

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и

международной деятельности,

к.т.н., доц.

Алтухов А.Ю.

«11» сентября 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Ситнова Михаила Андреевича

«Разработка основ технологии синтеза наноструктурированного углеродного

материала на основе полиакрилонитрила при ИК-нагреве»

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства

материалов и приборов электронной техники.

Развитие наноматериалов и нанотехнологий и внедрение результатов в промышленное производство способствует укреплению экономики страны. Одним из основных материалов функциональной электроники на сегодняшний день являются полупроводники. В том числе органические полупроводники, такой материал обладает рядом преимуществ перед неорганическими: высокая гибкость, прочность, легкость, экологичность, биосовместимость, более низкая стоимость производства, способ производства с каждым годом совершенствуется, разрабатываются новые методы получения таких материалов. Синтез наноматериалов обусловлен их свойствами, на которые влияет квантово-размерный эффект, который проявляется при уменьшении параметров получаемой структуры.

На данный момент в мире стремительный рост использования демонстрируют фотонные технологии, в данной работе при разработке основ технологии наноструктурированного углеродного материала использовался

инфракрасный нагрев с помощью данного вида нагрева происходил синтез наноструктурированного углеродного материала из сополимера акрилонитрила (СПАН). СПАН имеет высокое содержание углерода, а в результате процессов превращения на стадии окислительной стабилизации и карбонизации возможно получение высокотехнологичного углеродного наноматериала. Подвергнув СПАН нагреву при определенных режимах нагрева возможно изменять электропроводность материала в порядке диэлектрик-полупроводник-полуметалл. Теоретическое изучение способа нагрева показывает, что в основном исследования в этой области проводились для гибридного способа нагрева – инфракрасный нагрев графитовой кюветы и затем теплопередача к полимеру. В данной работе использовался непосредственно прямой нагрев СПАН с помощью инфракрасного излучения, такой нагрев может являться более эффективным, чем другие виды нагрева. Основы технологии наноструктурированного углеродного материала с полупроводниковыми свойствами на основе СПАН при таком способе нагрева еще не разработаны.

С учетом вышеизложенного, тема представленной диссертационной работы, является весьма актуальной.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 113 страницах, включает 62 рисунка и 13 таблиц. Структура работы включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы из 153 наименований и одно приложение.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертационного исследования, определяет цель и задачи работы, формулирует научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава основного текста диссертации посвящена аналитическому обзору литературы, в котором представлены основные направления развития материалов на основе полимеров, представлены применения углеродных материалов на их основе в качестве газочувствительных сенсоров, инфракрасных сенсоров, ультрафиолетовых сенсоров, частотных датчиков для

регистрации влажности и использование в структуре суперконденсатора. Проведен анализ основных видов углеродных материалов, которые могут образоваться при температурном воздействии на полимер. А также представлены основные свойства сополимера акрилонитрила и особенности синтеза углеродного наноматериала из него, которые включают в себя стадию стабилизации и стадию карбонизации. Проведен анализ влияния разных факторов на стабилизацию полимера, в том числе одного из основных – кислорода.

Во второй главе описывается подготовка образцов для исследования, материалы, используемые для этого, режимы тепловой обработки и способ получения образцов в виде пленок. Перечислены аналитические методы и подробно представлены параметры, используемые для анализа с помощью этих методов, в том числе уравнения и формулы, используемые для вычисления дополнительных параметров.

В третьей главе проведен анализ результатов исследования этапа окислительной стабилизации СПАН, проанализированы оптические свойства термообработанного СПАН и химические свойства по данным результатам сделан важный вывод о порядке процессов превращения в полимере, происходящих при его нагреве, а также приведена возможная схема превращений в СПАН на этапе стабилизации. Исследована термостабильность образцов после обработки при разных температурах. Наибольший интерес представляют результаты эффективности использования инфракрасного нагрева по сравнению с кондуктивным по анализу данных, методов термогравиметрического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, инфракрасной спектроскопии. Также с помощью этих методов, показано влияние эффекта “ядро-оболочка” на свойства СПАН. Выводы по данной главе сделаны по результатам комплексного подхода и детального анализа зависимости свойств от параметра синтеза материала.

В четвертой главе исследовались электрофизические свойства наноструктурированного углеродного материала, полученного после процесса

карбонизации. В частности, показано влияние температуры нагрева образца на удельное сопротивление, увеличивая температуру обработки возможно уменьшить удельное сопротивление конечного материала в 100 раз. При этом электропроводность материала соответствует диапазону для полупроводников. Также в данной главе исследовано изменение фазового состава при переходе от стадии стабилизации к стадии карбонизации.

В пятой главе изучалась возможность практического применения полученного наноструктурированного углеродного материала в качестве сенсора на влажность окружающей среды. Анализ данных в предыдущих главах позволил автору подобрать определенные режимы обработки сополимера акрилонитрила для получения необходимой реакции изменения сопротивления от влажности окружающей среды. В итоге разработана структура сенсора и получен сенсор, реагирующий на изменение влажности в диапазоне от 20 до 80 %.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения работы.

Основной целью работы являлась разработка основ технологии органического полупроводника на основе наноструктурированного углеродного материала при использовании синергетического эффекта инфракрасного нагрева сополимера акрилонитрила.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые экспериментально обоснованы основы технологии НУМ на основе СПАН, содержащим акрилонитрил ($C = 93$ масс.%), метилакрилат ($C=5,7$ мас.%) и 2-акриламид-2-метилпропансульфонат натрия ($C=1,3$ мас.%), под действием ИК-нагрева (автоматизированная установка «QHC-P610CP»); подтверждено, что увеличение температуры предварительной обработки приводит к возникновению диффузионных ограничений, а модификация структуры СПАН при нагреве начинается с процесса циклизации. И впервые на основе превращений в СПАН показана эффективность ИК нагрева в результате синергетического эффекта ИК-излучения.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные основы технологии, могут представлять интерес для промышленного производства наноструктурированного углеродного материала. И использование в качестве функционального материала, например применения в качестве сенсора на влажность окружающей среды.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждены применением современных методов исследования и согласованностью полученных результатов с литературными данными, а также объемом статистических данных.

Автором опубликовано 5 научных статей в журналах, среди которых 3 входят в базу цитирования Scopus. Результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях.

В соответствии с поставленной целью, настоящая диссертационная работа является логически завершенным научным исследованием, содержащим решение актуальной задачи: разработка основ технологии наноструктурированного углеродного материала на основе полиакрилонитрила при инфракрасном нагреве.

Результаты работы могут быть рекомендованы для синтеза новых наноструктурированных углеродных материалов на основе полимеров. С результатами работы следует ознакомиться ООО «Алабуга-Волокно» и ООО «Глобал СО».

Диссертация изложена в логически последовательной форме, а ее содержание соответствует паспорту заявленной специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат в достаточной степени отражает содержание работы и дает представление о достигнутых результатах.

По диссертационной работе имеются **следующие замечания:**

1) В работе подробно исследована стадия окислительной стабилизации полимера, при этом сравниваются образцы, нагретые при разных температурах. Затем на стадии карбонизации используются образцы, которые прошли стабилизацию при 200 °С, но в рамках этой работы стоит рассмотреть и свойства образца исходного СПАН, минуя стадию стабилизации с переходом к карбонизации.

2) Предлагается использование наноструктурированного углеродного материала для датчика на влажность окружающей среды, но при разработке таких датчиков следует описывать не только рабочий диапазон датчика, но и другие параметры: рабочее напряжение, температура и т.д.

Данные замечания не снижают общую высокую оценку работы, которая выполнена на современном научно-техническом уровне, а ее результаты могут быть использованы в научном и прикладном плане.

Заключение

Диссертационное исследование Ситнова Михаила Андреевича представляет завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему: «Разработка основ технологии синтеза наноструктурированного углеродного материала на основе полиакрилонитрила при ИК-нагреве».

Представленные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Работа выполнена на высоком теоретическом, экспериментальном и аналитическом уровне.

Диссертационная работа Ситнова М.А. «Разработка основ технологии синтеза наноструктурированного углеродного материала на основе полиакрилонитрила при ИК-нагреве» соответствует требованиям ВАК РФ «Положение о порядке присуждения ученых степеней» (ред. от 25.01.2024), а ее автор, Ситнов Михаил Андреевич, заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен после доклада соискателя на объединённом семинаре Регионального центра нанотехнологий и кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Юго-Западном государственном университете «10» сентября 2026 г., (протокол № 1 от 10.09.2026 г.).

Отзыв, составленный по итогам семинара, подписан: главным научным сотрудником Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ, доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики ЮЗГУ Кузьменко Александром Павловичем (специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния, тел. +7(4712) 22-26-05, e-mail: apk3527@mail.ru) и заведующим кафедрой нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики ЮЗГУ, к.ф.-м.н., доц. Кузько Андреем Евгеньевичем (специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния, тел. +7(4712) 22-24-62, e-mail: kuzko@mail.ru)

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет", г. Курск

Адрес: 305040, Курская область, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ,
д.ф.-м.н, профессор

А.П. Кузьменко

Заведующий кафедрой нанотехнологий,
микроэлектроники, общей и прикладной физики,
к.ф.-м.н., доц

А.Е. Кузько