

О Т З Ы В

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 специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертационная работа «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства плёнок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода», подготовлена и представлена к защите гражданином Вьетнама, обучавшемся в аспирантуре Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Диссертация посвящена исследованию закономерностей формирования, особенностям структуры, электропроводящим и зарядовым свойствам наноструктурированных пленок двумерного полупроводника – графитоподобного нитрида углерода ($g-C_3N_4$). Выбранный объект исследования, а также предмет и методы исследования соответствуют специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники) и физико-математической отрасли наук. Содержащиеся в диссертации результаты входят в области исследований, отмеченные в разделе III.2 паспорта данной специальности, частности это пункты 1. Методы формирования наноразмерных структур (наноструктур) и наноструктурированных материалов (наноматериалов)» и 2. Свойства наноразмерных структур и наноструктурированных материалов».

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации и представленных в ней результатов не вызывает сомнений, поскольку работа посвящена изучению широкозонного двумерного материала, перспективного с точки зрения применений в электронике, фотонике и в ряде других актуальных приложений. Автором работы сделан важный шаг – переход от порошкообразных образцов к формированию пленочных структур с последующим исследованием физических свойств таких пленок.

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках одного из направлений деятельности кафедры, входящего 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. - машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика, композиционные и многофункциональные материалы, наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика.

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

В диссертационной работе представлены и вынесены на защиту в виде конкретных положений новые научные результаты, вносящие вклад в развитие физических представлений о закономерностях формирования пленок наноструктурированного $g\text{-C}_3\text{N}_4$ химическим осаждением из газовой фазы, а также о их свойствах. Научной новизной обладают следующие установленные впервые закономерности и свойства:

1. Лабораторной методика химического осаждения графитоподобного нитрида углерода из паров меламина при атмосферном давлении на полупроводниковые, токопроводящие и изолирующие подложки, обеспечивает ускоренный более, чем на порядок, рост полупроводниковых пленок материала по сравнению с традиционно используемыми режимами.
2. Синтез по разработанной методике экспериментальных образцов пленок графитоподобного нитрида углерода в виде слоистых наноструктурированных пленок толщиной от 35 нм до 1200 нм, с полупроводниковыми свойствами, характеризуемыми шириной запрещенной зоны 2,95 – 2,98 эВ, и результаты их последующего детального изучения.
3. Обнаружение и исследование 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 других параметров структур и подложки.
4. Предложенная автором обобщенная резисторная модель и основанная на ней эквивалентная электрическая схема пленочных структур, позволившая по экспериментальным данным впервые определить поперечное и продольное удельные сопротивления пленок исследуемого материала, а также оценить величины потенциальных барьеров между слоями и между кристаллитами в каждом слое с учетом двух наиболее значимых токопроводящих каналов – в плоскости пленки и параллельный ему шунтирующий канал из токопроводящего материала под пленкой.
5. Установление влияния диэлектрических пленок из SiO_2 и Al_2O_3 , находящихся под пленочными структурами на основе графитоподобного

нитрида углерода, на его электропроводящие и емкостные характеристики. Объяснение этого влияния присутствием в SiO_2 встроенного положительного заряда и отсутствием такового в Al_2O_3 .

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

Достоверность полученных в работе результатов базируется на использовании современных экспериментальных методов исследования, а также на сопоставлении полученных результатов с экспериментальными и теоретическими данными, опубликованными в литературе.

Диссертант проявил высокий уровень владения современными методами анализа твердотельных структур, таких как сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и рентгеновская дифрактометрия, фотолюминесценция, оптическая спектроскопия, вольт-амперные и вольт-фарадные измерения на пленочных структурах. Предложенные модельные представления основываются на известных физических и химических закономерностях и непротиворечиво развивают их. Сделанные выводы и предложенные рекомендации аргументированы, вытекают из содержания проведенных исследований.

Научные положения, выносимые автором на защиту, являются обоснованными и четко сформулированными и основаны на корректном анализе экспериментальных данных и расчетных характеристик, полученных в ходе выполнения диссертационной работы.

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

Научная значимость представлена новыми знаниями о закономерностях формирования пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода $g\text{-C}_3\text{N}_4$ химическим осаждением из газовой фазы, а также о их физико-химических свойствах, расширяющих возможности применения таких пленок в микроэлектронике и фотонике.

Практическая значимость результатов диссертации в достаточной степени отражена в тексте работы и заключается в том, что разработанная автором методика ускоренного синтеза пленочных структур на основе графитоподобного нитрида углерода создают базис для использования этого материала в микроэлектронике и фотонике при разработке конструкций и технологии изготовления интегральных элементов электронной и оптической обработке информации. Установленные закономерности и предложенные модели используются при подготовке инженеров по ряду специальностей в

БГУИР, а также могут найти применение в научных организациях и университетах при подготовке специалистов в области современных нанотехнологий и наноматериалов.

Экономическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенная лабораторная технология синтеза пленок графитоподобного нитрида углерода g-C₃N₄ обеспечивает существенное ускорение (и удешевление) процесса синтеза и может быть использована для масштабирования технологии в случае использования материала в микроэлектронике и фотонике.

Социальная значимость работы состоит в возможности использовать полученные результаты не только в новых фундаментальных и прикладных исследованиях и разработках, но и в учебном процессе, о чем свидетельствует приложенный к диссертации Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Научные результаты диссертации представлены в 10 опубликованных печатных работах. В их числе 4 статьи в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий и 6 статей в сборниках трудов научных конференций. Они также были доложены и обсуждались на международных и республиканских конференциях, а именно 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. Положение 1, на мой взгляд, излишне перегружено деталями и стилистически трудночитаемо (одно предложение в 11 строк).

2. В Положении 1 и во многих других местах указано содержание кислорода в пленках ~ 2.9 атм.%. В связи с этим возникает вопрос, предпринимались ли попытки удаления кислорода из образцов или изменение его содержания, изучалась ли влияние кислорода на физико-химических характеристик материала.
3. Положение 2 о мемристорном эффекте в исследованных структурах следовало бы уточнить характеризующими его количественными показателями.
4. При всей очевидности термина «графитоподобный» его определение в диссертации отсутствует. Если речь идет о гексагональной кристаллической решетке, то почему не «графеноподобный» или же «гексагональный» по аналогии с устоявшимся термином «гексагональный нитрид бора».
5. На стр. 47 автор пишет «Увеличение ширины запрещенной зоны ... может отражать увеличение скорости ...». В связи с этим возникает вопрос, насколько обосновано физически это утверждение. Следовало бы привести научные аргументы для обоснования. Это же замечание относится и к следующему предложению, где используется термин «вероятно» без достаточной аргументации. Автору следовало бы более критично относиться к высказыванию тех или иных предположений.
6. Перспективы практического применения исследованных структур с пленками $g-C_3N_4$ надо было усилить примерами конкретных возможных приборов для электронной, оптоэлектронной или оптической обработки информации.

Указанные замечания не затрагивают положений, выносимых на защиту, основных результатов, выводов и рекомендации, а также не снижают научной и практической ценности диссертационной работы, выполненной ФАМ Ван Тунгом.

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

Представленная к защите диссертация отвечает требованиям пунктов 20 и 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Судя по представленным в ней материалам, научная квалификация ее автора – ФАМ Ван Тунг, соответствует искомой ученой степени кандидата физико-математических наук. Он показал, что способен творчески решать современные проблемы физики и технологии создания наноструктур, владеет современными

методами экспериментальных исследований и обработки результатов, обладает навыками проведения научного анализа в области исследуемых материалов, процессов, закономерностей, явлений.

10. Заключение

Диссертационная работа ФАМ Ван Тунг «Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства плёнок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода» является завершённой самостоятельно выполненной квалификационной работой. Она содержит новые научные теоретические и экспериментальные результаты, предусмотренные паспортом специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы для электроники и фотоники).

ФАМ Ван Тунг заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по названной специальности за новые научные результаты, включающие:

- Разработку лабораторной методики химического осаждения графитоподобного нитрида углерода из паров меламин при атмосферном давлении на полупроводниковые, токопроводящие и изолирующие подложки, обеспечивающей более, чем на порядок, ускоренный рост пленок по сравнению с традиционно используемыми режимами благодаря скорости нагрева, повышенной до 4 – 6 °С/с в диапазоне температур 500 – 620 °С.
- Экспериментальную реализацию методики ускоренного роста пленок графитоподобного нитрида углерода, обеспечивающую формирование слоистых наноструктурированных пленок из этого материала толщиной от 35 нм до 1200 нм, с полупроводниковыми свойствами, характеризующимися шириной запрещенной зоны 2,95 – 2,98 эВ.
- Экспериментальное обнаружение и исследование 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 других параметров структур и подложки.
- Разработку обобщенной резисторной модели и основанной на ней эквивалентной электрической схемы пленочных структур, что позволило по экспериментальным данным впервые определить поперечное и продольное удельные сопротивления пленок исследуемого материала, а также оценить величины потенциальных барьеров между слоями и между кристаллитами в

каждом слое с учетом двух наиболее значимых токопроводящих каналов – в плоскости пленки и параллельный ему шунтирующий канал из токопроводящего материала под пленкой.

- Установление влияния диэлектрических пленок SiO_2 и Al_2O_3 , находящихся под пленочными структурами на основе $\text{g-C}_3\text{N}_4$, на зарядовые свойства материала при повышении частоты измерительного сигнала в диапазоне 100 Гц – 10 кГц, состоящего в том, что слой SiO_2 , в силу присутствия в нем встроенного положительного заряда, приводит к немонотонному характеру вольт-фарадных характеристик и более существенному снижению электрической емкости – до 80%, по сравнению со случаем Al_2O_3 , где этот эффект не превышает 6%.

Официальный оппонент

Директор научно-исследовательского
учреждения «Институт ядерных проблем»

Белорусского государственного университета

доктор физико-математических наук, профессор



4.03.2025

С. А. Максименко

Ознакомлен. 06.03.2025

[Signature]
Валентин Шукла

