

В диссертационный совет ДС.ТПУ.03
при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»
634050, г. Томск, проспект Ленина,
дом 30

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Клопотова Анатолия Анатольевича на диссертационную работу Прокопьева Айсена Руслановича «Синтез и исследование свойств тонких углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме CH_4 и последующей термообработкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа А. Р. Прокопьева «Синтез и исследование свойств тонких углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме CH_4 и последующей термообработкой» посвящена получению и исследованию свойств углеродных пленок, кристаллизованных на твердотельных подложках. В настоящее время в мире проводятся активные работы по поиску эффективных методов формирования углеродных бездефектных пленок большой площади и нанометровых толщин на твердотельных подложках. Интерес этот связан с возможностью создания оптоэлектронных приборов нового поколения на углеродной основе, а также приборов, работающих на иных физических принципах, в частности, спинтроники. Кроме того, предлагаемый автором метод, может быть востребован для нанесения защитных покрытий на материалы с целью повышения коррозионной и химической устойчивости при воздействия внешних агрессивных сред. В связи с этим диссертационное исследование Прокопьева А. Р. является безусловно актуальным и представляет несомненную научную ценность для развития современной физики.

Научная новизна работы. В ходе решения поставленных задач Прокопьева А. Р. получил ряд новых научных данных. Наиболее значимыми являются следующие результаты. Во-первых, в работе впервые представлена методика получения углеродных пленок последовательным двухэтапным синтезом со следующими условиями с применением плазменного осаждения атомов углерода в плазме метана и с последующей кристаллизацией в диапазоне температур от 650 °С до 800 °С в атмосфере аргона. Во-вторых, исследования электропроводности показали, что полученные пленки при

охлаждении до температур меньше, чем -70°C проявляют прыжковой механизм переноса заряда в соответствии с законом Эфроса-Шкловского для двумерных систем. В третьих, показано, что максимальную фоточувствительность имеют углеродные пленки на подложках Si при использовании температуры обработки 700°C в процессе синтеза.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность научных результатов и обоснованность научных выводов обеспечены корректностью постановки цели и задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных методик и аналитического оборудования и согласием полученных результатов с данными других авторов. О достоверности результатов диссертационной работы свидетельствует также их апробация на конференциях различного уровня и публикации работ в количестве 20, 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), патент РФ на изобретение, актом внедрения в образовательный процесс и учебным пособием.

Научная и практическая значимость полученных автором результатов. Диссертация А.Р. Прокопьева характеризуется несомненной научной ценностью. В практическом плане предложена простая и эффективная методика формирования углеродных пленок на твердотельных подложках. Приведены физические условия и технические характеристики процесса, позволяющие синтезировать пленки с заданными свойствами. Подтверждением прикладного значения работы А.Р. Прокопьева является использование полученных результатов в учебном процессе на кафедрах СВФУ в г. Якутске при выполнении научно исследовательских работ обучающимися. Полученные теоретические результаты вносят определенный вклад в понимание картины структурной трансформации аморфных углеродных пленок в кристаллическую структуру, взаимосвязи структуры с электрическими и оптическими свойствами материала.

Анализ содержания диссертации. Диссертация А.Р. Прокопьева изложена хорошим литературным языком, изложена на 137 страницах и состоит из введения, обзора литературы, описания использованных материалов и методики исследования, полученных результатов и их обсуждения, выводов, списка цитируемой литературы, списка обозначений и сокращений, приложения (акт внедрения в образовательный процесс). Диссертация включает 53 рисунка, 24 таблицы, 189 библиографических источников.

Во введении обосновывается актуальность проводимой работы, указана цель и решаемые для ее реализации задачи, описана научная новизна,

сформулированы защищаемые положения, а также охарактеризована теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе диссертации соискателем проведен литературный обзор и содержит информацию об имеющихся на сегодняшний день данных по изучаемой проблеме. В частности, дана достаточно подробная характеристика углеродных материалов, получаемых различными методами. Описаны технологические особенности получения углеродных пленок существующими методами осаждения в плазме. Приведены основные механизмы переходов форм углерода из аморфного состояния в графитовое. Изложены методики исследования получаемых наноразмерных структур. Содержание обзора свидетельствует о хорошем знании диссертантом современного состояния решаемой научной проблемы, что также подтверждается цитированием большого количества статей, опубликованных в течение последних 5-10 лет.

Во второй главе («Материалы и методы») приведено описание материалов, приборов и оборудования (с указанием технических характеристик), которые использовались в работе. Также в этой главе дается подробное описание методики синтеза углеродных пленок, предложенной в диссертации. В конце главы проведено технико-экономическое обоснование, в котором проведено сравнение разработанной методики с методикой получения других авторов. Все сказанное позволяет охарактеризовать методический уровень работы как соответствующий современным требованиям.

Оригинальные результаты исследований представлены в двух главах: в третьей и четвертой.

В третьей главе представлены данные результатов исследований морфологии углеродных пленок, полученных на различных этапах синтеза. Оценены толщины полученных пленок методом атомно-силовой микроскопии, приведены результаты сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного анализатора. Выявлено уменьшение толщин углеродных пленок после термообработки. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) выявлено, что после первого этапа синтеза образуется аморфная гидрогенизированная углеродная пленка. Установлено, что после второго этапа пленка переходит в нанокристаллический графит с размерами чешуек от единиц до сотен нанометров.

В четвертой главе содержатся результаты исследования электрических и оптоэлектронных свойств синтезированных углеродных пленок. Показано, что электропроводность зависит от условий термообработки материала. Из зависимости электрического сопротивления материала от температуры определена физическая природа электропроводности углеродных пленок,

соответствующая термоактивационным процессам при температурах близких к комнатным, которая с понижением температуры переходит в прыжковый механизм Эфроса-Шкловского. В этой же главе приведены результаты исследований фотоотклика синтезированной углеродной пленки в широком спектральном диапазоне в зависимости от условий получения и поданного напряжения. Показано, что наивысшей фоточувствительностью обладают пленки, сформированные на подложке SiO_2/Si . В заключении главы даны рекомендации применения полученных пленок в области микро- и оптоэлектроники.

Наиболее интересные результаты, соответствующие признаку **новизна**, можно выделить следующие. Установлено влияние температуры внешней среды на образцы, сформированные при температурах отжига от 650 °C до 750 °C, в которых наблюдается линейная температурная зависимость логарифма сопротивления от обратной температуры $\ln R(1/T)$ в температурной области от -70 °C до +200 °C и дано объяснение такому поведению, которое обусловлено термоактивационным механизмом электропроводности. Установлено, что переход в область более низких температур (от -70 °C до -193 °C) приводит к смене механизма электропроводности в двумерных структурах от термоактивационного к прыжковому и проявляется в выявленной в новой функциональной зависимости сопротивления от температуры: $R=f(1/\sqrt{T})$. Также показано, что основной вклад в электрический транспорт носителей заряда вносят домены размерами от 2 (± 0.2) до 10 (± 1) нанометров.

Раздел «Заключение» содержит 5 выводов, которые четко сформулированы, резюмируют полученные данные и полностью соответствуют поставленным задачам.

Личный вклад автора. Активное и непосредственное участие диссертанта подтверждается авторством в публикациях, в праве на интеллектуальную собственность, участием в конференциях и научных семинарах.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации и публикации полностью соответствуют содержанию диссертации и отражают ее суть. В диссертации информация представлена логично и структурировано, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты в области радиационного материаловедения.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования. Несмотря на многочисленные достоинства диссертации, в ней имеются отдельные недочеты, которые вызывают ряд вопросов, но при этом серьёзно не влияют на общее благоприятное впечатление о работе.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертации встречаются рисунки плохого качества, на которых трудно разобрать, что на них приведено. Например, это рис. 1.8, и рис. 2.5.
2. Не всегда указывается погрешность измеряемых величин и расчетных параметров. Например, на рис. 3. 14 и 3.15 и в таблице 3.5.
3. По тексту диссертации в разных местах встречаются единицы измерения то в ангстремах, то в нанометрах. Например, на стр. 98 приведено предложение: «из формулы 1.6 (см. в первой главе), учитывая, что толщина графенового слоя равна 3.41 А.». На этой же странице ниже приведено предложение: «Таким образом, размер нанографитового домена составил $d = 2\xi = \sim 2$ нм [A5]. Точность оценки с учетом [183] составляет примерно ± 0.1 нм.». Желательно использовать в диссертационной работе при анализе результатов какую-то одну единицу измерения.
4. На стр. 38 приведены формулы (1.2) и (1.3). В этих формулах в левой и правых частях размерности не совпадают. Так в формуле (1.3) и в формуле на стр. 89 справа приведена длина волны λ в четвертой степени умноженное на безразмерное отношение интенсивностей (I_D/I_G). А в правой части этой же формулы приведены латеральные размеры (L_a) доменов графита в нм.
5. На стр. 90 к подписи к рисунку рис. 3.15 приведена не корректная подпись. А именно: «Зависимость I_D/I_G от латеральных размеров L_a углеродных пленок. Красная линия – соответствует аппроксимации $1/L_a$, синяя – экспериментальные значения размеров L_a . Однако, на рисунке нет синей линии. Есть только черные экспериментальные точки.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней. Диссертационная работа «Синтез и исследование свойств тонких углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме CH_4 и последующей термообработкой» А. Р. Прокопьева является самостоятельным завершенным научным трудом, выполненным на высоком научно-методическом уровне и представляет интерес для технологии создания углеродных пленок на твердотельных носителях. Содержание диссертационной работы и сформулированные в ней выводы дают основание считать, что цель исследования достигнута, а поставленные в диссертации задачи успешно решены.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует пунктам: 1. «Экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и

гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», 3. «Экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» и 6. «Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины» паспорта научной специальности 1.3.8-физика конденсированного состояния (технические науки).

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что диссертация «Синтез и исследование свойств тонких углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме CH_4 и последующей термообработкой» отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в п. 2.1 Порядка присуждения ученым степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, а Прокопьев Айсен Русланович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8-Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Клопотов Анатолий Анатольевич, доктор физико-математических наук (01.04.07 - физика конденсированного состояния), профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Адрес: 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2; телефон: +7(3822)650-723; e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Я, Клопотов Анатолий Анатольевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«18» 10 2023 г. Клопотов Анатолий Анатольевич

Подпись Клопотова Анатолия Анатольевича заверяю:
ученый секретарь ~~Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования~~ «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

«18» 10 2023 г. Кавушкин Юрий Александрович