные в диссертации результаты входят в области исследований, предусмотренные паспортом данной специальности, раздел III.2, пункты 1 – «Методы формирования наноразмерных структур (наноструктур) и наноструктурированных материалов (наноматериалов)», 2 – «Свойства наноразмерных структур и наноструктурированных материалов».

### **2. Актуальность темы диссертации**

Актуальность представленных в диссертации результатов определяется тем, что в ней изучены вопросы, связанные с установлением закономерностей формирования наноструктурированных пленок  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  методом предложенного в работе скоростного химического осаждения из паровой (газовой) фазы на воздухе при атмосферном давлении и с изучением их структурных особенностей, электропроводящих и зарядовых свойств.

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках обучения в аспирантуре иностранных граждан по направлению деятельности кафедры «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика, композиционные и многофункциональные материалы, наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика»,

входящему в перечень приоритетных направлений научной научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 гг., утвержденный Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г.

### **3. Степень новизны результатов диссертации, и научных положений, выносимых на защиту**

Диссертационная работа содержит ряд новых научных результатов, вносящих вклад в развитие технологии формирования и физику электронных процессов в пленочном наноструктурированном  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . Научной новизной обладают следующие установленные закономерности и результаты, полученные впервые:

- 1) экспериментально показано, что синтез и осаждение на подложку графитоподобного нитрида углерода из паров меламина в воздушной атмосфере могут быть осуществлены при скорости нагрева подложки и расположенного рядом с ней источника осаждаемого материала, повышенной до  $4 - 6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , а выбор температуры осаждения в диапазоне  $500 - 620 \text{ }^\circ\text{C}$  и продолжительности процесса осаждения  $3 - 10$  мин обеспечивает формирование слоистых наноструктурированных пленок из этого материала толщиной  $35 - 1200 \text{ нм}$ , состоящих из ориентированных параллельно плоскости подложки кристаллитов размером порядка  $30 \text{ нм}$  и обладающих полупроводниковыми свойствами;
- 2) обнаружено и исследовано проявление мемристорного эффекта в пленочных структурах, в которых пленка графитоподобного нитрида углерода располагается между электропроводящими материалами, показавшее его зависимость от направления протекания тока – поперек или вдоль плоскости пленочной структуры, а также от толщины пленки, от материала подложки (Si или Al), от наличия или отсутствия под пленочной структурой диэлектрической пленки ( $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), электрически отделяющей ее от подложки;
- 3) предложена обобщенная резисторная модель и основанная на ней эквивалентная электрическая схема пленочных структур, в которых пленка графитоподобного нитрида углерода располагается между электропроводящими материалами, отличающаяся учетом двух наиболее значимых токопроводящих каналов – в плоскости пленки и параллельный ему шунтирующий канал из токопроводящего материала под этой пленкой, что позволило по экспериментальным данным впервые определить поперечное и продольное удельные сопротивления исследуемого материала в пленочном состоянии, а также оценить величины потенциальных барьеров между слоями и между кристаллитами в каждом слое;
- 4) обнаружено влияние диэлектрических пленок из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , находящихся под пленочными структурами на основе графитоподобного нитрида

углерода, на его электропроводящие и емкостные характеристики, которое объяснено присутствием в  $\text{SiO}_2$  встроенного положительного заряда и отсутствием такового в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;

5) разработана модель и основанная на ней эквивалентная электрическая схема слоистого поликристаллического полупроводника, в которых этот материал состоит из наноразмерных слоев полупроводника с ориентированными в плоскости слоев нанокристаллическими зернами внутри них, расчеты по которым позволяют моделировать вольт-амперные характеристики таких структур в зависимости от электронных свойств самого материала, количества слоев и количества кристаллических зерен в слое и от свойств границ между ними, включая проявление мемристорного эффекта на этих границах.

#### **4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Полученные в работе научные результаты объективны и являются обоснованными, выводы аргументированы, вытекают из содержания проведенных исследований и отражают научные положения, представленные в диссертации. Достоверность результатов и выводов подтверждена экспериментальными данными, хорошо согласующимися с результатами других авторов, и проведенным теоретическим моделированием электропроводящих и зарядовых свойств сформированных плёнок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода.

#### **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию**

Научная значимость представлена новыми знаниями о синтезе и осаждении на подложку графитоподобного нитрида углерода из паров меламина в воздушной атмосфере; обнаружением и исследованием проявления мемристорного эффекта в пленочных структурах на различных подложках; определением поперечного и продольного удельных сопротивлений исследуемого материала в пленочном состоянии, а также оценкой величины потенциальных барьеров между слоями и между кристаллитами в каждом слое; обнаружением влияния диэлектрических пленок из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , находящихся под пленочными структурами на основе графитоподобного нитрида углерода, на его электропроводящие и емкостные характеристики; моделированием вольт-амперных характеристик таких структур в зависимости от электронных свойств самого материала, количества слоев и количества кристаллических зе-



рен в слое и от свойств границ между ними, включая проявление мемристорного эффекта на этих границах.

Практическая значимость заключается в возможности оценки и прогнозирования параметров пленок графитоподобного нитрида углерода в наноразмерных элементах электронных устройств.

Экономическая значимость состоит в возможности использования простой технологии для осаждения  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  на различные подложки при создании наноструктур для микро- и оптоэлектроники. Результаты могут использоваться в качестве рекомендаций для достижения требуемых свойств материала в мемристорных устройствах.

Социальная значимость работы состоит в использовании полученных результатов при подготовке инженеров по специальностям «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы», «Квантовые информационные системы» «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре микро- и нанoeлектроники, что подтверждается Актом внедрения. Они также рекомендуются для использования в других университетах и научных центрах, ведущих разработки и выполняющих подготовку специалистов в области нанотехнологий и наноматериалов.

#### **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах. В их числе 4 статьи в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, объемом 3,35 авторского листа и 6 статей в сборниках трудов научных конференций объемом 1,74 авторского листа.

Наиболее значимой считаю статью “Rapid chemical vapor deposition of graphitic carbon nitride films” / E. B. Chubenko, S. E. Maximov, C. D. Bui, V. T. Pham, V. E. Borisenko // *Materialia*. – 2023. – Vol. 28. – P. 101724 (6 pages).

Полученные в диссертации результаты докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях – на 58-й, 59-й и 60-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2022, 2023, 2024 г.); XII Международной научной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2022 г.); XI Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2024 г.).

## **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с Инструкцией о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации, утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 28.02.2014 № 3 (в редакции постановления Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 22.08.2022 № 5).

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

## **8. Замечания по диссертации**

1. В диссертации следовало бы привести фотографии внешнего вида пленочных структур, на которых проводились электрические измерения.

2. Говоря о перспективах практического применения структур, в состав которых входят исследованные пленки графитоподобного нитрида углерода, следовало бы назвать примеры конкретных возможных приборов для электронной, оптоэлектронной или оптической обработки информации.

## **9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

Представленная диссертация свидетельствует о том, что ее автор способен творчески решать современные проблемы физики и техники наноструктур, владеет современными методами экспериментальных исследований и обработки результатов, а также навыками проведения информационного поиска и анализа в области исследуемых материалов, процессов, явлений и закономерностей.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что научная квалификация ФАМ Ван Тунг соответствует требованиям, предъявляемым к соискателям ученой степени кандидата физико-математических наук.

## **10. Заключение**

Диссертационная работа ФАМ Ван Тунг «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства плёнок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода», подготовленная под научным руководством доктора физико-математических наук, профессора В. Е. Борисенко, является завершённой самостоятельно выполненной квалификационной работой. Ее содержание отвечает требованиям пунктов 20-21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Она содержит новые научные теоретические и экспериментальные результаты, преду-

смотренные паспортом специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники).

Считаю, что ФАМ Ван Тунг заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по названной специальности:

1) за разработку и апробацию простой и эффективной технологии с одним нагревателем и повышенной скоростью осаждения на изолирующие и токопроводящие подложки наноразмерных пленок графитоподобного нитрида углерода, определение температурно-временных режимов осаждения пленок из этого материала и их структурных параметров;

2) за определение оптической ширины запрещенной зоны пленочного  $g-C_3N_4$ , составившей величину 2,95 – 2,98 эВ;

3) за обнаружение и исследование в пленочных структурах  $Al/g-C_3N_4/Al$  и  $Al/g-C_3N_4/Si$  мемристорного переключения электрического сопротивления, выражающегося в типичных для этого эффекта петлеобразных вольт-амперных характеристиках;

4) за разработку детализированной резисторной модели, описывающей протекание тока в пленках, состоящих из двумерных слоев, образованных нанокристаллическими зернами полупроводника, и расчет поперечного удельного сопротивления пленочного  $g-C_3N_4$  для состояний с высокой и низкой проводимостью;

5) за обнаружение влияния диэлектрических пленок из  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , находящихся под пленочными структурами на основе  $g-C_3N_4$ , на их зарядовые свойства, расчет по экспериментальным вольт-фарадным характеристикам низкочастотной диэлектрической проницаемости  $g-C_3N_4$ .

Официальный оппонент –  
ведущий научный сотрудник

Центра «Широкозонная нано- и микроэлектроника»

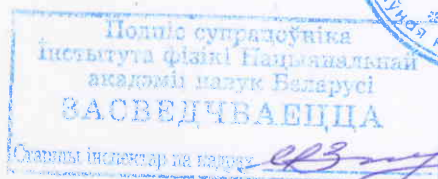
ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова

Национальной академии наук Беларуси»

кандидат физико-математических наук, доцент



В. Н. Павловский



Смаколен 26.02.2025

*Ван Тунг*

