

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Институт проблем технологии микроэлектроники и
особочистых материалов Российской академии наук
(ИПТМ РАН)

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ИПТМ РАН,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
Рощупкин Д.В.
“02” февраль 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук» на диссертационную работу **Тамбура Мамаду** на тему **"Формирование токопроводящего защитного гидрофобного покрытия для солнечных элементов на основе полимерных материалов с графеном"**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Тамбура Мамаду посвящена решению проблемы сохранения эффективности фотоэлектрических преобразователей путем создания композиционного покрытия «полимер-графен» для пассивной самоочистки поверхности солнечных элементов. Эффективность фотоэлектрических преобразователей в значительной степени снижается из-за загрязнения их поверхности пылью, что особенно критично для регионов с высокой инсоляцией и запыленностью, таких как Западная Африка. Существующие решения по созданию самоочищающихся покрытий часто основаны на использовании дорогостоящих материалов, например, платины или оксида титана, что ограничивает их широкое внедрение. Разработка эффективных, недорогих и устойчивых покрытий, сочетающих антистатические и гидрофобные свойства, является актуальной научно-технической задачей как с фундаментальной, так и с практической точек зрения, имеющей значительный потенциал для применения в солнечной энергетике, что соответствует приоритетам «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» в области энергоэффективности и новых материалов, а

также планам развития возобновляемой энергетики и высокотехнологичного машиностроения.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка технологии самоочистки поверхности солнечных элементов, подходящей для условий западноафриканского региона без использования драгоценных металлов или сложных технологических процессов, для чего необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить характеристики загрязнения, характерного для западноафриканского региона, возникающего на поверхности солнечных элементов и установить подходящий механизм их самоочистки.
2. Подобрать полимерный материал, подходящий в качестве матрицы для такого покрытия с учетом использования графеновых структур.
3. Разработать технологию изготовления антистатического и гидрофобного покрытия с подбором оптимальных параметров графеновых структур.
4. Исследовать стабильность изготовленного покрытия к ультрафиолетовому излучению в естественной среде.

Основные результаты диссертации и их новизна

Впервые определена природа взаимодействия загрязнения с поверхностью фотовольтаического преобразователя в зависимости от гранулометрического и химического состава частиц.

Разработана технология получения покрытий полиметилметакрилат-графен и полибутилметакрилат-графен на солнечном элементе.

Получены гидрофобные, антистатические композиционные покрытия «полимер-графен» с величиной удельного сопротивления с 2,8 до 362 кОм/кв. в соответствии с ISO 1853:2018 и углом смачивания 100°.

Разработана методика получения новых антистатических покрытий «полимер-графен» на основе поли(н-бутилметакрилат), устойчивых к ультрафиолетовому излучению.

По комплексу характеристик (электрофизические, гидрофобные свойства, стойкость к ультрафиолетовому излучению и стоимость) разработанные покрытия превосходят известные аналоги на основе металлических наполнителей.

Практическая значимость полученных результатов

Впервые создано антистатическое гидрофобное покрытие на основе полибутилметакрилата и графена, что позволяет снизить затраты на обслуживание солнечных электростанций в условиях повышенной запыленности (пустыни, промышленные зоны) без использования металлических наполнителей и избежать использования платины, а также понизить цену производства.

Разработанный эффективный метод переноса графена с использованием полибутилметакрилата позволяет повысить эксплуатационные характеристики композиционных покрытий.

Разработанное композиционное покрытие «полимер-графен» устойчиво к воздействию ультрафиолетового излучения.

Результаты работы имеют высокий потенциал для внедрения в производство. В частности:

- Для наземной солнечной энергетики: на предприятиях-производителях фотоэлектрических модулей (таких как «Хевел», «Солар Системы») и в компаниях, эксплуатирующих солнечные электростанции в засушливых регионах России, Центральной Азии, Ближнего Востока и Африки.
- Для космической техники: что подтверждается актом о внедрении от компании «Телеком-СТВ», где указано, что разработанные покрытия в комбинации с другими полимерными системами предложены для испытаний в реальных условиях на космических аппаратах, запускаемых ООО «Бюро 1440» и ООО «Спутникс». Это свидетельствует о значимости разработки для решения задач защиты оптико-электронных систем в экстремальных условиях космического пространства.

Полученные автором результаты исследований могут быть использованы для оптимизации технологических процессов получения антистатических покрытий для солнечных элементов.

Апробация результатов диссертационной работы и публикации

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на 11 российских и международных конференциях, а также изложены в 4 статьях, опубликованных в журналах из списка, рекомендуемых ВАК РФ, и индексируемых библиографическими базами данных Web of Science, Scopus и CAS.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным применением современных методов исследования: гранулометрического анализа,

сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), термогравиметрического анализа в сочетании с дифференциальной сканирующей калориметрией (TGA-DSC), Рамановской спектроскопии, измерений вольт-амперных характеристик и поверхностного сопротивления. Использование стандартизированных методик (ISO) и согласованность экспериментальных данных с теоретическими моделями подтверждают обоснованность выводов.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа содержит все необходимые разделы, отражающие проведенные исследования, и состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 164 страницы, включает в себя 107 рисунков и 19 таблиц. Список использованной литературы состоит из 428 источников.

Общая оценка диссертационной работы

Во **введении** автором обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели, задачи исследования и выдвигаемые на защиту положения, показана практическая значимость диссертационной работы и ее научная новизна.

В **первой главе** представлен обширный аналитический обзор литературы, посвященный аспектам потери эффективности за счёт загрязнения солнечного элемента и методикам его отчистки. Отсутствие в литературе данных о характеристиках загрязнения солнечных элементов в западноафриканском регионе, представляющем особый интерес в данном исследовании, усложняет задачу подбора механизма пассивной отчистки. В первой главе также приводится аналитический обзор литературы, посвященный полимерным материалам, которые используются в солнечной энергетике, а также аналитический обзор литературы, посвященный углеродным материалам.

Во **второй главе** представлены результаты исследований свойств пыли на поверхности солнечных элементов. Подробно изложены результаты комплексного исследования характеристик пыли в Западной Африке с использованием ряда методов - жидкофазного гранулометрического анализа, динамического рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, термогравиметрического анализа в сочетании с дифференциальной сканирующей калориметрией. Установлен гранулометрический и химический состав, определена диэлектрическая проницаемость, обоснована необходимость создания покрытия с антистатическими и гидрофобными свойствами.

В **третьей главе** описана разработка технологии получения композиционных покрытий «полимер-графен». Подробно исследован выбор полимерных веществ для формирования акрилатной матрицы, исследованы свойства углеродных нанотрубок, графеновых наночастиц и пленок графена, методы введения графена в полимерную матрицу с подбором подходящего растворителя, процессы переноса и термообработки. Исследование зависимости поверхностного сопротивления от времени термообработки позволили оптимизировать параметры покрытия. Изучены электрофизические, оптические, гидрофобные свойства покрытий, а также их устойчивость к УФ-излучению и влияние легирования графена на свойства покрытий.

Диссертацию завершают **заключение**, в котором отражены основные результаты работы, и список литературы.

На защиту автор выносит следующие положения:

1. Состав и технология получения композиционного покрытия «полимер-графен», позволяющие реализовать эффективный механизм очистки поверхности фотовольтаических модулей за счет антистатичности и гидрофобности с повышенной устойчивостью к ультрафиолетовому излучению.
2. Методика переноса композитного покрытия «полимер-графен» на поверхность фотовольтаического преобразователя, включающая технологические условия нанесения полимера на предварительно синтезированный графен, полученный методом химического осаждения из газовой фазы на металлическую подложку.
3. Влияние легирования графена на фотокаталитические свойства композитных покрытий «полимер-графен». Легирование графена кислородом ухудшает антистатические и гидрофобные свойства покрытия, в отличие от легирования азотом. Легирование азотом не повышает фотокаталитические свойства.

Замечания по диссертационной работе:

1. Недостаточно обоснован выбор предложенного подхода к масштабированию лабораторной технологии нанесения покрытия «ПнБМА–CVD-графен» для промышленного применения на модулях большой площади, не обозначены ключевые технологические ограничения этого процесса.
2. Результаты работы сфокусированы исключительно на применении в фотоэлектрике, при этом было бы не лишним обозначить перспективы применения предлагаемых покрытий для других областей электронной техники, требующих прозрачных проводящих слоёв.

3. Недостаточно ясно, каким образом планируется оценивать и обеспечивать долговременную стабильность адгезии и гидрофобных свойств покрытия при циклическом воздействии влаги и перепадов температур, характерных для реальных условий эксплуатации.

4. Отсутствуют данные для сравнительной оценки экономической эффективности и себестоимости предлагаемого покрытия с использованием CVD-графена по отношению к существующим коммерческим аналогам.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненных исследований и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Тамбура Мамаду «Формирование токопроводящего защитного гидрофобного покрытия для солнечных элементов на основе полимерных материалов с графеном» представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью. Выводы и положения, выносимые на защиту, научно обоснованы и достоверны.

Данные исследования целесообразны для применения в следующих направлениях:

- 1) оптимизации состава и технологии нанесения покрытий для их серийного производства на предприятиях фотоэлектрической отрасли;
- 2) углубленного изучения долговечности и стабильности покрытий в условиях наземного и космического применения совместно с научными коллективами профильных институтов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИРЭ РАН) и компаний-партнеров («Телеком-СТВ», «Бюро 1440»);
- 3) адаптации технологии для защиты других типов оптических и электронных устройств, работающих в условиях загрязнения.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Тамбура Мамаду, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Доклад по материалам диссертации был представлен и получил положительную оценку на научном семинаре «Материаловедение и Технология» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук 13 ноября 2025 г., протокол № 8.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета ИПТМ РАН, протокол № 1 от 2 февраля 2026 г.

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник,

доктор физико-математических наук, профессор



Е.Б. Якимов

"27" января 2026 г.

Подпись Е.Б. Якимова заверяю

Ученый секретарь ИПТМ РАН,

кандидат физико-математических наук



О.В. Феклисова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН).

Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6.

Тел. +7 (49652) 44060; телефакс: +7 (49652) 44225.

Эл. почта: general@iptm.ru Официальный сайт: <https://www.iptm.ru/new/index.ru.html>