

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Прокопьев Айсен Русланович

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ
УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНOK, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
ОСАЖДЕНИЯ В ПЛАЗМЕ CH_4 И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ
ТЕРМООБРАБОТКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»

Научный руководитель:

Неустроев Ефим Петрович

кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра «Радиофизика и электронные системы» Физико-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Официальные оппоненты:

Клопотов Анатолий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, кафедра прикладной механики и материаловедения, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Иванов Юрий Федорович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится «22» ноября 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.03
доктор технических наук

A handwritten signature in blue ink, located to the right of the text identifying the secretary. The signature is stylized and appears to be 'Gyngazov'.

Гынгазов С.А.

Актуальность работы. Упорядоченные и неупорядоченные формы углерода (C) характеризуются уникальным свойством – полиморфизмом. Данное свойство позволяет пребывать атомам углерода в различных состояниях sp^n -гибридизации и обуславливает возможность получения разнообразных материалов как в кристаллическом, так и в аморфном исполнении с заранее заданными свойствами [1]. Развитию исследований подобных структур послужило экспериментальное получение сверхтонкой гексагональной формы углерода из графита – графена в 2004 году А. Геймом и К. Новоселовым. В графене атомы углерода находятся в состоянии sp^2 -гибридизации (графитоподобная фаза) и характеризуются высокими показателями электропроводности [2, 3]. Материалы с преобладанием частиц углерода в состоянии sp^3 -гибридизации (алмазоподобная фаза) характеризуются низкой электропроводностью [4]. Преобладание sp^2 -гибридизированных атомов углерода в углеродных наноматериалах позволяет применять их при создании элементной базы во многих электронных устройствах нового поколения. За счет переключения механизма проводимости под воздействием внешних факторов (значительные температурные сдвиги, влияние электромагнитного поля и др.) их возможно использовать в устройствах, эксплуатируемых при отрицательных температурах [4]. Тонкие углеродные покрытия с повышенным соотношением sp^3/sp^2 -гибридизированных атомов углерода перспективны для применения в качестве электропроводящих покрытий и светочувствительных материалов [3]. Разработка методики синтеза материалов, обладающих одновременно алмазоподобной и графитоподобной фазами, является весьма актуальной.

Углеродные наноматериалы с различными кристаллическими конфигурациями и с многообразием собственных электрических и оптических свойств могут быть получены методами осаждения из газовой (паровой) фазы (CVD). В качестве источников углерода используют такие соединения, как метан, пропан, ацетилен [5]. Методы осаждения требуют наличия высоких температур (свыше 1000 °C) и необходимости переноса полученных пленок на твердотельные подложки [6]. Для исключения этих недостатков используют метод PECVD (усиленное плазмой осаждение из газовой фазы). Сдерживающим фактором метода является то, что непосредственное осаждение из плазмы способствует неконтролируемому изменению структуры за счет косвенного влияния плазменного поля и добавочно характеризуется высокой степенью дефектообразования [7].

Степень разработанности научного исследования. Первые работы, посвященные разработке методики синтеза, а также исследованию различных характеристик пленочных материалов, включая DLC- и GLC-покрытия, начались с 80-х годов прошлого столетия [8]. Получение двумерных углеродных наноматериалов в 2004 г. вызвало большой интерес исследователей всего мира к воспроизводимым методам синтеза тонких углеродных структур. Основные результаты представлены в работах [4–9]. До настоящего времени проблема экономичного, безопасного и контролируемого способа синтеза тонкопленочных углеродных пленок полностью не решена.

В диссертационной работе предложена методика синтеза тонких углеродных пленок, сформированных плазменным осаждением и последующим отжигом в виде двух независимых поэтапных процессов. На первом этапе проводилось осаждение атомов углерода в плазме метана, в ходе которого были получены аморфные гидрогенизированные углеродные пленки. На втором этапе проводилась термообработка в атмосфере инертного газа (аргона) при температурах от 650 °С до 800 °С с целью кристаллизации пленок с различной степенью соотношения гибридных фаз (sp^2/sp^3) углерода.

Целью диссертационной работы являются разработка методики синтеза и исследование свойств сформированных углеродных пленок.

Для достижения цели решены **следующие задачи**:

1. Разработана методика синтеза тонких углеродных пленок на твердотельной подложке.
2. Исследованы морфологии поверхности углеродных пленок, сформированных при различных параметрах методики.
3. Изучены влияния параметров процесса осаждения углерода в плазме метана и термической обработки на электрические и оптические свойства формируемых пленок.

Объектом исследования в диссертационной работе являются углеродные пленки, сформированные на твердотельных подложках методом плазменного осаждения (до 200 Вт) в метане (30 см³/мин) с последующей термообработкой в атмосфере аргона от 650 °С до 800 °С.

Предметом исследования являются методика формирования и определение электрических, оптических свойств тонких (до 150 нм) углеродных пленок.

Методология и методы исследования включает в себя формирование исходных аморфных углеродных пленок на поверхности твердотельных подложек осаждением в плазме метана и последующую термообработку в атмосфере аргона при температурах до 800 °С. Для исследований полученных пленок использовалась следующая совокупность методов: атомно-силовая (АСМ) и сканирующая электронная (СЭМ) микроскопия, рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (РЭДС), спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), ультрафиолетовая (УФ) и инфракрасная (ИК) спектроскопия, а также методы исследования электрических свойств.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Разработана методика получения углеродных пленок последовательным двухэтапным синтезом со следующими условиями: осаждение атомов углерода (при $T < 50$ °С) в индуктивно-связанной плазме (150-200 Вт) метана при потоке $30 \text{ см}^3/\text{мин}$ с последующей термообработкой при температурах от 650 °С до 800 °С в атмосфере аргона.

Впервые показано, что пленки, сформированные предложенной методикой, после термической обработки от 650 °С до 700 °С имеют при низких температурах (меньше, чем -70 °С) механизм прыжковой проводимости в соответствии с законом Эфроса-Шкловского для двумерных систем.

Использование температуры термообработки 700 °С в процессе синтеза позволяет получать углеродные пленки на подложках Si с максимальной фоточувствительностью 55 мА/Вт.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Новая методика синтеза (осаждение в плазме CH_4 и последующая термообработка) углеродных пленок позволяет получать структуры толщиной до 150 нм непосредственно на поверхности твердотельных подложек.
2. Термообработка в диапазоне от 650 °С до 750 °С аморфных углеродных пленок, осажденных на твердотельные подложки, приводит к формированию нанокристаллов преимущественно графитовой структуры с латеральными размерами от 5 до 20 нм.
3. Углеродные пленки, сформированные на твердотельных подложках, имеют линейную зависимость логарифма электрического сопротивления от

температуры как $1/T$ в диапазоне температур от 200 °С до -70 °С и зависимость сопротивления как $1/T^{1/2}$ в диапазоне от -70 °С до -193 °С.

4. Из углеродных пленок, осажденных на твердотельные подложки, возможно создание фотосенсоров, чувствительных в оптическом диапазоне.

Научная и практическая значимость результатов работы:

Разработана простая эффективная методика формирования тонких углеродных пленок на твердотельной подложке без использования катализаторов. Методика позволяет контролировать толщину пленок, изменяя время осаждения и мощность плазмы, а также температуру и длительность термообработки. Варьируя температуру и длительность обработки можно оказывать влияние на электрическое сопротивление от состояния изолятора до полупроводника (с сопротивлением единицы кОм на квадрат) за счет изменения соотношения sp^2/sp^3 -фаз в структуре материала.

Полученные в рамках диссертационной работы результаты могут быть использованы на предприятиях и в организациях, ведущих разработки в области углеродной электроники и оптоэлектроники. Тонкие углеродные пленки могут использоваться в качестве изолирующих материалов, электропроводящих контактов, сенсоров освещения, а также датчиков температуры.

Достоверность результатов подтверждается многократной повторяемостью и непротиворечивостью с результатами работ других исследователей в данной области, использованием современных и независимых между собой методик/методов исследования с применением высокоточных аттестованных оборудования, квалифицированной апробацией на всероссийских и международных конференциях, публикацией в российских и зарубежных рецензируемых изданиях, в том числе рекомендованных ВАК.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «Сильно коррелированные двумерные системы: от теории к практике» (2018 г.), международной научно-практической конференции «Графен: Молекула и 2D кристалл», г. Новосибирск (2019 г.); международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры», г. Тамбов, 2019 г., международной научно-практической конференции «Достижение и применение физики плазмы», г. Санкт-Петербург, 2019 г., всероссийском инженерном конкурсе ВИК-2019, г. Симферополь, 2019 г., международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы

развития фундаментальных наук», г. Томск, 21–24 апреля 2020 г., IX международной конференции по математическому моделированию, посвященной 75-летию Владимира Николаевича Врагова, г. Якутск, 27 июля–01 августа 2020 г., IX Евразийском симпозиуме по проблемам прочности в условиях низких климатических температур», посвященном 50-летию образования ИФТПС СО РАН, 14–17 сентября 2020 г., г. Якутск., второй международной научно-практической конференции "Сильно коррелированные двумерные системы: от теории к практике", г. Казань, 5–7 июля 2021 г., IV международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение» (GRS-2021), 7–8 октября, 2021 г., V международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Новые материалы и технологии в условиях Арктики», посвященной 125-летию нобелевского лауреата Н.Н. Семенова и 100-летию образования Якутской АССР, 14–18 июня 2022 г., г. Якутск., конференции "Молодежная конференция ФИЦ СО РАН, приуроченной к Десятилетию науки и технологий", 9 декабря 2022 г.

Связь работы с научными программами: Грант РФФИ «Аспиранты» №19-32-90333, 2019-2021 гг.; Государственная стипендия Министерства образования и науки РС (Я), 2021 г.; Грант Главы Республики Саха (Якутия) «Получение углеродсодержащих пленочных покрытий, полученных осаждением в плазме метана», 2022 г.; Грант Министерства науки и образования Российской Федерации FSRG-2022-0011, 2022-2024 гг.; Грант РНФ № 23-79-00065 «Получение и комплексное исследование гибридных наносистем на основе контакта переходных металлов и двумерных материалов для разработки физико-технологических основ элементной базы спиновой электроники», 2023–2026 гг.

Личный вклад автора. Основные результаты настоящего исследования были получены автором. Получение тонких углеродных пленок методом плазменного осаждения атомов углерода с последующей термообработкой, а также исследования, проводимые на установках, проводились соискателем лично. Обработка результатов исследования, обсуждение, постановка цели и задач, выбор литературы, подготовка и публикация научных статей в рейтинговых изданиях были проделаны вместе с научным руководителем.

Публикации по теме исследования. По теме диссертационной работы было издано 20 печатных работ, 8 из них индексируются в рецензируемых отечественных и международных базах данных, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных

результатов диссертации (ВАК, БД Web of Science, Scopus). Имеется патент РФ на изобретение RU 2794042 C1 «Способ формирования углеродных пленок плазменным осаждением атомов углерода в метане». Имеется свидетельство о государственной регистрации базы данных RU2022622083 «База данных свойств и параметров углеродных структур (графен, оксид графена, графит, нанографит, алмазоподобный углерод)». Имеется акт внедрения в образовательный процесс на кафедре «Радиофизика и электронные системы» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (см. в разделе «Приложения»). На основании результатов диссертационного исследования было издано учебное пособие для учащихся 10-х и 11-х классов специализированных учебно-научных центров (СУНЦ), общеобразовательных школ, учителей школ «Основы наноэлектроники. Физика».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, выводов и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 53 рисунка, 24 таблицы, 189 библиографических источников.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященных исследованиям структуры и свойств основных аллотропных модификаций углерода. Рассмотрены методы получения углеродных пленок химическим и плазмохимическим осаждениями. Приведены механизмы формирования углеродных пленок, основные характеристики структур, а также электрические и оптические свойства материалов, полученные осаждением в метановой плазме, влияние термообработки на аморфный углерод.

Во второй главе описана экспериментальная методика создания исследуемых в работе углеродных пленок. Методика состоит из двух последовательных процессов, включающая: 1) осаждение атомов углерода (при $T < 50$ °С) в индуктивно-связанной плазме метана (чистота 99.999 %) и 2) термообработку при температурах от 650 °С до 800 °С длительностью от 15 до 45 мин в атмосфере аргона. Мощность радиочастотного (13.56 МГц) источника плазмы выбрана в диапазоне от 150 до 200 Вт. Время экспозиции в плазме – от 6 до 12 мин при давлении около 10^{-3} мбар и скорости потока вводимого газа CH_4 – 30 см³/мин. В таблице 1 приведены условия формирования углеродных пленок на различных подложках. Кроме того, приведены основные

параметры использованных в работе материалов и измерительных приборов. В конце главы прилагается анализ технико-экономического обоснования методики синтеза тонких углеродных пленок.

Таблица 1 – Условия синтеза тонких углеродных пленок

| Тип подложки | Мощность источника плазмы, Вт | Время осаждения в плазме, мин | Температура термообработки, °С | Время термообработки, мин |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| SiO ₂ | 150, 200 | до 12 | 650, 700, 750, 800 | 15, 30 и 45 |
| Si | 200 | до 10 | 650, 700, 750, 800 | 15, 30 и 45 |
| Кварц | 200 | 6 или 9 | 650, 700, 750 | 30 и 45 |

В третьей главе представлены результаты исследования морфологии синтезированных углеродных пленок. Из изображений границ раздела пленка/подложка, полученных методом АСМ, оценены толщины пленок (рисунок 1). Толщина пленок зависит от условий второго этапа (отжига) синтеза и составила от 20 до 150 нм. При необходимости толщины пленок могут быть уменьшены травлением в кислородной плазме.

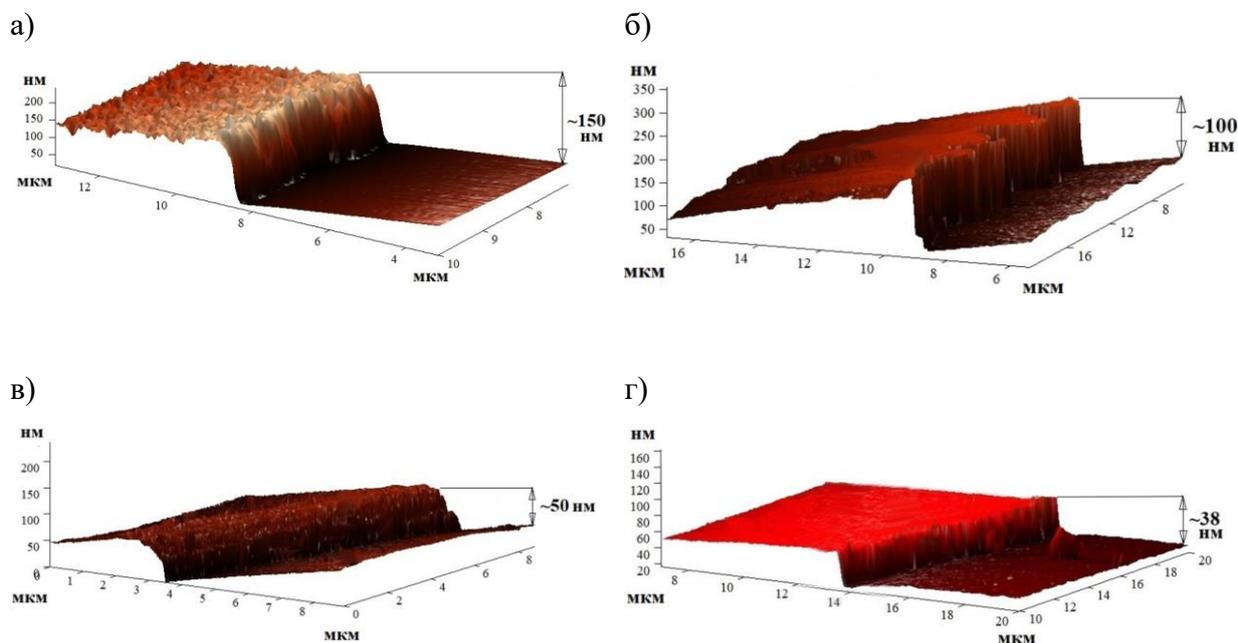
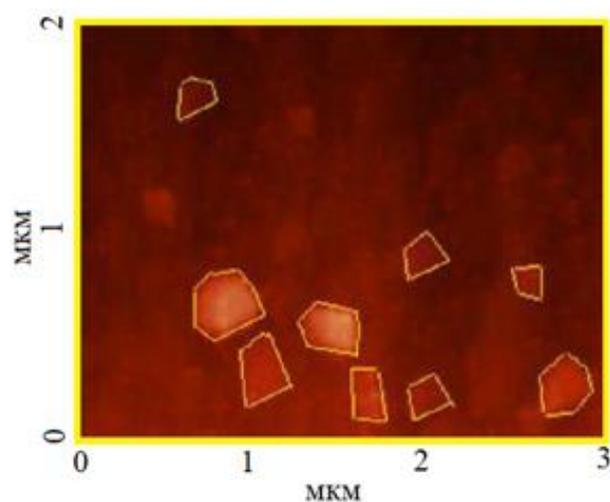


Рисунок 1 а), б), в), г) – 3D-профили сформированных на SiO₂-подложках углеродных пленок после отжига при температурах от 650 °С, 700 °С, 750 °С и 800 °С

соответственно

Исследования поверхности углеродных пленок методами АСМ, СЭМ показало незначительную шероховатость с перепадами по высоте около 3 нм. Вместе с этим, выявлено формирование на поверхности образцов нанокристаллитов размерами от единиц до сотен нм (рисунок 2).

а)



б)

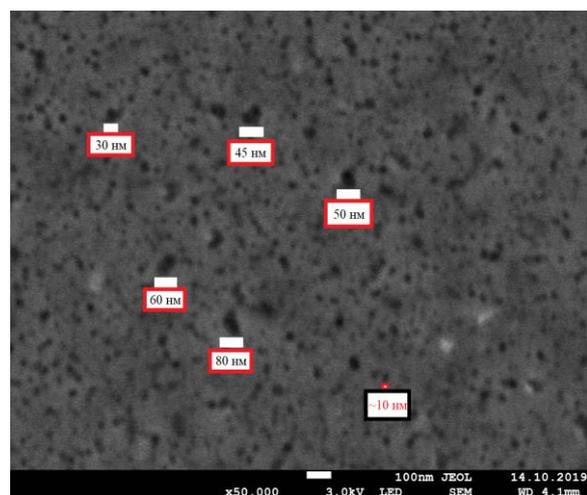


Рисунок 2 – а) АСМ-изображение поверхности сформированной углеродной пленки. Выделены нанокристаллические образования; б) СЭМ-изображение углеродной пленки (Масштаб выделения: 100 нм)

Измерения методом РЭДС показали, что пленки состоят преимущественно из атомов углерода (С – 85-90 %), кислорода (О – 5 %), остальное – соответствует подложке. Присутствие водорода (Н) метод РЭДС не позволяет установить. Оценка содержания Н произведена из спектров коэффициента пропускания ИК-Фурье и КРС. В спектрах ИК-пропускания выявлены полосы, относящиеся к связям водородным связям С-Н_n и О-Н (рисунок 3 а). В спектрах КРС после первого процесса синтеза (осаждение в плазме метана) наблюдается широкая полоса в области частот от 1000 см⁻¹ и выше, соответствующая аморфной гидрогенизированной (а-С:Н) пленке углерода [10]. После термообработки при T ≥ 650 °С происходит рост интенсивности полос D (I_D) и G (I_G), обусловленная формированием кристаллической фазы графитового типа (рисунок 3 в) [10]. Отношения интенсивностей I_D/I_G (рисунок 3 б) изменяется в соответствии с трехступенчатой моделью перехода Феррари и Робертсона от аморфной структуры в

нанокристаллический графит [10]. Показано, что наиболее оптимальной температурой кристаллизации постплазменных а:С-Н пленок является термообработка при 700 °С.

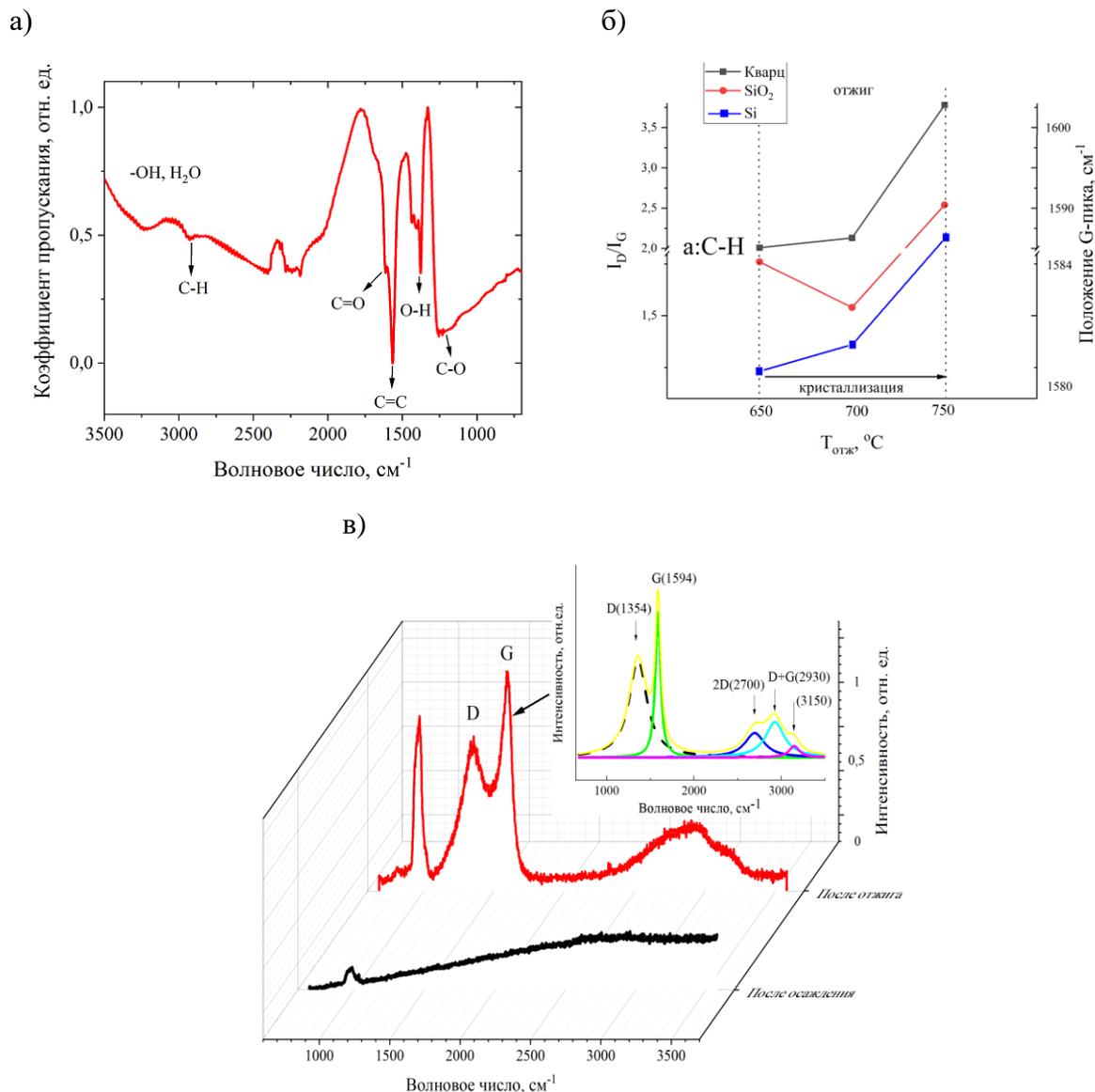


Рисунок 3 – а) Зависимость коэффициента пропускания от волнового числа в углеродных пленках, осажденных в плазме метана (200 Вт, 9 мин) на кварцевую подложку; б) зависимость отношений интегральных интенсивностей основных пиков I_D/I_G углеродных пленок от температуры отжига; в) спектры КРС углеродных пленок: после осаждения в плазме (P = 200 Вт, 12 мин) и после отжига (650 °С, 30 мин). Во вставке: разложение сформированной углеродной пленки по лоренцианам после отжига

Из отношений интегральных интенсивностей пиков D и G оценены латеральные размеры (L_a) sp^2 -нанокристаллитов графита с помощью эмпирической формулы, предложенной в работе [11]:

$$L_a (nm) = (2.4 * 10^{-10}) \lambda^4 \left(\frac{I_D}{I_G}\right)^{-1}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазерного излучения источника (532 нм). Оценки показали, что L_a находятся в пределах от 5 ± 0.5 до 20 ± 2 нм и зависят от типа подложки и условий термообработки.

В четвертой главе диссертации приводятся результаты исследований электрических и оптических свойств синтезированных пленок. Из результатов измерений температурных зависимостей ВАХ, которые имели линейный вид, найдены относительные слоевые сопротивления пленок в диапазоне температур от 80 до 300 К. Обнаружено, что при снижении температуры от комнатной до 80 К сопротивление возрастает до трех порядков, что свойственно прыжковым механизмам проводимости [12]. В главе 4 доказывается, что механизм проводимости углеродных пленок соответствует закону для двумерных систем Эфроса-Шкловского [12]. В области температур от 200 К и выше механизм проводимости определяется преобладанием термоактивационного механизма проводимости.

Для механизма Эфроса-Шкловского проводимость пропорциональна $T^{-1/2}$ и характеристическая температура определяется из следующего выражения [12]:

$$T_o = T_{ES} = \frac{2.8e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 k_B \xi}, \quad (2)$$

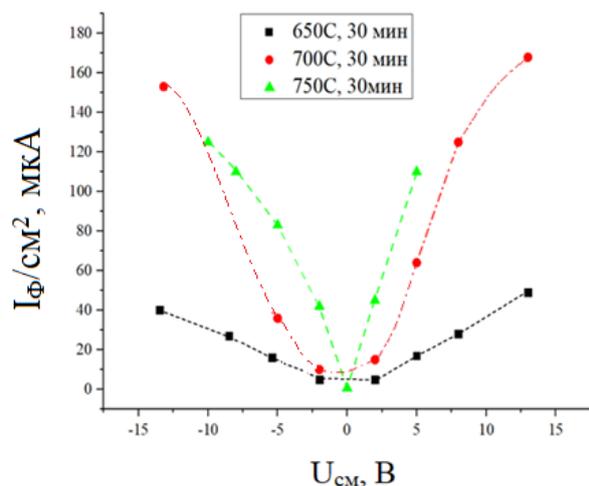
где e – заряд электрона, ϵ – электрическая постоянная, ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость, ξ – длина области локализации волновой функции электрона, соответствующий половине размера нанографитового домена (d). Из формулы (2) оценен d , который составил 2 ± 0.2 нм. Аналогичным образом был оценен размер домена для пленки, сформированной при $T=700$ °С на кварцевой подложке. В этом случае размер нанографитового домена, ответственный за транспорт носителей заряда при низких температурах, был примерно в 5 раз больше, чем для образца, сформированного на SiO_2 -подложке.

Таблица 2 – Размеры нанографитовых доменов

| Материал подложки | ξ , нм | d, нм | Мощность разряда и длительность воздействия плазмы | Температура и длительность отжига |
|-------------------|------------|-------|--|-----------------------------------|
| SiO ₂ | ~0.95 | 2±0.2 | 200 Вт, 9 мин | 650 °С, 30 мин |
| Кварц | ~5.35 | 10±1 | 200 Вт, 6 мин | 700 °С, 30 мин |

Исследования зависимости фототока (I_{Φ}) от напряжения смещения ($U_{см}$), поданных на образец, продемонстрировали фоточувствительность исследуемых пленок. Увеличение $U_{см}$ для всех образцов приводит к росту I_{Φ} (рисунки 4 а и б). Наибольший эффект наблюдается для образцов, сформированных на Si-подложке, в которых фототок достигает единиц мА (рисунок 4 б). Наименьшую чувствительность к освещению проявили образцы на кварцевой подложке.

а)



б)

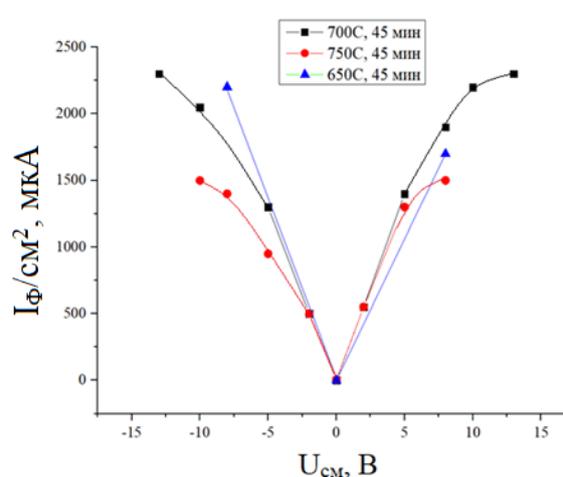


Рисунок 4 – Зависимости $I_{\Phi}(U_{см})$ от T отжига в пленках, сформированных на подложках: а) SiO₂, б) Si

Исследование фотоотклика синтезированных углеродных пленок показало, что увеличение температуры термообработки не вносит заметного вклада на фоточувствительность при использовании Si-подложек (рисунок 4 б). В пленках на SiO₂-подложках наблюдается увеличение I_{Φ} в 4 раза (рисунок 4 а). Из значений I_{Φ} оценены квантовый выход (η) и фоточувствительность (S) исследуемых пленок. Для образцов на SiO₂-подложке η принимает значения от $25 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-3}$; S – от 1 мА/Вт до

4.25 мА/Вт (650 °С, 700 °С соответственно). Для пленок на Si-подложке значения составили около $\eta=0.001$ и $S=55$ мА/Вт при условиях отжига 650 °С, 700 °С.

Закключение. В диссертации исследованы тонкие углеродные пленки, полученные осаждением в плазме метана с последующей термообработкой в атмосфере аргона. В обзорной части работы рассмотрены основные методики синтеза тонких углеродных пленок, особое внимание уделено методам плазменного осаждения. Изучена кристаллизация аморфного углерода при термообработке с различными температурными режимами. Основными результатами практической части диссертационной работы являются:

1. Предложена методика двухэтапного последовательного синтеза наноструктурированных углеродных пленок на твердотельных подложках (Si, SiO₂, кварцевое стекло), включающий 1) осаждение в плазме метана мощностью от 150 до 200 Вт длительностью от 6 до 12 мин, скоростью потока газа CH₄ – 30 см³/мин при давлении в реакционной камере $\sim 10^{-3}$ мбар; 2) термообработку в атмосфере аргона в диапазоне температур от 650 °С до 800 °С длительностью от 15 до 45 мин.
2. Сформированные предложенной методикой углеродные пленки содержат нанокристаллы графита (sp²-кристаллиты) с латеральными размерами sp²-кристаллитов от 5±0.5 до 20±2 нм. Размеры нанокристаллитов зависят в большей степени от температуры термообработки и достигают максимальных размеров при 700–750 °С. Пленки имеют высокую гладкость поверхности, шероховатость которой в среднем составляет $\sim 1,5$ нм.
3. Толщины пленок составляют от 20 до полусотен нанометров и зависят от мощности плазмы и длительности выдержки в ней, а также температуры и длительности термообработки. При использовании других параметров пленки могут не сформироваться из-за преобладания процессов травления в плазме и испарения при термообработке.
4. Сопротивления пленок составляют от единиц кОм до ГОм на квадрат и зависят от температуры и длительности термообработки. При изменении температуры внешней среды образцы, сформированные при T_{отж} от 650 °С до 750 °С, демонстрируют линейную температурную зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры $\ln R(1/T)$ при температурах от -70 °С до +200 °С. Такое поведение сопротивления соответствует

термоактивационному механизму электропроводности. В области низких температур (от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$) зависимость сопротивления от температуры пропорциональна $1/T^{1/2}$, что соответствует прыжковому механизму электропроводности в двумерных структурах (закон Эфроса-Шкловского). Результаты анализа показали, что основной вклад в электрический транспорт носителей заряда вносят домены размерами от $2 (\pm 0.2)$ до $10 (\pm 1)$ нанометров.

5. Установлено, что при использовании температуры термообработки от $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ в процессе синтеза на втором этапе в формируемых пленках наблюдается фотопроводимость при действии освещения в широком спектральном диапазоне (от 400 до 800 нм). Наибольшая фотопроводимость ($\sim 2.2\text{ мА/см}^2$) наблюдается в углеродных пленках, сформированных на кремниевых подложках.
6. Использование упорядоченных твердотельных подложек способствует повышению значений фототоков. Пленки, сформированные на кварцевом стекле, проявляют низкую фотопроводимость ($\sim 0.075\text{ мкА}$). Наибольшая фотопроводимость ($\sim 2.2\text{ мА/см}^2$) наблюдается в углеродных пленках, сформированных на кремниевых подложках.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warner J. H. et al. Graphene: Fundamentals and emergent applications. – Newnes, 2012.
2. Britnell L. et al. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures //Science. – 2012. – Т. 335. – №. 6071. – С. 947-950.
3. Bi H. et al. Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide //Scientific reports. – 2013. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-7.
4. Shelke N. T., Karche B. R. Ultraviolet photosensor based on few layered reduced graphene oxide nanosheets //Applied Surface Science. – 2017. – Т. 418. – С. 374-379.
5. Shavelkina M. et al. Distinctive features of graphene synthesized in a plasma jet created by a DC plasma torch //Materials. – 2020. – Т. 13. – №. 7. – С. 1728.
6. Chugh S. et al. Comparison of graphene growth on arbitrary non-catalytic substrates using low-temperature PECVD //Carbon. – 2015. – Т. 93. – С. 393-399.

7. Cuxart M. G. et al. Inductively coupled remote plasma-enhanced chemical vapor deposition (rPE-CVD) as a versatile route for the deposition of graphene micro- and nanostructures //Carbon. – 2017. – Т. 117. – С. 331-342
8. Nadler M. P., Donovan T. M., Green A. K. Thermal annealing study of carbon films formed by the plasma decomposition of hydrocarbons //Thin Solid Films. – 1984. – Т. 116. – №. 1-3. – С. 241-247.
9. Slobodian O. M. et al. Highly porous carbon films fabricated by magnetron plasma enhanced chemical vapor deposition: Structure, properties and implementation //Applied Surface Science. – 2019. – Т. 496. – С. 143735.
10. Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond //Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2004. – Т. 362. – №. 1824. – С. 2477-2512.
11. Cançado L. G. et al. General equation for the determination of the crystallite size L_a of nanographite by Raman spectroscopy //Applied Physics Letters. – 2006. – Т. 88. – №. 16. – С. 163106.
12. Haque A. et al. Large magnetoresistance and electrical transport properties in reduced graphene oxide thin film //IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Т. 54. – №. 12. – С. 1-9.
13. Шульга Ю. М., Шульга Н. Ю., Пархоменко Ю. Н. Углеродные наноструктуры, восстановленные из оксида графита, как материалы для электродов суперконденсаторов //Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – №. 3. – С. 157-167

СПИСОК ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных Web of Science, Scopus:

1. Neustroev E. P., Burtseva E.K., **Prokopiev A.R.**, Soloviev B.D., Popov V.I., Timofeev V.B. Modification of graphene oxide films by radiofrequency N_2 plasma //Nanotechnology. – 2018. – Т. 29. – №. 14. – С. 144002.

2. Neustroev E. P., **Prokopiev A. R.** Conduction mechanism of nanographite formed by methane plasma deposition and subsequently heat treatment // Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii – 2019. – Vol. 11. – No 3. – P. 315-320.

Научные статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Неустроев Е. П., **Прокопьев А. Р.** Свойства наногрфита, образованного плазменным осаждением и последующей термообработкой //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – №. 11. – С. 629-635.

Патенты, оформленные по результатам исследования:

1. База данных свойств и параметров углеродных структур (графен, оксид графена, графит, наногрфит, алмазоподобный углерод): свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622083 Российская Федерация / **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е.П.; опубл. 18.08.2022.
2. Способ формирования углеродных пленок плазменным осаждением атомов углерода в метане: изобретение РФ, RU 2794042 С1, Российская Федерация / **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е.П.

Статьи в трудах конференций, индексируемых в Web of Science, Scopus:

1. Neustroev E. P., **Prokopiev A.R.**, Popov V.I., Davydova Z.Y., and Semenov S.O. Formation of nanographite flakes on SiO₂ substrate by plasma deposition of carbon and subsequent annealing //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2179. – №. 1. – С. 020019.
2. Neustroev, E. P., **Prokopiev, A. R.**, Timofeev, V. B., Popov, V. I., Kurkina, I. I., Davydova, Z. Y., and Semenov, S. O. Impact of plasma treatment in CH₄/N₂ on the properties of reduced graphene oxide //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 693. – №. 1. – С. 012043.
3. Neustroev E. P., **Prokopiev A. R.**, Popov V. I. Influence of Substrates on Conductivity of Thin Carbon Films Deposited by Methane Plasma and Subsequent

Annealed //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1611. – №. 1. – С. 012006.

4. Neustroev E. P., **Prokopiev A.R.**, Popov V.I., Protopopov F.F. and Semenov S.O. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Т. 2328. – №. 1. – С. 050017.
5. Neustroev E. P., **Prokopiev A.R.**, Popov V.I., Semenov S.O., Protopopov F.F., Andreev A.S., Savvinova N.A and Lukin E.S. Research of Properties of a Carbon Film Formed in Methane Plasma and the Following Annealing //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1079. – №. 4. – С. 042086.

Статьи в журналах РИНЦ, а также тезисы во всероссийских, международных конференциях:

1. Неустроев Е.П., **Прокопьев А.Р.**, Попов В.И., Куркина И.И., Тимофеев В.Б., Семенов С.О. Воздействие плазмы CH_4/N_2 на свойства оксида графена // Материалы III Международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры» 13 - 15 ноября 2019. Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2019. – с. 49-50.
2. **Прокопьев А. Р.**, Неустроев Е. П. Модификация свойств оксида графена, обработанного в плазме азота // XXI Лаврентьевские чтения, посвященные 60-летию Сибирского отделения Российской академии наук. XXII Лаврентьевские чтения, посвященные 80-летию со дня рождения академика ВП Ларионова. – 2019. – С. 37-40.
3. **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е.П. Влияние низких температур на электропроводность тонких углеродных структур //9th International Conference on Mathematical Modeling. – 2020. – С. 173-173.
4. Неустроев Е.П., **Прокопьев А.Р.**, Попов В.И., Протопопов Ф.Ф., Семенов С.О. Исследование оптических свойств тонких пленок, полученных осаждением углерода в плазме метана и последующей термообработкой //9th International Conference on Mathematical Modeling. – 2020. – С. 48-48. //

5. **Прокопьев А.Р.** Влияние подложек на электропроводность тонких углеродных пленок, осажденных в плазме метана и подвергнутых термообработке при температурах от 650 до 800 С. //Перспективы развития фундаментальных наук. – 2020. – С. 170-172.
6. Неустроев Е.П., **Прокопьев А.Р.** Оптоэлектронные свойства углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме CH_4 и последующей термообработкой //Вестник Северо-Восточного федерального университета им. МК Аммосова. – 2021. – №. 1 (81). – С. 34-42.
7. Евсеев У.Н., **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е.П. Оптические свойства графитовых пленок, синтезированных осаждением в плазме метана и последующей термообработкой // Сборник тезисов "Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2021)". – с. 251-256.
8. **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е. П. Воздействие тепловой и СВЧ-обработки на свойства аморфных алмазоподобных пленок, полученных осаждением в плазме метана //Вестник Северо-Восточного федерального университета имени МК Аммосова. – 2022. – №. 2. – С. 41-46.
9. **Прокопьев А.Р.**, Неустроев Е.П., Винокуров П.В. Сравнительный анализ свойств углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана и последующей термической и лазерной обработками. //Новые материалы и технологии в условиях Арктики. – 2022. – С. 53-53.