

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права
УДК 544.653.1; 621.315.592

ФАМ
Ван Тунг

**ФОРМИРОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ И ЗАРЯДОВЫЕ
СВОЙСТВА ПЛЕНОК НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ГРАФИТОПОДОБНОГО
НИТРИДА УГЛЕРОДА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы
(материалы для электроники и фотоники)

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Борисенко Виктор Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты **Максименко Сергей Афанасьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, директор научно-исследовательского учреждения «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета **Павловский Вячеслав Николаевич**, кандидат доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра «Широкозонная нано- и микроэлектроника» ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 13 марта 2025 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232.
тел. 293-89-89.
e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан 12 февраля 2025 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
доктор физико-математических наук, профессор



С. К. Лазарук

ВВЕДЕНИЕ

Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) стал объектом интенсивных исследований благодаря его уникальным свойствам, таким как широкая запрещенная зона ($\sim 2,7$ эВ) и двумерная слоистая структура. Они делают его перспективным материалом для электроники, фотоники, фотокатализа и в других приложениях. Традиционно его синтезируют в виде объемных порошкообразных образцов термическим разложением органического прекурсора (меламин, мочевины, цианамид и других) с последующей полимеризацией продуктов разложения. Это ограничивает возможности применения этого материала в высокотехнологичных устройствах электроники и фотоники, традиционно базирующихся на пленочных структурах.

Предпринятые немногочисленные попытки сформировать и исследовать свойства графитоподобного нитрида углерода в виде пленок показали принципиальную возможность этого. Наиболее удачным с точки зрения технологичности и контроля свойств формируемых пленок следует считать метод химического осаждения из паровой (газовой) фазы. Он позволяет не только воспроизвести природную наноструктурированность этого материала, но и создавать образцы, пригодные для детального исследования современными методами и последующего использования его электронных и оптических свойств. Однако к началу наших исследований этот метод лишь продемонстрировал свою перспективность. Оставались неизученными электропроводящие и зарядовые свойства пленок из этого материала, их взаимосвязь с особенностями его структуры и влияния на них контактирующих с ним пленок из традиционных материалов современной микро- и нанoeлектроники – кремния, диоксида кремния, алюминия, оксида алюминия. Проведение исследований в данном направлении, наряду с совершенствованием метода химического осаждения нитрида углерода, определило необходимость и актуальность работ, результаты которых представлены в данной диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке метода химического осаждения пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода из паровой (газовой) фазы в воздушной атмосфере с продолжительностью, сокращенной до 3 – 10 мин, и исследованию его электропроводящих и зарядовых свойств.

Связь работы с научными программами, темами

Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники 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., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационного исследования является разработка метода скоростного химического осаждения пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода из паровой (газовой) фазы в воздушной атмосфере с продолжительностью менее 10 мин, экспериментальное установление и модельное описание закономерностей электропроводности и проявления зарядовых свойств этого материала в пленочных структурах на его основе. Решаемые задачи:

- разработать и экспериментально опробовать скоростное химическое осаждение пленок графитоподобного нитрида углерода из газовой фазы на кремниевые, алюминиевые и стеклянные подложки при атмосферном давлении с продолжительностью процесса осаждения менее 10 мин;

- установить закономерности формирования, состав и кристаллическую структуру осажденных пленок графитоподобного нитрида углерода и пленочных структур на его основе;

- измерить вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики пленочных структур, содержащих пленки графитоподобного нитрида углерода, по которым определить электропроводящие и зарядовые свойства этого материала;

- опираясь на установленные экспериментально закономерности, разработать модели токопереноса в пленочных структурах с наноструктурированным графитоподобным нитридом углерода.

Объектом исследования являются пленки наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода и пленочные структуры на их основе. *Предмет исследования* – закономерности формирования данных пленок и структур, их структурные, оптические, электропроводящие и зарядовые свойства.

Научная новизна

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 °С/с, а выбор температуры осаждения в диапазоне 500 – 620 °С и продолжительности процесса осаждения 3 – 10 мин обеспечивает формирование слоистых наноструктурированных пленок из этого материала толщиной 35 – 1200 нм, состоящих из ориентированных параллельно плоскости подложки кристаллитов размером порядка 30 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 (SiO_2 или Al_2O_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 SiO_2 и Al_2O_3 , находящихся под пленочными структурами на основе графитоподобного нитрида углерода, на его электропроводящие и емкостные характеристики, которое объяснено присутствием в SiO_2 встроенного положительного заряда и отсутствием такового в Al_2O_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.

Положения, выносимые на защиту

1. Химическое осаждение графитоподобного нитрида углерода из паров меламин при атмосферном давлении на полупроводниковые (кремний) токопроводящие (сильнолегированный кремний, алюминий) и изолирующие (оксиды кремния и алюминия, стекло) подложки возможно при $500 - 620\text{ }^\circ\text{C}$ при продолжительности процесса осаждения не менее 3 мин, сокращенной более, чем на порядок, по сравнению с традиционно используемыми режимами, благодаря скоростям нагрева, повышенным до $4 - 6\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, обеспечивая при этом формирование слоистых наноструктурированных пленок из этого материала толщиной от 35 нм до 1200 нм, содержащих до 2,9 ат.% кислорода, с полупроводниковыми свойствами, характеризуемыми шириной запрещенной зоны 2,95 – 2,98 эВ.

2. В пленочных структурах $\text{Al}/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ и $\text{Al}/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Si}$ проявляется мемристорное переключение электрического сопротивления в диапазоне температур от комнатной до $110\text{ }^\circ\text{C}$, 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 $\text{g-C}_3\text{N}_4$; от материала подложки (Si или

Al); от наличия или отсутствия под пленочной структурой диэлектрической пленки (SiO_2 или Al_2O_3), электрически отделяющей ее от подложки.

3. Предложенная обобщенная резисторная модель и основанная на ней эквивалентная электрическая схема исследуемых пленочных структур отличается учетом двух наиболее значимых токопроводящих каналов – 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 $g\text{-C}_3\text{N}_4$, равное $80 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ для состояния с высокой проводимостью и $100 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ для состояния с низкой проводимостью; продольное удельное сопротивление равное $4000 - 4500 \text{ кОм}\cdot\text{см}$; величины потенциальных барьеров между слоями – $0,18 - 0,22 \text{ эВ}$, и между кристаллитами в каждом слое – $0,79 - 1,00 \text{ эВ}$, в предположении термоэлектронного механизма проводимости этого материала.

4. Диэлектрические пленки из SiO_2 и Al_2O_3 , находящиеся под пленочными структурами на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$, оказывают влияние на его зарядовые свойства, состоящее в том, что SiO_2 , в отличие от Al_2O_3 , приводит к немонотонному характеру вольт-фарадных характеристик и более существенному снижению электрической емкости – 80% против 6% , при повышении частоты измерительного сигнала в диапазоне $100 \text{ Гц} - 10 \text{ кГц}$, что объясняется присутствием в SiO_2 встроенного положительного заряда.

5. Электропроводящие свойства пленочных структур, состоящих из наноразмерных слоев полупроводника с нанокристаллическими зёрнами внутри них могут быть описаны эквивалентной электрической схемой из последовательно и параллельно включенных резисторов, представляющих собственные свойства полупроводникового материала, а также свойства межслойных и межзёрненных границ, которая позволяет моделировать вольт-амперные характеристики таких структур в зависимости от электронных свойств самого материала, количества слоев и количества кристаллических зёрен в слое и от свойств границ между ними, включая и мемристорный эффект на этих границах.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены и обобщены соискателем самостоятельно. Вместе с этим, основным соавтором публикаций является научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор В. Е. Борисенко, который определил цель и задачи исследований, участвовал в планировании и анализе результатов экспериментов и теоретического моделирования. Формирование пленочных структур проведено с участием кандидата технических наук, доцента Е. А. Уткиной и С. Е. Максимова. Структурный анализ экспериментальных образцов осуществлен в государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Центре «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» и в Белорусском государственном университете. Оптические

измерения и их интерпретация сделаны совместно с доктором физико-математических наук, доцентом Е. Б. Чубенко и К. Д. Буем. В обсуждении результатов и интерпретации результатов измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик принимали участие доктор физико-математических наук, доцент Е. Б. Чубенко и кандидаты физико-математических наук А. Л. Данилюк и Д. А. Подрябинкин.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались 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.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 10 печатных работ. 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.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения.

Общий объем диссертации составляет 106 страниц формата А4, из них 72 страницы основного текста, 49 иллюстраций на 19 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 124 наименований на 12 страницах, включая 10 публикаций соискателя, и 1 приложение на 1 странице, включающее Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проанализировано состояние исследований по графитоподобному нитриду углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$). Рассмотрены его структура и химический состав. Особое внимание уделено методам синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в объемном и пленочном состояниях, а также его электронным свойствам. Разработки последних лет показали возможности использования этого материала в фотокаталитических и сенсорных устройствах, а также в светотехнике и оптоэлектронике. Имеются существенные перспективы его применения в микро- и наноэлектронике, однако это требует как совершенствования методов формирования пленок из этого материала, так и детального изучения их

электропроводящих и зарядовых свойств. Исходя из этого, сформулирована цель диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны методики подготовки и исследования экспериментальных образцов. В качестве исходного материала для синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ использовали меламин с содержанием основного компонента не менее 99 масс.%, а в качестве подложек пластины из монокристаллического кремния, алюминия или стекла.

Формирование пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ осуществляли разработанным нами методом скоростного химического осаждения из паровой (газовой) фазы в воздушной атмосфере. Реактор для осаждения пленок представляет собой стеклянную воронку, дно которой перегородено пластиной из пористого стекла. На него наносили порошок меламина, служащего источником материала пленки. Подложку для осаждаемой пленки располагали в верхней широкой части воронки. После этого всю конструкцию быстро помещали в муфельную печь Nabertherm 9 L/330, предварительно разогретую до определенной стабилизированной температуры в диапазоне 500 – 620 °С. Газовая среда в печи – воздух при атмосферном давлении. После выдержки в течение 3 – 10 мин подложку быстро извлекали из печи. Отличительной особенностью предложенного метода является одновременный нагрев и источника материала пленки, и подложки с нетрадиционной для химического осаждения $g\text{-C}_3\text{N}_4$ высокой скоростью 4 – 6 °С/с.

Морфологию, состав, кристаллическую структуру осажденных пленок исследовали сканирующей электронной микроскопией, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией, рентгеновской дифрактометрией. Толщину пленок определяли гравиметрически и сканирующей электронной микроскопией поперечного скола образцов. Полупроводниковые свойства оценивали по фотолюминесценции и оптической спектроскопией.

Для создания электрических контактов к внешней поверхности пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и к кремниевой или алюминиевой подложке их защищали механически прижатой контактной маской и в окна маски магнетронным распылением наносили пленку алюминия толщиной 100 нм. Так были сформированы пленочные структуры, позволившие определять электропроводящие и зарядовые свойства исследуемых пленок, измеряя их вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) при протекании тока перпендикулярно и вдоль плоскости пленок. Регистрацию ВАХ осуществляли, используя измеритель Keithley 2450 (SMU) при комнатной температуре или при 30 – 110 °С. ВФХ измеряли при комнатной температуре с использованием измерителя иммитанса E7-25.

В **третьей главе** представлены экспериментальные результаты по закономерностям формирования, морфологии, элементному составу и кристаллической структуре пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

Установлено, что предложенный метод скоростного осаждения $g\text{-C}_3\text{N}_4$ позволяет формировать пленки из этого материала на кремниевых, окисленных кремниевых, алюминиевых, окисленных алюминиевых и стеклянных подложках при температурах 500 – 620 °С в течение 3 – 10 мин. При этом толщину

осажденных пленок можно варьировать выбором температуры и продолжительности осаждения – рисунок 1. Поскольку процесс синтеза осаждаемого материала на подложке конкурирует с его испарением, очень тонкие пленки можно получать, как ограничивая количество используемого меламина, так и комбинируя температуру и продолжительность процесса осаждения, а также проводя отжиг уже сформированных пленок. Таким образом удается формировать пленки толщиной от 35 нм до 1200 нм.

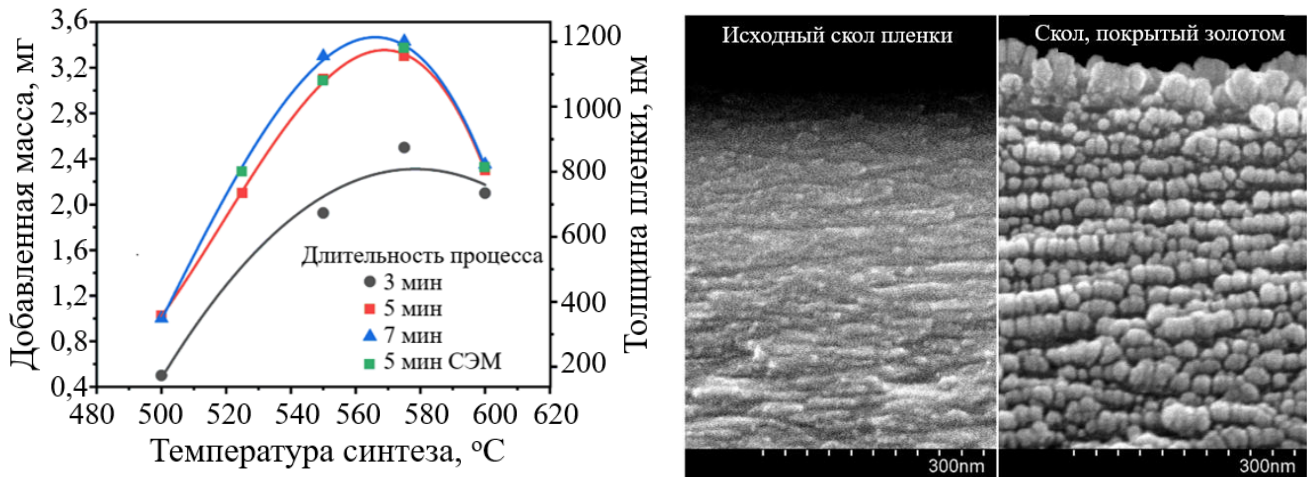


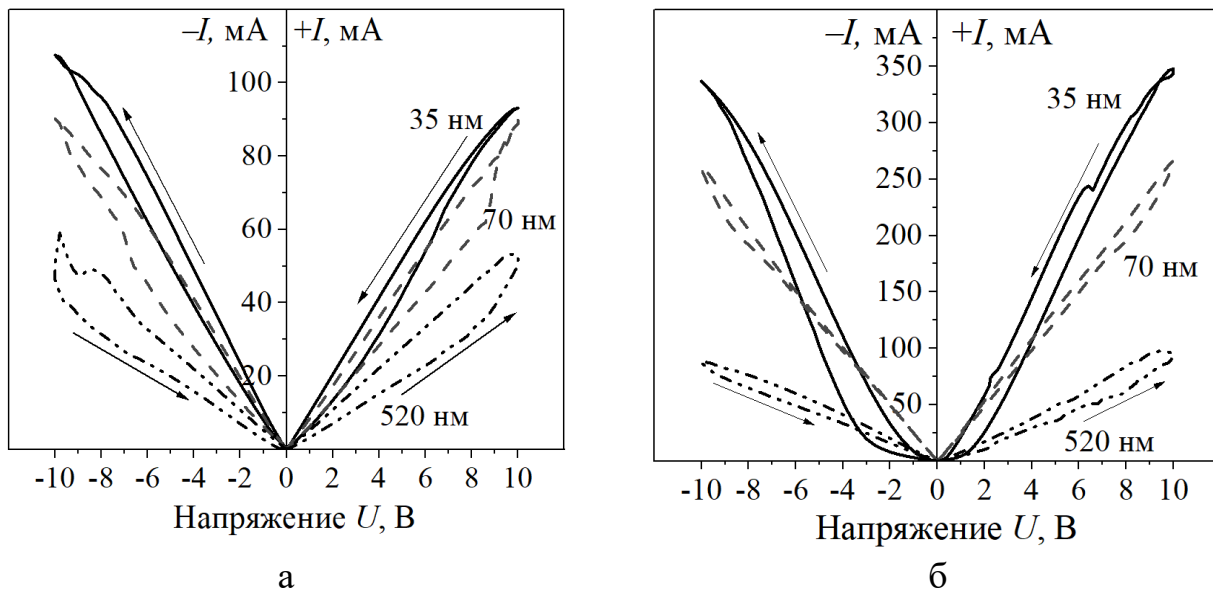
Рисунок 1 – Толщина пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$, осажденных на монокристаллический кремний, в зависимости от температуры и длительности осаждения и поперечная структура пленки, осажденной при 600 °C в течение 5 мин

Осажденные пленки образованы слоями материала, располагающимися квазипараллельно поверхности подложки, а каждый отдельный слой, имея толщину порядка 30 нм, состоит из кристаллических зерен, размер которых вдоль поверхности подложки соизмерим с толщиной слоя. Осажденный материал, хотя и имеет незначительное отклонение от идеальной стехиометрии $g\text{-C}_3\text{N}_4$, видимо из-за присутствия в нем кислорода, концентрация которого может достигать 2,9 ат.%, обладает, как показал рентгеновский анализ, типичной для $g\text{-C}_3\text{N}_4$ гексагональной кристаллической решеткой. Его плоскости (002) расположены параллельно поверхности подложки. Осаждение $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на алюминий, сопровождается появлением включений из гексагонального Al_2O_3 на их границе, что, вероятнее всего, является следствием окисления алюминия с участием аммиака, выделяющегося при разложении меламина.

Результаты фотолюминесцентных и оптических исследований осажденных пленок показали, что образующий их материал ведет себя как полупроводник с оптической шириной запрещенной зоны 2,95 – 2,98 эВ. Это на 0,2 эВ больше, чем в объемном нелегированном $g\text{-C}_3\text{N}_4$, что объясняется присутствием кислорода.

В четвертой главе рассмотрены полученные по измеренным ВАХ и ВФХ электропроводящие и зарядовые свойства плёнок из наноструктурированного $g\text{-C}_3\text{N}_4$, осажденных на кремний, окисленный кремний, алюминий, окисленный алюминий и снабженных электропроводящими поверхностными контактами из алюминия.

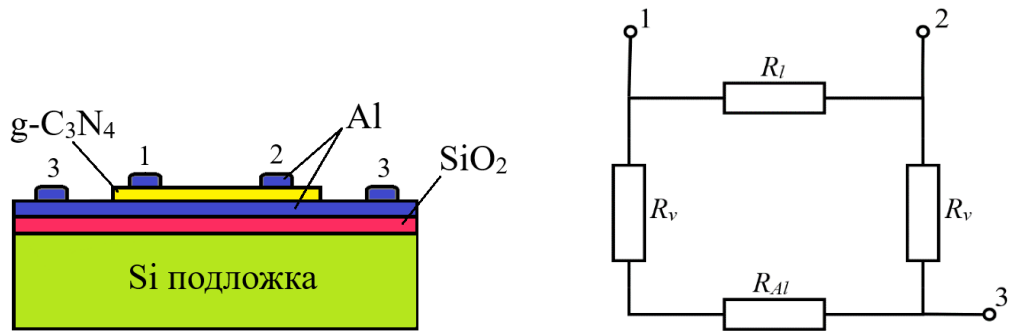
Характерной особенностью измеренных ВАХ является их петлеобразный вид, свидетельствующий о проявлении в исследуемых пленочных структурах мемристорного эффекта – рисунок 2.



а – ток в плоскости пленки; б – ток перпендикулярно плоскости пленки
Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики пленочных структур с $g-C_3N_4$ толщиной 35 – 520 нм на монокристаллическом кремнии, измеренные при комнатной температуре

Величина протекающего через пленочные структуры тока зависит от направления его протекания. Продольные токи в несколько раз (до 2 порядков) меньше поперечных. Важными факторами также являются особенности конструкции: толщина пленки $g-C_3N_4$; материал подложки (кремний или алюминий); наличие или отсутствие под пленочной структурой диэлектрической пленки, электрически отделяющей ее от подложки (SiO_2 или Al_2O_3) и собственные свойства материала этой пленки.

Для расчета удельного электрического сопротивления пленочного $g-C_3N_4$ предложена обобщенная резисторная модель исследуемых структур – рисунок 3. В ней учтены два наиболее значимых токопроводящих канала – в плоскости пленки и параллельный ему канал, учитывающий шунтирующее влияние токопроводящего материала (кремний или алюминий) под исследуемой пленкой. Этот параллельный канал предполагает прохождение носителей заряда из поверхностного алюминиевого контакта через пленку $g-C_3N_4$ в поперечном направлении к нижележащему низкоомному проводнику, далее по нему они опять пересекают пленку $g-C_3N_4$ в поперечном направлении и уходят в соседний поверхностный алюминиевый контакт, относительно которого приложено внешнее напряжение.



R_l – продольное сопротивление пленки; R_v – поперечное сопротивление пленки; R_{Al} – сопротивление пленки алюминия (или кремния) под $g-C_3N_4$
Рисунок 3 – Пленочная структура с $g-C_3N_4$ на токопроводящей пленке алюминия и ее эквивалентная электрическая схема

Проведенные расчеты показали, что поперечное удельное сопротивление пленочного $g-C_3N_4$ составляет порядка 80 кОм·см для состояния с высокой проводимостью и 100 кОм·см для состояния с низкой проводимостью. Продольное удельное сопротивление находится в пределах 4000 – 4500 кОм·см. Для пленок, сформированных химическим осаждением из газовой фазы, эти характеристики получены впервые.

Предложена модель электропроводности $g-C_3N_4$, основанная на предположении о слоистой поликристаллической структуре этого материала и термоэлектронном механизме переноса носителей заряда в поликристаллических полупроводниках. Согласно эквивалентной схеме, представленной на рисунке 4, сопротивление $R_{\Sigma l}$, рассчитываемое по ВАХ, снятых в продольном направлении, есть

$$R_{\Sigma l} = \left(\frac{1}{R_l} + \frac{1}{2R_v} \right)^{-1}, \text{ из чего следует } R_l = \left(\frac{1}{R_{\Sigma l}} - \frac{1}{2R_v} \right)^{-1} \quad (1)$$

При термоэлектронном механизме переноса носителей

$$R = A_0 T^{1/2} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \text{ а } \ln R = \ln A_0 + \frac{1}{2} \ln T + \frac{E_a}{kT}, \quad (2)$$

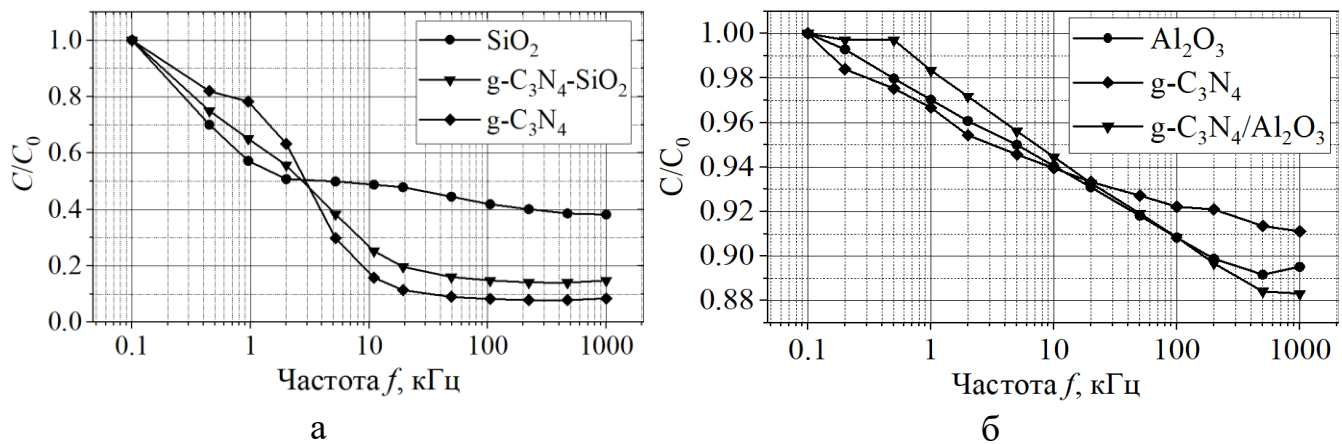
где A_0 – константа, не зависящая от температуры; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана; E_a – энергия активации электропроводности материала, которая в соответствии с моделью для проводимости поликристаллов, представляет собой высоту межкристаллитных потенциальных барьеров. После применения (2) к соотношению (1) и дифференцирования по T нами получено:

$$E_{al} = E_{av} + E_{a\Sigma} - \Delta, \quad (3)$$

где E_{al} – высота потенциальных барьеров между кристаллитами в продольном направлении, E_{av} – высота потенциальных барьеров между слоями материала в поперечном направлении, $E_{a\Sigma}$ – энергия активации, соответствующая измерениям в продольном направлении, Δ – некоторая поправка, слабо зависящая от температуры. Расчеты по полученным температурным зависимостям ВАХ пленочных структур в диапазоне 30 – 110 °С дали величины потенциальных

барьеров между слоями – 0,18 – 0,22 эВ, и между кристаллитами в каждом слое – 0,79 – 1,00 эВ. Отмечено также, что наличие пленки SiO_2 под исследуемой пленочной структурой приводит к заметному росту величины этих потенциальных барьеров.

В отношении зарядовых свойств установлено, что ВФХ пленочных структур на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ зависят от собственных свойств контактирующего с ним диэлектрика. Так присутствие SiO_2 , в отличие от Al_2O_3 , приводит к немонокотному их поведению и более существенному снижению электрической емкости при повышении частоты измерительного сигнала в диапазоне 100 Гц – 10 кГц – рисунок 4. Оно составляет порядка 80 % и 6 % соответственно. Это объяснимо с учетом присутствия в SiO_2 встроенного положительного заряда.



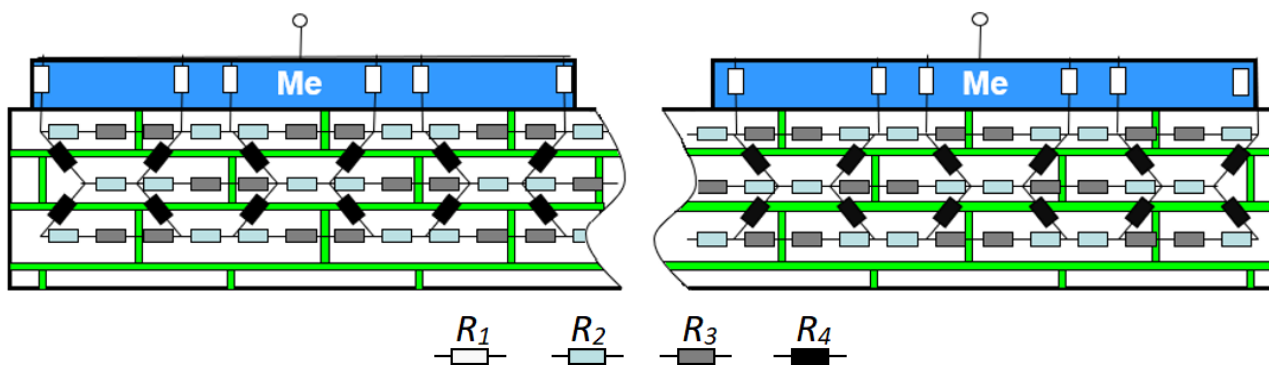
а – на кремниевых подложках; б – на алюминиевых подложках

Рисунок 4 – Относительное изменение емкости изготовленных пленочных структур в зависимости от частоты измерительного сигнала при постоянном смещении 3 В. C_0 – емкость на частоте 100 Гц

Рассчитанная по экспериментальным данным низкочастотная диэлектрическая проницаемость $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при комнатной температуре составляет 14, что согласуется с данными других исследователей.

В пятой главе приведены и обсуждаются развитые представления о протекании электрического тока в многослойных пленочных структурах путем их моделирования с использованием резисторов с линейной ВАХ и мемристоров. В них учтено наличие в пленках наноструктурированного $g\text{-C}_3\text{N}_4$ отличающихся по электрическим свойствам границ между нанокристаллическими зернами в плоскости слоев и межслойных границ, которые образуют потенциальные барьеры для переноса подвижных носителей заряда.

Моделируемая слоистая пленочная структура в двумерном представлении и ее эквивалентная резисторная электрическая показаны на рисунке 5.



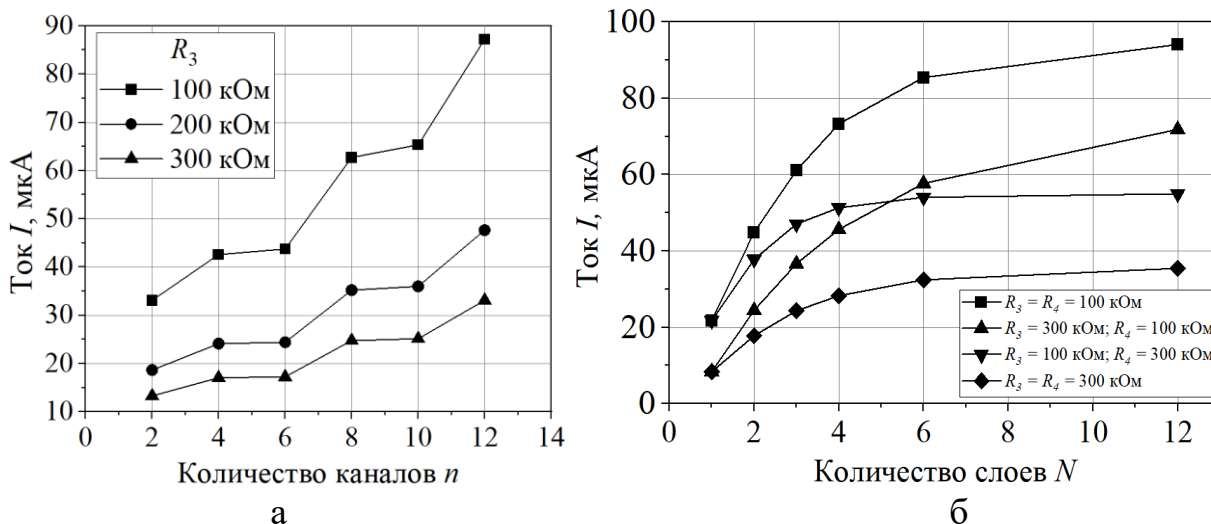
R_1 – сопротивление токопроводящих каналов из металлического контакта в первый поверхностный слой пленки; R_2 – сопротивление материала кристаллического зерна; R_3 – сопротивление межзеренного барьера; R_4 – сопротивление межслойного барьера

Рисунок 5 – Слоистая пленочная структура с межзеренными и межслойными границами и ее эквивалентная электрическая схема

Расчет токов, протекающих через элементы предложенной эквивалентной схемы, осуществляли в программном комплексе Micro-Cap 12. При этом, опираясь на оценки электрических свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур, в том числе и для $g\text{-C}_3\text{N}_4$, принимали $R_1 = 0,01$ Ом, $R_2 = 10$ кОм. Количество каналов проводимости n с сопротивлением R_1 между металлическим контактом и пленкой изменяли от 2 до 12. Для оценки роли межзеренных и межслойных барьеров R_3 и R_4 задавали равными 100, 200 и 300 кОм в сочетаниях, обеспечивающих $R_3 < R_4$, $R_3 = R_4$ или $R_3 > R_4$. Количество межзеренных границ в одном слое между двумя поверхностными контактами принимали равным 14, а количество слоев N в пленке изменяли от 1 до 12. Расчеты выполнены для фиксированного постоянного напряжения величиной 10 В между двумя поверхностными контактами при протекании тока в плоскости пленки или между поверхностным контактом и проводящей подложкой при протекании тока перпендикулярно плоскости пленки.

Расчетами в рамках предложенной резисторной модели установлено, что в пленках, состоящих из двумерных слоев, образованных нанокристаллическими зернами полупроводника наибольшую плотность тока следует ожидать на периферии контактов к ним. В этой связи контакты круглой формы или, по крайней мере, со скругленными краями, являются наиболее предпочтительными для практического использования. Величины же токов и их распределение по объему таких пленок существенно зависят от их зернистости, количества слоев и электронных свойств межзеренных и межслойных потенциальных барьеров.

Наибольший ток протекает в первом поверхностном слое пленки. Его величина существенно зависит как от межзеренного сопротивления R_3 , так и от количества каналов n , по которым носители заряда попадают из контакта в этот слой – рисунок 6а.



а – ток в первом поверхностном слое четырехслойной пленки; б – общий ток в пленке, состоящей из N слоев

Рисунок 6 – Величина продольного тока, протекающего в многослойной пленке, в зависимости от количества каналов проводимости n между контактом и первым слоем и количества слоев N при напряжении 10 В и различных значениях сопротивлений барьеров

Поскольку величина n совпадает с количеством кристаллических зерен материала пленки, находящихся под контактом, сделан вывод о том, что зернистость пленки является важным фактором, контролирующим ток в поверхностном слое.

В слоях, лежащих под поверхностным слоем, величины протекающих токов уменьшаются в несколько раз. Тем не менее, по мере увеличения количества этих слоев N общий ток возрастает и достигает насыщения при $N = 6 - 12$, как это показано на рисунке 6б.

Величина тока, протекающего перпендикулярно плоскости пленки при приложении напряжения между поверхностным контактом и токопроводящей подложкой, контролируется исключительно величиной межслойного сопротивления R_4 и уменьшается с увеличением количества слоев.

На основе детализированной резисторной эквивалентной электрической схемы многослойной пленки разработана ее меристорная модель. В ней учет мемристорного эффекта осуществлен заменой резисторов, соответствующих внутрислойным межзеренным и межслойным границам, на мемристоры с гистерезисом ВАХ. Для расчетов была выбрана одномерная модель мемристора с жестким переключением. Представление барьеров в виде нелинейных элементов в эквивалентной схеме позволило сделать следующий шаг в предсказании и понимании статических электрических свойств таких структур. В программном комплексе Micro-Cap 12 были промоделированы многослойные структуры с количеством слоев от 3 до 9 и количеством кристаллических зерен в слое 15 – 30.

Расчетами установлено, что петлеобразный вид рассчитанных ВАХ, хотя и является типичным для мемристорных структур, существенно отличается от ВАХ отдельного мемристора. Переключение всей структуры из высокоомного в

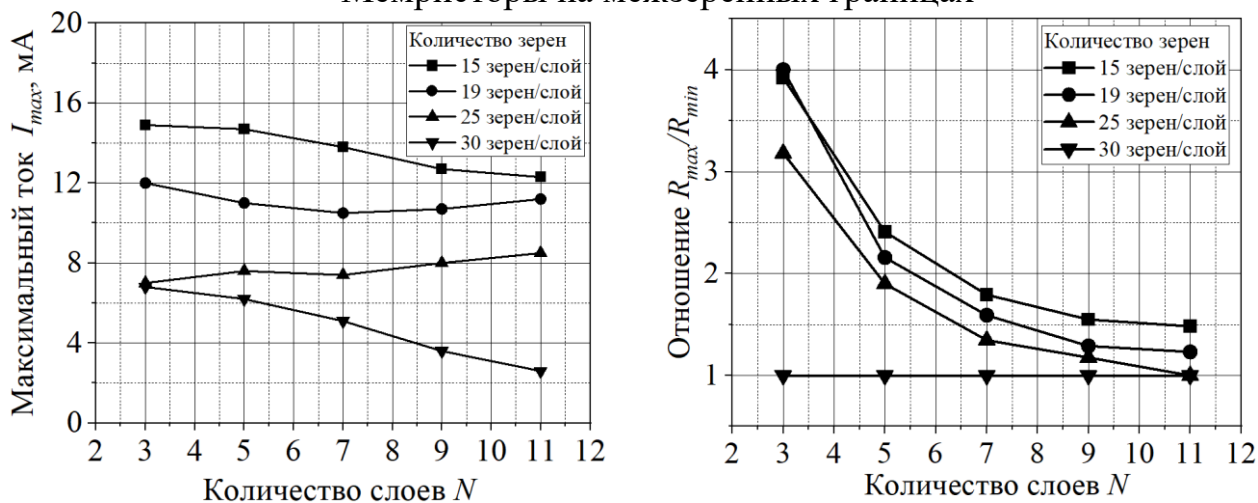
низкоомное состояние происходит при более высоком внешнем приложенном напряжении, составляющем 7 – 10 В, в сравнении с порядка 2 В для одного мемристора. Максимальный ток I_{max} , протекающий через многослойную структуру, и ширина петли, характеризуемая отношением сопротивлений R_{max}/R_{min} , которую рассчитывали по токам, соответствующим высокоомному и низкоомному состояниям при 5 В, зависят от количества кристаллических зерен и количества слоев, как это показано на рисунке 7.

При включении мемристоров на межзеренных границах I_{max} для различных сочетаний числа слоев N и числа зерен в слое n , изменяется перемененно. При малом (15) и большом (30) количестве зерен в слое ток монотонно снижается с увеличением числа слоев, хотя между этими значениями наблюдается незначительный рост. Это объясняется конкурирующим влиянием параллельных токопроводящих каналов, число которых растёт с увеличением количества слоев, и соответственно увеличением последовательно включенных сопротивлений. Отношение R_{max}/R_{min} монотонно снижается с увеличением и N , и n . При $n = 30$ оно становится равным 1 (полное отсутствие петли на ВАХ), индицируя полное исчезновение мемристорного эффекта в многослойной структуре. К этому результату, как к асимптоте, стремятся и отношения R_{max}/R_{min} при меньших количествах зерен в слое. Это свидетельствует об определяющей роли омических сопротивлений в общем протекающем токе.

Наличие мемристорного переключения сопротивления на межслойных границах характеризуется бóльшими, чем в предыдущем случае, I_{max} . Это объяснимо меньшими величинами мемристорных сопротивлений, использованных в расчетах, чтобы учесть то, что площадь межслойных границ больше площади межзеренных границ. Изменяется и характер зависимостей I_{max} и R_{max}/R_{min} от количества слоев при различном количестве зерен в слое. Они приобретают характерные максимумы для пленок, состоящих из 7 – 9 слоев.

Немонотонный характер этих зависимостей объяснен конкуренцией между последовательно соединенными и параллельными каналами проводимости в многослойной структуре. Увеличение количества параллельно включенных каналов при увеличении количества слоев ведет к возрастанию максимального тока и тем большему, чем меньше количество зерен в каждом слое. По достижении определенного количества слоев – в наших расчетах это 7 – 9, основную ограничивающую ток роль начинают приобретать последовательно соединенные сопротивления мемристоров, включенных между слоями. Далее максимальный ток I_{max} и отношение R_{max}/R_{min} приобретают тенденцию к снижению. При этом в исследованном диапазоне изменения количества слоев и зерен в слое отношение R_{max}/R_{min} хотя и снижается, но своего асимптотического значения равного 1 не достигает. Эти же закономерности доминируют и в структурах с мемристорным переключением сопротивления одновременно на межзеренных и межслойных границах.

Мемристоры на межзеренных границах



Мемристоры на межслойных границах

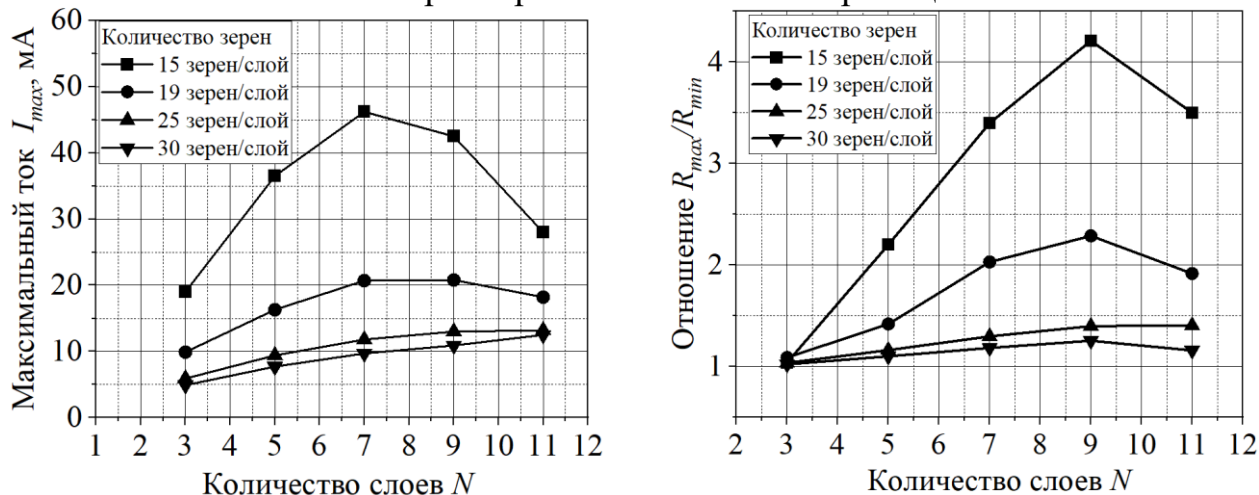


Рисунок 7 – Максимальный продольный ток I_{max} и отношение R_{max}/R_{min} в многослойных пленочных структурах в зависимости расположения мемристорных элементов, а также от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое

Обобщение результатов проведенного моделирования показывает, что электропроводящие свойства слоистых пленочных структур определяются не только количеством слоев и токопроводящих кристаллических зерен в каждом слое, но и электронными свойствами межзеренных границ, что особенно актуально для структур с нанометровыми размерами. Предложенные эквивалентные электрические схемы позволяют моделировать влияние этих факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработанный процесс скоростного химического осаждения пленок графитоподобного нитрида углерода из паровой (газовой) фазы при атмосферном давлении с использованием паров меламина позволяет формировать пленки из этого материала на поверхностях полупроводниковых (кремний), проводящих (сильнолегированный кремний, алюминий) и изолирующих (оксиды кремния и алюминия, стекло) подложек при температурах 500 – 620 °С в течение 3 – 10 мин, обеспечивая при этом толщину осажденных пленок в диапазоне от 35 нм до 1200 нм выбором температурно-временного режима осаждения и используя дополнительную термообработку уже сформированных пленок [1–А; 4–А].

2. 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 [1–А; 4–А].

3. 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 [1–А; 4–А; 5–А; 7–А].

4. 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–А; 6–А; 8–А; 10–А].

5. Предложена 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-C₃N₄ 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-C₃N₄, равное 80 кОм·см для состояния с высокой проводимостью и 100 кОм·см для состояния с низкой проводимостью; продольное удельное сопротивление равное 4000 – 4500 кОм·см; величины потенциальных барьеров между слоями – 0,18 – 0,22 эВ, и между кристаллитами

в каждом слое – 0,79 – 1,00 эВ, в предположении термоэлектронного механизма проводимости этого материала [2–А; 3–А; 6–А; 8–А; 10–А].

6. Обнаружено влияние диэлектрических пленок из SiO_2 и Al_2O_3 , находящихся под пленочными структурами на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$, на их зарядовые свойства, состоящие в том, что SiO_2 , в отличие от Al_2O_3 , 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 SiO_2 встроенного положительного заряда [4–А; 9–А].

7. Рассчитанная по экспериментальным вольт-фарадным характеристикам низкочастотная диэлектрическая проницаемость $g\text{-C}_3\text{N}_4$ при комнатной температуре составляет 14, что подтверждает данные других исследователей [4–А].

8. 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 [2–А].

9. Замена в разработанной детализированной резисторной модели омических резисторов, описывающих протекание тока через межзеренные и межслойные барьеры, на нелинейные мемристорные элементы показала, что петлеобразный мемристорный вид вольт-амперных характеристик постепенно трансформируется в линейную омическую зависимость общего тока от величины приложенного внешнего напряжения по мере увеличения количества слоев и количества зерен в слое многослойной пленочной структуры. При этом отмечено, что существует определенное сочетание количества слоев и зерен в слое, обеспечивающее максимальные значения протекающего тока и отношения сопротивлений, характеризующих “выключенное” и “включенное” состояние всей структуры [3–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенная методика скоростного химического осаждения пленок графитоподобного нитрида углерода, обладая простотой реализации и экономичностью по сравнению с известными методами, открывает новые возможности для применения этого материала в микро- и наноэлектронике оптоэлектронике, фотонике [1–А].

Установленные свойства пленочного графитоподобного нитрида углерода – кристаллическая структура, атомарный состав, а также электропроводящие и зарядовые свойства пленочных структур на его основе и их зависимости от условий формирования, наряду с предложенными моделями, рекомендуются к использованию при разработке конструкций и технологии изготовления

интегральных элементов электронной и оптической обработки информации [1–А, 6–А, 7–А].

Научные результаты выполненных исследований используются при подготовке инженеров по специальностям «Микро- и наноэлектронные технологии и системы», «Квантовые информационные системы» «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре микро- и наноэлектроники (Акт внедрения приложен к диссертации), рекомендуются также для использования в других университетах и научных центрах, ведущих разработки и выполняющих подготовку специалистов в области нанотехнологий и наноматериалов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях в соответствии с требованиями п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. 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).

2–А. Фам, В. Т. Резисторная модель слоистых пленочных структур / В. Т. Фам, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 14–20.

3–А. Мемристорный эффект в слоистых пленочных структурах g-C₃N₄ / В. Т. Фам, С. Е. Максимов, Е. Б. Чубенко, А. Л. Данилюк, Д. А. Подрябинкин, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 5–13.

4–А. Емкостные свойства пленочных структур из графитоподобного нитрида углерода / В. Т. Фам, С. Е. Максимов, Е. А. Уткина, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 6. – С. 5–13.

Материалы научных конференций

5–А. Фам, В. Т. Генерация светом и перенос носителей заряда в графитоподобном нитриде углерода / В. Т. Фам, Д. А. Подрябинкин, А. Л. Данилюк // Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах : Материалы XII Межд. научн. конф., Минск, 21-23 сентября 2022 г. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2022. – С. 256–261.

6–А. Фам, В. Т. Вольтамперные характеристики структур из многослойных пленок графитоподобного нитрида углерода / В. Т. Фам, К. Д. Буй // Радиотехника и электроника : Материалы докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 16-18 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 10–13.

7–А. Буй, К. Д. Влияния концентрации меламин на оптические свойства синтезированных CVD-подобным методом тонких пленок графитоподобного нитрида углерода / Буй К. Д., Фам В. Т. // Радиотехника и электроника : Материалы докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 16-18 апреля 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2022. – С. 24–28.

8–А. Фам, В. Т. Гистерезис вольтамперных характеристик пленочных структур g-C₃N₄ / В. Т. Фам, С. Е. Максимов // Радиотехника и электроника : Материалы докладов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 24-26 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2023. – С. 167–168.

9–А. Вольт-фарадные характеристики и диэлектрическая проницаемость пленок g-C₃N₄ / В. Т. Фам, С. Е. Максимов, Х. Т. Динь, Ч. Х. Нгуен, Д. Т. Нгуен // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов

учреждения образования БГУИР : материалы конференции, Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: В. Р. Стемпицкий [и др.]. – Минск, 2024. – С. 45–48.

10–А. Потенциальные барьеры на границах кристаллитов в слоистом $g\text{-C}_3\text{N}_4$ / В. Т. Фам, С. Е. Максимов, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // Материалы и структуры современной электроники : Материалы XI Междунар. науч. конф., Минск, 16-18 окт. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 556–561.



РЭЗІЮМЭ
Фам Ван Тунг

Фарміраванне, электраправодныя і зарадавыя ўласцівасці плёнак нанаструктураванага графітападобнага нітрыду вугляроду

Ключавыя словы: графітападобны нітрыд вугляроду, хімічнае асаджэнне з газавай фазы, плёначная структура, вольт-амперная характарыстыка, вольт-фарадная характарыстыка, мемрыстар, удзельнае супраціўленне, дыэлектрычная пранікальнасць, мадэляванне.

Мэта работы: распрацоўка метаду хуткаснага хімічнага асаджэння плёнак нанаструктураванага графітападобнага нітрыду вугляроду з газавай фазы з працягласцю менш за 10 мін, эксперыментальнае ўстанаўленне і мадэльнае апісанне заканамернасцей электраправоднасці і праяўлення зарадавых уласцівасцей гэтага матэрыялу ў плёначных структурах на яго аснове.

Метады даследавання: сканіруючая электронная мікраскапія, энергадысперсійная рэнтгенаўская спектраскапія, рэнтгенаўская дыфрактаметрыя, аптычная спектраскапія, вымярэнне вольт-амперных і вольт-фарадных характарыстык, камп'ютарнае мадэляванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: эксперыментальна ўстаноўлена, што сінтэз і асаджэнне графітападобнага нітрыду вугляроду ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) на падложку магчымы пры хуткасці нагрэву да $4\text{--}6\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ і тэмпературы $500\text{--}620\text{ }^\circ\text{C}$, што дазваляе ствараць слаістыя плёнкі таўшчынёй $35\text{--}1200\text{ нм}$ з паўправадніковымі ўласцівасцямі. Выяўлены і даследаваны мемрыстарны эфект у плёначных структурах з гэтым матэрыялам. Устаноўлена, што яго праяўленне залежыць ад напрамку праходжання току, таўшчыні плёнкі, матэрыялу падложкі і наяўнасці падслоя з дыэлектрыка – SiO_2 або Al_2O_3 . Прапанаваныя абагульненая рэзістарная мадэль і эквівалентная электрычная схема для аналізу падоўжнага і папярочнага электрычнага супраціўлення даследуемага матэрыялу, якія дазволілі ацаніць патэнцыйныя бар'еры паміж пластамі і крышталітамі ўнутры пластоў. Выяўлены ўплыў дыэлектрычнага падслоя на ёмістасныя характарыстыкі плёначных структур на аснове $g\text{-C}_3\text{N}_4$, растлумачаны наяўнасцю ўбудаванага зараду ў SiO_2 .

Рэкамендацыі па выкарыстанні: метады хуткаснага хімічнага асаджэння плёнак $g\text{-C}_3\text{N}_4$ і ўстанаўлення іх электраправодныя і зарадавыя ўласцівасці адкрываюць новыя магчымасці для прымянення гэтага матэрыялу ў мікра- і нанаэлектронных прыладах апрацоўкі інфармацыі. Устаноўленыя заканамернасці і прапанаваныя мадэлі рэкамендуюцца для выкарыстання ў навуковых арганізацыях і ўніверсітэтах пры падрыхтоўцы спецыялістаў у галіне сучасных нанатэхналогій і нанаматэрыялаў.

Галіна прымянення: нанатэхналогіі, мікра- і нанаэлектроніка.

РЕЗЮМЕ

Фам Ван Тунг

Формирование, электропроводящие и зарядовые свойства пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, химическое осаждение из газовой фазы, пленочная структура, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, мемристор, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, моделирование.

Цель работы: разработка метода скоростного химического осаждения пленок наноструктурированного графитоподобного нитрида углерода из газовой фазы с продолжительностью менее 10 мин, экспериментальное установление и модельное описание закономерностей электропроводности и проявления зарядовых свойств этого материала в пленочных структурах на его основе.

Методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгеновская дифрактометрия, оптическая спектроскопия, измерение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, компьютерное моделирование.

Полученные результаты и их новизна: экспериментально установлено, что синтез и осаждение графитоподобного нитрида углерода ($g-C_3N_4$) на подложку возможны при скорости нагрева до 4–6 °C/с и температуре 500–620 °C, что позволяет создавать слоистые пленки толщиной 35–1200 нм с полупроводниковыми свойствами. Обнаружен и исследован мемристорный эффект в пленочных структурах с этим материалом. Установлено, что его проявление зависит от направления протекания тока, толщины пленки, материала подложки и наличия подслоя из диэлектрика – SiO_2 или Al_2O_3 . Предложены обобщенная резисторная модель и эквивалентная электрическая схема для анализа продольного и поперечного электрических сопротивлений исследуемого материала, позволившие оценить потенциальные барьеры между слоями и кристаллитами внутри слоев. Выявлено влияние диэлектрического подслоя на ёмкостные характеристики пленочных структур на основе $g-C_3N_4$, объясненное наличием встроенного заряда в SiO_2 .

Рекомендации по использованию: метод скоростного химического осаждения пленок $g-C_3N_4$ и установленные их электропроводящие и зарядовые свойства открывают новые возможности для применения этого материала в микро- и нанoeлектронных устройствах обработки информации. Установленные закономерности и предложенные модели рекомендуются для использования в научных организациях и университетах при подготовке специалистов в области современных нанотехнологий и наноматериалов.

Области применения: нанотехнологии, микро- и нанoeлектроника.

RESUME

Pham Van Tung

Formation, conductive and charge properties of nanostructured graphitic carbon nitride films

Keywords: graphitic carbon nitride, chemical vapor deposition, thin film structure, current-voltage characteristics, voltage-capacitance characteristics, memristor, resistivity, dielectric permittivity, modeling.

The purpose of the work: development of a rapid chemical vapor deposition technique for producing nanostructured graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) films with the processing time of less than 10 min. Experimental determination and modeling of the electrical conductivity and charge behavior of this material in thin film structures.

Research methods and equipment used: scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction, optical spectroscopy, current-voltage and voltage-capacitance measurements, computer modeling.

The results obtained and their novelty: experimental demonstration that synthesis and deposition of g-C₃N₄ films on substrates are feasible at a heating rate of 4–6 °C/s and the temperature range of 500–620 °C. This process enables formation of layered films with a thicknesses ranging from 35 to 1200 nm with semiconductor properties. The memristor effect in the film structures utilizing this material was identified and studied. The effect was found to depend on the current direction, film thickness, substrate material, and the presence of a dielectric sublayer such as SiO₂ or Al₂O₃. A generalized resistor model and equivalent electrical circuit were proposed for analysis longitudinal and transverse electrical resistances of the material, enabling an estimation of the potential barriers between layers and crystallites. The influence of the dielectric sublayer on the capacitive properties of g-C₃N₄-based film structures was revealed to be attributed to the presence of built-in charge in SiO₂.

Recommendations for use: the proposed rapid chemical vapor deposition of g-C₃N₄ films and the established conductive and charge properties pave the way for applying this material in micro- and nanoelectronic devices for information processing. The identified patterns and proposed models are recommended for a use in research institutions and universities to train specialists in cutting-edge nanotechnologies and nanomaterials.

Application field: nanotechnology, microelectronics and nanoelectronics.

Научное издание

**Фам
Ван Тунг**

**ФОРМИРОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ И ЗАРЯДОВЫЕ
СВОЙСТВА ПЛЕНОК НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы
(материалы для электроники и фотоники)**

Подписано в печать 04.02.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 17.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск