

ISSN 1996-0948
ISSN 2949-561X (Online)

**ПРИКЛАДНАЯ
ФИЗИКА**

1` 26

**APPLIED
PHYSICS**



Редакционная коллегия

Андреев Степан Николаевич	д.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
Болтарь Константин Олегович	д.ф.-м.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
Василяк Леонид Михайлович	д.ф.-м.н., профессор (<i>зам. гл. ред.</i>), Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия
Гусейн-заде Намик Гусейнович	д.ф.-м.н., профессор, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
Иванов Вячеслав Алексеевич	к.ф.-м.н., доцент, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
Иванов Виктор Владимирович	д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
Конов Виталий Иванович	д.ф.-м.н., академик РАН, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
Климанов Евгений Алексеевич	д.т.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
Лебедев Юрий Анатольевич	д.ф.-м.н., Институт нефтехимического синтеза Российской академии наук, Москва, Россия
Лямшев Михаил Леонидович	к.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
Майоров Сергей Алексеевич	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия
Никитов Сергей Аполлонович	д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия
Пономаренко Владимир Павлович	д.ф.-м.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
Попов Сергей Викторович	д.т.н., Холдинг «Швабе», Москва, Россия
Старцев Вадим Валерьевич	к.т.н., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
Холоднов Вячеслав Александрович	д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия
Хомич Владислав Юрьевич	д.ф.-м.н., академик РАН, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Москва, Россия
Яковлева Наталья Ивановна	д.т.н., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
Ямщиков Владимир Александрович	д.т.н., член-корреспондент РАН, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Editorial Board

Andreev Stepan	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Boltar Konstantin	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
Gusein-zade Namik	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Ivanov Victor	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian
Ivanov Vyacheslav	PhD (Phys.-Math.), Associate Professor, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Kholodnov Vyacheslav	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Kotelnikov Institute of RadioEngineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Khomich Vladislav	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Klimanov Evgeniy	Dr. Sci. (Eng.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
Konov Vitaly	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Lebedev Yuri	Dr. Sci. (Phys.-Math.), A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Lyamshev Michael	PhD (Phys.-Math.), Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Mayorov Sergei	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Nikitov Sergei	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Kotelnikov Institute of RadioEngineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Ponomarenko Vladimir	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
Popov Sergey	Dr. Sci. (Eng.), Shvabe Holding, Moscow, Russia
Startsev Vadim	PhD (Eng.), RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
Vasilyak Leonid	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (<i>Deputy Editor-in-Chief</i>), Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Yakovleva Natalia	Dr. Sci. (Eng.), RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
Yamshchikov Vladimir	Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА®

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2026, № 1

Основан в 1994 г.

Москва

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Влияние экзосферы Земли на микродеструкцию материалов орбитальных станций

Василяк Л. М., Пеклевский А. В., Прокопович С. П., Чикирев В. Н., Шубралова Е. В. 7

ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

Исследования матричных фотоприемных устройств на основе барьерных структур КРТ средневолнового ИК диапазона спектра

Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Трухачёв А. В., Горн Д. И., Михайлов Н. Н. 14

Капсуляция фоторезистивных структур на основе коллоидных квантовых точек HgTe методом атомно-слоевого осаждения

Медведев А. Г., Кузьмичёв Д. С., Сапцова О. А., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Яковлев В. О., Пономаренко В. П., Попов В. С. 23

Эффективность применения корректора граничной частоты фильтра высоких частот, используемого в сканирующих крупноформатных фотоприёмных устройствах инфракрасного диапазона (ИК ФПУ)

Абилов В. В., Стрельцов В. А., Савцов В. В. 31

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Действие неравновесной атмосферной плазмы на гидрофильность поверхности металлов

Белоплотов Д. В., Скакун В. С., Сорокин Д. А., Соснин Э. А., Панарин В. А., Зайцев Б. А. 39

Нитризация почвы коронным разрядом

Бычков В. Л., Степанов И. Г., Горячкин П. А., Шваров А. П., Бычков Д. В., Логунов А. А. 48

Влияние мощности источника плазмы и состава газовой смеси на параметры сформированных структур на карбиде кремния

Климин В. С., Лысенко И. Е. 54

Исследование электрофизических характеристик однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами при работе на воздухе

Сафронов А. А., Дудник Ю. Д., Васильев М. И., Ширяев В. Н., Васильева О. Б., Никонов А. В., Наконечный Г. В. 59

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ рефрактивных и спектральных свойств границы раздела бромида калия с бор-нитридными нанотрубками <i>Кужаков П. В., Каманина Н. В.</i>	66
Влияние стехиометрии и условий синтеза на фазовый состав, структуру и электрофизические свойства тонких пленок халькопиритов $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$ – перспективных электродов для фотоэлектрохимического разложения воды <i>Ракитин В. В., Кулеметьев И. Д., Бакланова У. Р., Луценко Д. С., Станчик А. В., Рабенюк Е. В., Гапанович М. В.</i>	72
Сравнительный анализ спектров поглощения света в пленках фталоцианина цинка на разных подложках <i>Расмагин С. И., Красовский В. И.</i>	81
Сравнение различных методов для измерения модуля упругости Юнга наноструктурированных материалов на примере титана <i>Усеинов А. С., Султанова Г. Х., Лактионов И. В., Федоткин А. П.</i>	87

ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

Защитная решётка от УФ-излучения для проточных УФ-реакторов с низким аэродинамическим сопротивлением <i>Науменко Д. Е., Колесник Н. А., Василяк Л. М.</i>	94
Водородный генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP <i>Шутаев В. А., Гребенищикова Е. А., Яковлев Ю. П.</i>	101

ПЕРСОНАЛИИ

Юбилей Игоря Дмитриевича Бурлакова	106
------------------------------------	-----

ИНФОРМАЦИЯ

Правила для авторов	108
XXVIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике	111

APPLIED PHYSICS [in Russian]

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2026, No. 1

Founded in 1994

Moscow

CONTENTS

GENERAL PHYSICS

The influence of the Earth's exosphere on the micro-destruction of materials of space stations

Vasilyak L. M., Peklevskiy A. V., Prokopovich S. P., Chikirev V. N., and Shubralova E. V. 7

PHOTOELECTRONICS

HgCdTe Barrier Focal Plane Arrays for the Mid-Wave Infrared Range

Boltar K. O., Burlakov I. D., Iakovleva N. I., Trukhachev A. V., Gorn D. I., and Mikhailov N. N. 14

Encapsulation of photoresistive structures based on colloidal HgTe quantum dots by atomic layer deposition

Medvedev A. G., Kuzmichev D. S., Saptsova O. A., Koroleva T. V., Khakimov K. T., Yakovlev V. O., Ponomarenko V. P., and Popov V. S. 23

Efficiency of applying a high-pass filter cutoff frequency corrector used in the infrared focal-plane array with time delay integration mode (IR-FPA)

Abilov V. V., Streltsov V. A., and Savtsov V. V. 31

PLASMA PHYSICS AND PLASMA METHODS

Effect of non-equilibrium atmospheric plasma on the hydrophilicity of metal surfaces

Beloplotov D. V., Skakun V. S., Sorokin D. A., Sosnin E. A., Panarin V. A., and Zaitsev B. A. 39

Nitrization of soil by corona discharge

Bychkov V. L., Stepanov I. G., Goryachkin P. A., Shvarov A. P., Bychkov D. V., and Logunov A. A. 48

Influence of plasma power and gas mixture composition on the formation of structures on silicon carbide

Klimin V. S. and Lysenko I. E. 54

Study of the dynamics of arc discharge burning in a methane-hydrogen-containing atmosphere in an alternating current plasma torch

Safronov A. A., Dudnik Yu. D., Vasilyev M. I., Shiryayev V. N., Vasilieva O. B., Nikonov A. V., and Nakonechnyi G. V. 59

PHYSICAL SCIENCE OF MATERIALS

Comparative analysis of the refractive and spectral properties of the potassium bromide with boron-nitride nanotubes interface <i>Kuzhakov P. V. and Kamanina N. V.</i>	66
Effect of stoichiometry and synthesis conditions on the phase composition, structure, and electrophysical properties of thin films of $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ – chalcopyrites, promising electrodes for photoelectrochemical decomposition of water <i>Rakitin V. V., Kulemetyev I. D., Baklanova U. R., Lutsenko D. S., Stanchik A. V., Rabenok E. V., and Gapanovich M. V.</i>	72
Comparative analysis of absorption spectra in zinc phthalocyanine films on different substrates <i>Rasmagin S. I. and Krasovskii V. I.</i>	81
Application of different methods for measuring modulus of elasticity of nanostructured materials on the example of titanium <i>Useinov A. S., Sultanova G. H., Laktionov I. V., and Fedotkin A. P.</i>	87

PHYSICAL EQUIPMENT AND ITS ELEMENTS

UV protection grating for UV reactors with gas flow <i>Naumenko D. E., Kolesnik N. A., and Vasilyak L. M.</i>	94
Hydrogen current generator based on Pd/InP Schottky diode <i>Shutaev V. A., Grebenshchikova E. A., and Yakovlev Yu. P.</i>	101

PERSONALI

Anniversary of I. D. Burlakov	106
-------------------------------	-----

INFORMATION

Rules for authors	108
XXVIII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics	111

УДК 621.384.62; 629.7
EDN: AVVWVF

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Влияние экзосферы Земли на микродеструкцию материалов орбитальных станций

© Л. М. Василяк^{1,*}, А. В. Пеклевский², С. П. Прокопович², В. Н. Чикирев²,
Е. В. Шубралова²¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
Московская обл., г. Королёв, 141070 РоссияСтатья поступила в редакцию 5.12.2025; после доработки 14.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.1

Исследования по программе космического эксперимента «Тест» физико-химических свойств образующегося мелкодисперсного осадка на поверхности Международной космической станции (МКС) подтвердили возможность его активного участия в агрессивном влиянии собственной внешней атмосферы на развитие микродеструкции материалов МКС. Приведен пример влияния на герметичность уплотнений в иллюминаторах химических элементов высокого сродства к электрону из состава вулканических газов, достигающих поверхности МКС. Наличие графита на стеклах иллюминаторов, пробоотборниках и очистителях указывает на процессы деградации материалов уплотнителя, что может привести к утечкам газовой среды. Эксперимент «Тест» показал, что естественное загрязнение поверхности МКС космозолями требует рассмотрения старения материалов станции и их коррозионной устойчивости с учетом внешней среды.

Ключевые слова: международная космическая станция, мелкодисперсный осадок, деградация материалов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-7-13

Введение

Одной из задач космического эксперимента (КЭ) «Тест» в период 2010–2024 годов являлся сбор мелкодисперсного осадка с поверхности Российского сегмента МКС с помощью специального пробоотборника для его физико-химического анализа в целях изучения перемещения вещества в космосе [1–5]. Отбор проб производится космонавтом в процессе «внекорабельной деятельности» в контейнерном блоке (пробоотборник), который поддерживается стерилизованным и гермоизолированным в течение всего эксперимента, включая доставку на Землю. Задача наземной фазы – проведение физико-химического, токсиколо-

гического, микробиологического и молекулярного анализа проб.

Исследования состава мелкодисперсного осадка позволяют оценить возможность развития микродеструкции гермокорпуса, ухудшения прозрачности иллюминаторов, эксплуатационных характеристик солнечных батарей и радиаторов под влиянием факторов космического пространства, и сформировать требования к перспективным конструктивным материалам. Анализ физико-химических свойств осадка позволяет установить его участие в агрессивном влиянии на конструктивные элементы и по элементам состава определить источник его поступления в собственную внешнюю атмосферу (СВА) МКС, а также

уточнить данные о геохимическом составе космической пыли на высоте 400 км над поверхностью Земли и о его источниках.

Анализ возможного влияния мелкодисперсного осадка на материалы космических объектов

Установлено, что дисперсный состав космической пыли на поверхности МКС состоит из трех фракций: микронной (1 мкм и 5 мкм), субмикронной (доминирующая фракция) и наночастиц. Из 46 исследованных проб в 27 пробах выявлены не менее одного элемента высокого сродства к электрону, в том числе хлора (17), фтора (6), серы (17), которые, как известно, постоянно присутствуют в вулканических газах. Кроме того, присутствие следов вулканических газов подтверждалось при выявлении одновременно редкоземельного элемента рения и радиоактивных элементов (урана, тория, радия, цезия). В космических телах рений ранее не определялся, поэтому можно полагать, что этот элемент земного происхождения. Самым вероятным источником попадания рения на поверхность МКС являются фумарольные парогазовые выбросы вулкана Кудрявый на острове Итуруп. Вулкан Кудрявый представляет собой один из редких случаев долговременной стационарной высокотемпературной магматической дегазации, в фумарольных парогазопылевых выбросах которого количество рения может достигать 20–36 т/год. Это единственное открытое месторождение рения, третье в мире по запасам этого металла, кроме того, радиоактивные элементы (уран, торий, радий, цезий) также постоянно присутствуют в фумарольных газах вулкана Кудрявый [3, 5].

Частицы серы, хлора и фтора, часто выявляемые в составе проб мелкодисперсного осадка с поверхности МКС, не являются постоянными элементами космической пыли, но в газовых выбросах вулканов они всегда присутствуют и являются главными агрессивными компонентами фумарольных газов. Эти элементы активно участвовали в формировании первичной атмосферы Земли и до сих пор оказывают влияние на климат. В верхнюю часть ионосферы на высоту орбиты МКС ионизированные частицы газопылевых выбросов попа-

дают с восходящей ветвью глобальной электрической цепи, связывающей стратосферу и ионосферу. На их «гребне» возможна быстрая инжекция аэродисперсных частиц в ионосферу со сменой фазового состояния «аэрозоль-космозоль» [6].

Таким образом, обнаружение рения, серы, хлора и фтора на поверхности МКС по результатам геолого-минералогического анализа является доказательством того, что при извержениях вулканов газопылевые выбросы могут подниматься не только до высоты стратосферы, но и гораздо выше в космическое пространство на высоту 400 км над Землей. Этот факт ставит важную материаловедческую задачу исследования влияния осаждения постоянно поступающих элементов высокого сродства к электрону на состояние материалов орбитальных объектов, уплотнений и стекол иллюминаторов, на оптические приборы и др.

Следует отметить, что в составе 46 проб мелкодисперсного осадка на поверхности МКС обнаружено 65 химических элементов, и только в 5 пробах мелкодисперсного осадка на поверхности РС МКС не обнаружены следы железа [3]. В частицах вулканических газов, поднимающихся за пределы атмосферы до высоты орбиты, может присутствовать хлорид железа, выделяющийся при высоких температурах из магматического расплава. Присутствие частиц хлоридов железа в вулканических газах связано с реакцией магмы с хлорсодержащими соединениями, которые также могут выделяться при извержении. Летучим хлоридом железа становится безводный хлорид железа $FeCl_3$, который при сильном нагревании переходит в газообразное состояние, образуя мономеры $FeCl_3$ и димеры Fe_2Cl_6 [7, 8].

При взаимодействии хлорида железа с компактным алюминием происходит накопление ионов железа, завершающееся выделением железа в свободном состоянии и появлением ферритмагнитных частиц, найденных на поверхности фторопластовых корпусов приборов «Тест». Ионы хлорида мигрируют через оксидную пленку к металлу в первую очередь по дефектным местам, увеличивая скорость коррозии [7, 8].

Анализ химического состава загрязнений остекления иллюминатора выявил преобладания оксида цинка, что позволяет выска-

зять предположение о диспергировании покрытий радиаторов и других конструктивных элементов, окрашенных эмалями, содержащими цинк. В качестве примеси присутствуют кремний, алюминий, калий, хлор, фтор и сера. Установлено присутствие углерода, с



преобладающей таблитчатой формой частиц. При отборе проб с иллюминаторов на стекле и границе с обоймой и при последующей очистке стекла специальными устройствами всегда обнаруживались черные следы графита таблитчатого вида (рис. 1).

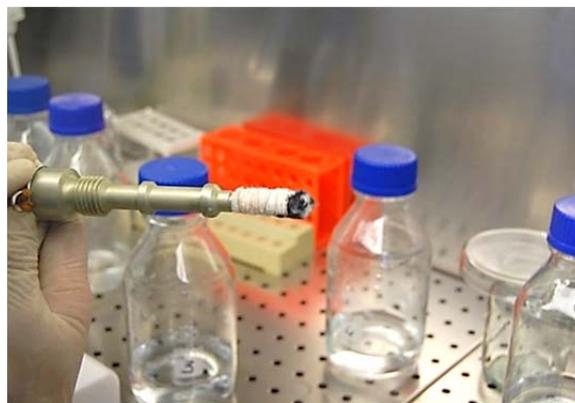


Рис. 1. Отбор проб со стекла иллюминатора служебного модуля МКС (слева) и вид черного осадка на тампоне пробника, доставленного в лабораторию (справа)

Наличие заметных следов таблитчатого графита на стеклах иллюминаторов, пробоотборниках и очистителях указывает на наличие процессов деградации материалов. В составе паронита, являющегося уплотнителем обойм иллюминаторов, содержится более 10 % графита, в том числе таблитчатого вида. Известно, что под воздействием хлора, взаимодействующего с остальными химическими составляющими паронита, графит освобождается. Это обстоятельство может повлиять на герметичность уплотнений в конструкциях иллюминаторов орбитальных объектов при их длительной эксплуатации. Следует отметить, что приборными средствами определить место утечки воздуха в результате повреждения уплотнений затруднительно.

В экспедиции МКС-71 (2024 г.) космонавты О. Кононенко и Н. Чуб обнаружили наличие конденсата на внутреннем стекле иллюминатора № 1 малого лабораторного модуля МЛМ-У, что свидетельствует о негерметичности уплотнителя обоймы. Ранее 12 июня 2022 г. на внутренней стороне внешнего стекла этого иллюминатора космонавтом С. Корсаковым было сделано фото полумесяца инея (рис. 2). Это указывает на то, что в конструкции иллюминатора № 1 МЛМ-У имеет место процесс малой утечки воздуха в течение 2 лет. Образование льда можно объяснить тем, что в

2022 году в результате натекания воздуха в пространстве между стёкол иллюминатора установились термодинамические условия тройной точки воды: давление 4,6 Торр (0,006 атм) и температура 0,01 °С на внутренней стороне внешнего стекла. За счет продолжающейся утечки воздуха в межстекольное пространство давление стало больше 4,6 Торр, и появились капельки конденсата.



Рис. 2. Фото инея на внутренней стороне внешнего стекла иллюминатора

Так как температура внешнего стекла от оправы с температурой внешних конструктивных элементов МКС снижается до центра

стекла с температурой, близкой к отрицательной, зона максимума слоя выпавшего инея и в дальнейшем расположения капелек может указать расположение места негерметичности оправы стекла. Одной из причин может являться деградация герметичности паронитовых уплотнений.

В 2021 году для исследования продолжительности сохранения жизнеспособности микроорганизмов в открытом космическом пространстве на поручнях модуля «Поиск» были установлены два устройства «Тест-экспонат» на 3,5 года. Поверхностные участки фторопластовых гермоблоков представляли интерес для исследования, поскольку на их поверхности образовывался налет мелкодисперсного вещества из состава космозоля. После доставки на Землю устройства «Тест-экспонат» в 2024 году с фторопластового блока был сделан соскоб, и был вырезан условно чистый участок изнутри блока для выполнения физико-химического анализа мелкодисперсионного вещества. Анализ показал, что корпус покрыт осадком рыжего цвета, который удерживается на поверхности фторопласта достаточно прочно, не остаётся на перчатках и практически не счищается ватным тампоном (рис. 3).



Рис. 3. Осадок на поверхности корпуса «Тест»

Элементный анализ образцов проводился методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Получены результаты, в целом, повторяющие результаты предыдущих работ. Соотношение элементов может напоминать как состав каменных метеоритов, так и состав обычной минеральной пыли на Земле, поскольку речь идёт о самых распространённых на Земле элементах. Данные для железа и никеля позволяют проанализировать происхождение железа. Соотношение железо/никель в исследо-

ванном образце равно 335, следовательно, эти частицы железа не метеоритного происхождения, т. к. для них это соотношение не превосходит 14.

В 2019 году в ВНИИФТРИ проводился анализ объектов, экспонировавшихся на внешней поверхности МКС и содержащих мелкодисперсные частицы: свёрток ткани из хлопчатобумажного материала, экспонировавшийся в течение 10 лет на кронштейне модуля «Звезда» и фторопластовый прибор «Тест-экспонат» на кронштейне модуля «Пирс» после 1 года экспонирования. Для анализа образцов применяли нейтронно-активационный анализ (НАА) – высокочувствительный, точный метод, используемый для количественного анализа основных, второстепенных элементов и микроэлементов. Методика НАА основана на измерении параметров излучения, испускаемого при распаде радиоактивных ядер, образовавшихся в результате облучения материала нейтронами. Соотношение железо/никель в исследованных образцах: для фторопластового корпуса прибора в 2019 г. составляет 220 (в 2024 г. – 335), для хлопковой ткани загрязнённого участка 280, а чистого 236.

Важно обратить внимание на концентрацию урана и тория [3] в образцах. Их количества малы, но данный метод имеет отличную разрешающую способность по таким тяжёлым ядрам. Их количество возросло в 3–4 раза на загрязнённом участке. Появление данных элементов можно объяснить наземными испытаниями, либо работой спутников с ядерным источником энергии, либо наличием следов вулканических газов.

Во время работы с участками загрязнённой ткани была отмечена её низкая механическая прочность и повышенная хрупкость. При разрезании поверхностные волокна крошились и разлетались. С незагрязнёнными участками такого не происходило. Поэтому был проведён сравнительный анализ загрязнённого и незагрязнённого участка ткани при помощи электронно-растрового сканирующего микроскопа JEOS jsm-35CF. Были обнаружены несколько видов дефектов загрязнённой ткани, отсутствующие на чистой ткани и не характерные для хлопка. На загрязнённом участке были выявлены «изъеденные» и «крошащиеся» волокна (рис. 4).

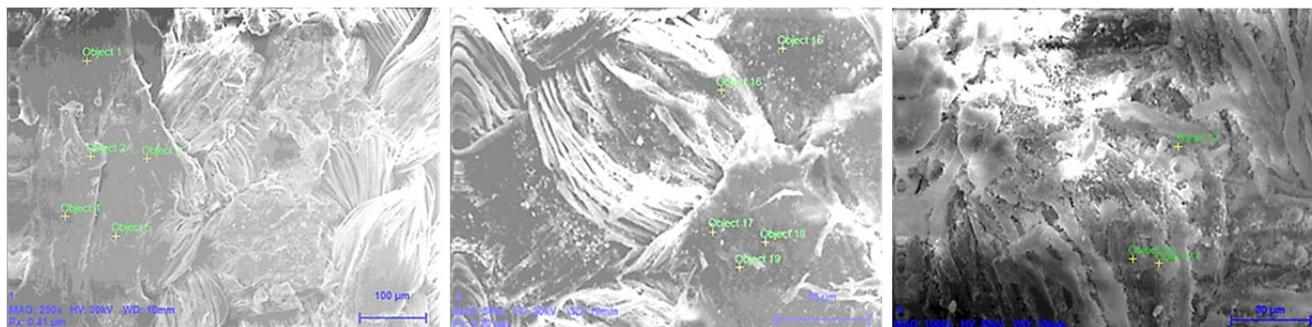


Рис. 4. Увеличенные фрагменты ткани

Петли волокон ткани сохранились только на малом участке. Поскольку волокна ткани были разрушены, то были исследованы механические свойства целых петель с обеих сторон ткани. На внешней стороне (подвергавшейся воздействию) петли рвутся, почти не вытягиваясь, при усилии раз в пять меньшем. На закрытой стороне минимальное усилие разрыва составляло 1,5 кг силы, максимальное – 2 кг силы. На внешней стороне в коричневых областях максимальная выдерживаемая масса – 0,5 кг, минимальная – около 0,25 кг, в белых областях – 1,5 кг и 0,75 кг, соответственно.

На обеих сторонах ткани обнаружены элементы Al, Si, Ca, и Mg, которые наиболее часто находятся в космической пыли и метеоритах. На внешней стороне есть еще S, Cl и F, которые присутствуют в вулканических газах. Обнаружение Zn подтверждает диспергирование покрытий конструктивных элементов, окрашенных эмалями, содержащими цинк. Различие в составе может быть следствием разных скоростей пылевых частиц. Частицы золя крайне малы и, двигаясь на высокой скорости, внедряются в волокна ткани. При высокой скорости они проходят сквозь материю.

Таким образом, исследования физико-химических свойств образующегося мелкодисперсного осадка на поверхности МКС подтвердили возможность его активного участия в агрессивном влиянии СВА на развитие микродеструкции элементов конструкции из разных материалов на МКС. Это обстоятельство формирует новые требования к материалам поверхности космических аппаратов, покрытиям и защитным элементам, с учетом адсорбции и накопления частиц различного происхождения.

Заключение

Результаты космического эксперимента «Тест» показали, что орбитальные группировки и космический мусор являются сборщиками и носителями на своей поверхности агрессивных химических элементов, не рассеиваемых в космическое пространство, как ранее предполагалось. Обнаружено, что химически активные элементы и частицы железа могут быть результатом вулканической деятельности. Постоянное поступление на поверхность МКС биогенного материала, частиц метеороидных потоков, химически активных элементов вулканических газов и, что важно, радиоактивных частиц, требует дальнейшего изучения коррозионной стойкости поверхности в условиях многолетнего комбинированного воздействия агрессивного околоземного пространства. Это определяет новые опасные факторы влияния экзосферы Земли не только на техническое состояние орбитальных средств снаружи, но и внутри после частых внекорабельных работ экипажа. Элементы мелкодисперсного осадка, накопленного на внешней поверхности любого объекта, при возвращении космического аппарата попадут на Землю, и это может представлять опасность. Исследования перемещения вещества в космосе является важной задачей, что также необходимо для планетарной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубралова Е. В., Пеклевский А. В., Прокопович С. П., Успенский Ф. А., Чикирев В. Н. / Космические исследования. 2025. Т. 63. № 2. С. 29–38.
2. Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 14–19.
3. Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shub-

ralova E., Tsygankov O. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 189. P. 278–282.

4. Grebennikova T. V., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., Eliseeva O. V., Kostina L. V., Kulikova N. Y., Latyshev O. E., Morozova M. A., Yuzhakov A. G., Zlatskiy I. A., Chichaeva M. A., Tsygankov O. S. / Scientific World Journal. Vol. 2018. № 7360147, 1–7.

<https://doi.org/10.1155/2018/7360147>

5. Пономарев Г. П., Рашидов В. А., Чубурков Ю. Т. и др. / Материалы Всесоюзного совещания «Геодина-

мика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики». 2003. Т. 2. С. 200–201.

6. Попель С. И. / Природа. 2015. № 9. С. 48–56.

7. Колпаков М. Е., Дресвянников А. Ф., Юсупов Р. А. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-himicheskikh-ravnovesiy-sistemy-fe-ii-fe-iii-al-iii-h2o-pri-korrozii-alyuminiya-v-rastvore-hlorida-zheleza-iii-vysokoy/viewer> С. 132–139.

8. Десвянников А. Ф., Колпаков М. Е. / Журнал физ. химии. 2003. Т. 77. № 5. С. 807.

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

The influence of the Earth's exosphere on the micro-destruction of materials of space stations

L. M. Vasilyak^{1,*}, A. V. Peklevskiy², S. P. Prokopovich², V. N. Chikirev², and E. V. Shubralova²

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² Joint Stock Company “Central Research Institute for Machine Building”, Moscow Region, Korolev, 141070 Russia

Received 5.12.2025; revised 14.01.2026; accepted 20.02.2026

Research under the Test space experiment program on the physical and chemical properties of the resulting fine sediment on the surface of the International Space Station (ISS) has confirmed the possibility of its active participation in the aggressive influence of its own external atmosphere on the development of micro-degradation of ISS materials. An example of the effect of chemical elements with high electron affinity from volcanic gases reaching the surface of the ISS on the tightness of seals in portholes is given. The presence of graphite on the windows of portholes, samplers and cleaners indicates the degradation of the sealing materials, which can lead to leakage of the gaseous medium. The Test experiment showed that the natural contamination of the ISS surface by dispersed particles of the cosmosol requires consideration of the aging of station materials and their corrosion resistance, taking into account the external environment.

Keywords: international space station, fine deposition, exosphere.

REFERENCES

- Shubralova E. V., Peklevskiy A. V., Prokopovich S. P., Uspenskiy F. A., and Chikirev V. N. Cosmic Research, **63** (2), 29–38 (2025) [in Russian].
- Vasilyak L. M., Shubralova E. V., and Chikirev V. N., Applied Physics, № 6, 14–19 (2024) [in Russian].
- Zinicovskaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E., and Tsygankov O., Acta Astronautica **189**, 278–282 (2021).
- Grebennikova T. V., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., Eliseeva O. V., Kostina L. V., Kulikova N. Y., Latyshev O. E., Morozova M. A., Yuzhakov A. G., Zlatskiy I. A., Chichaeva M. A., and Tsygankov O. S., Scientific World Journal **2018**, 7360147, 1–7 p.
- Ponomarev G. P., Rashidov V. A., Chuburkov Yu. T. et al., Proceedings of the All-Union Conference “Geodynamics, magmatism and minera-geny of the continental margins of the North Pacific” **2**, 200–201 (2003).
- Popel S. I., Priroda, № 9, 48–56 (2015) [in Russian].

7. Kolpakov M. E., Dresvyannikov A. F., and Yusupov R. A. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-himicheskikh-ravnovesiy-sistemy-fe-ii-fe-iii-al-iii-h2o-pri-korrozii-alyuminiya-v-rastvore-hlorida-zheleza-iii-vysokoy/viewer> p. 132–139 [in Russian].
8. Dresvyannikov A. F. and Kolpakov M. E., Journal of Physical Chemistry **77** (5) 807 (2003) [in Russian].

Об авторах

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-Scopus 7004886755

Пеклевский Андрей Викторович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: 5737@mail.ru SPIN-код: 1870-6205

Прокопович Сергей Павлович, начальник отдела, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: prokopovichsp@tsniimash.ru

Чикирев Владимир Николаевич, главный специалист, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: vladch56@yandex.ru AuthorID: 609834

Шубралова Елена Владимировна, главный специалист, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: shubralova@mail.ru SPIN-код: 2734-5521, AuthorID: 1317404

УДК 621.383.4/5
EDN: CZNNQPPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Исследования матричных фотоприемных устройств на основе барьерных структур КРТ средневолнового ИК диапазона спектра**© К. О. Болтарь^{1,2}, И. Д. Бурлаков^{1,3}, Н. И. Яковлева^{1,*}, А. В. Трухачев¹,
Д. И. Горн⁴, Н. Н. Михайлов⁵¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: niiakovleva@mail.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701, Россия³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия⁴ Томский государственный университет, г. Томск, 634050 Россия⁵ Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, 630090, РоссияСтатья поступила в редакцию 23.10.2025; после доработки 23.12.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Исследованы матричные фотоприемные устройства (МФПУ) средневолнового ИК диапазона спектра (MWIR) на основе n Vn-гетероструктур с униполярными барьерами и с барьерами на основе сверхрешеток $HgTe/CdHgTe$. Измерены вольтамперные, спектральные характеристики и основные параметры фоточувствительных элементов (ФЧЭ) экспериментальных образцов МФПУ. Полученные результаты подтверждают возможность создания приборов на основе барьерных структур $CdHgTe$ средневолнового ИК диапазона спектра.

Ключевые слова: униполярный приемник, n Vn-гетероструктура, MWIR, $CdHgTe$, матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), спектральная характеристика.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-14-22

1. Введение

Повышение рабочей температуры в инфракрасных (ИК) фотоприемных устройствах (ФПУ), предназначенных для тепловизионных и тепловизионных систем, является основной целью многих ведущих мировых разработчиков современной фотоэлектроники. Возможным решением для повышения рабочей температуры, а также достижения высоких параметров, являются ИК ФПУ на основе униполярных n Vn-гетероструктур $CdHgTe$ (КРТ) с широкозонными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, работающие в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм [1–4].

Создание барьерных n Vn-гетероструктур КРТ осуществляется с помощью современных

методов эпитаксиального выращивания материала $Cd_xHg_{1-x}Te$, и прежде всего, молекулярно-лучевой эпитаксии [5], поскольку МЛЭ обеспечивает получение многослойных структур с заданным уровнем легирования, концентрации и типом проводимости, что важно для достижения параметров качества.

Несмотря на видимые преимущества барьерных фотоприемников, реализация таких МФПУ является сложной задачей из-за наличия нежелательного разрыва в области зонной диаграммы на границе поглощающий/барьерный слои структуры КРТ. Распространение барьерного слоя в валентную зону n Vn-элемента ограничивает протекание неосновных носителей заряда (дырок), которые определяют полезную составляющую сигнала тока в таких устройствах. Разрыв в валентной

области можно уменьшить, если заменить барьерный слой на сверхрешетку HgTe/CdHgTe, что было предложено в профильных работах [6, 7].

Целью данной работы являлось изготовление и исследование фотоприемных устройств MWIR диапазона спектра на основе *nВп*-архитектур с униполярными и многослойными барьерами на основе сверхрешеток из CdHgTe для создания матричных ИК ФПУ нового поколения.

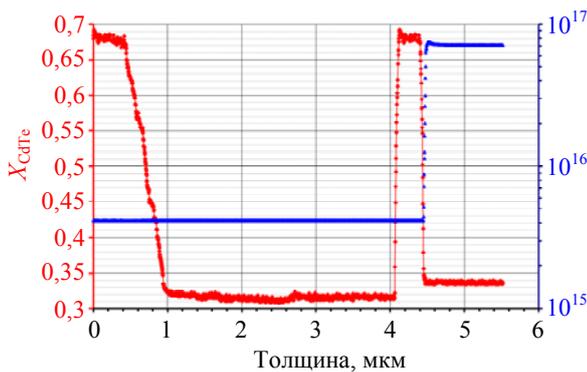
2. Конфигурация барьерных *nВп*-структур на основе CdHgTe

Для изготовления матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) выбраны *nВп*-структуры MWIR-диапазона с униполярными барьерами и со сверхрешетками в качестве

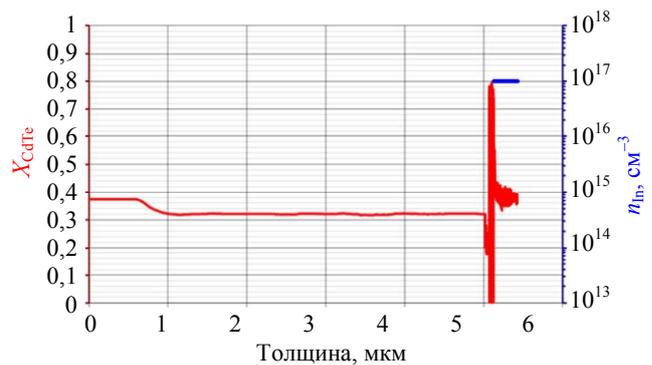
барьеров. Распределение состава по толщине в униполярных барьерных структурах CdHgTe с барьером (а) и со сверхрешеткой в качестве барьера (б) показаны на рисунке 1 (а, б).

Распределение состава в области барьерного слоя двух архитектур: с униполярным барьером и с барьером на основе сверхрешетки HgTe/CdHgTe, показано на рисунке 2 (а, б).

На рисунке 2а показано, что слева направо от подложки имеется барьер толщиной порядка ~400 нм состава $x = 0,7$, на рисунке 2б барьер толщиной порядка 130 нм образован сверхрешеткой, состоящей из 10 периодов HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te, при этом широкозонный слой представляет собой тройной раствор Cd_xHg_{1-x}Te состава $x = 0,7$ мол. дол., второй слой образован полуметаллическим соединением HgTe, толщина слоев примерно соотносится как ~2/5.

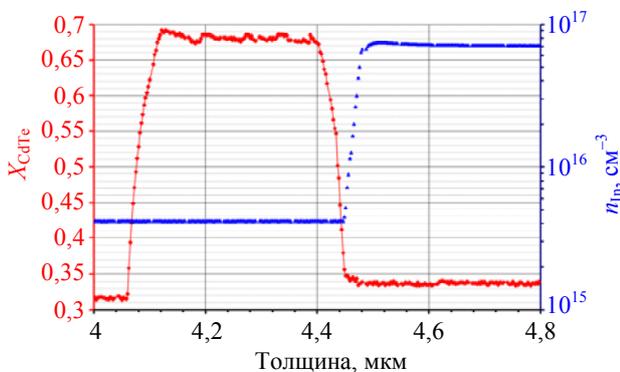


а) *nВп*-гетероструктура на основе КРТ с широкозонным барьером

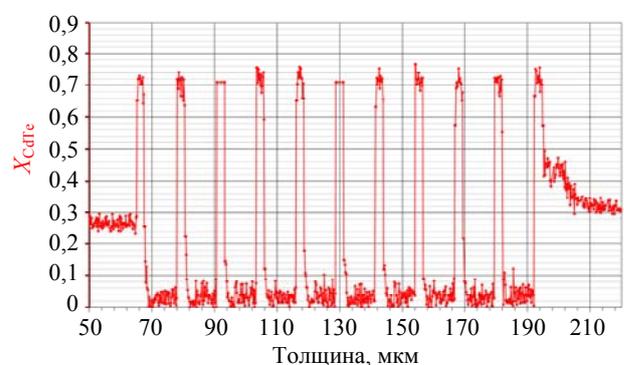


б) *nВп*-гетероструктура на основе КРТ со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 1. Распределение состава и концентрации легирующей примеси по толщине в барьерных *nВп*-гетероструктурах на основе CdHgTe с поглощающим слоем состава $x = 0,3$



а) *nВп*-гетероструктура на основе КРТ с широкозонным барьером



б) *nВп*-гетероструктура на основе КРТ со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 2. Распределение состава в области барьерного слоя двух архитектур: с униполярным барьером (а) и с барьером на основе сверхрешетки HgTe/CdHgTe (б)

Структуры на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ выращивались в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на оптически

прозрачных подложках GaAs (013) [8]. Параметры отдельных слоев $n\text{Вп}$ -структуры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры слоев $n\text{Вп}$ -гетероструктур на основе CdHgTe

Наименование слоя в структуре	ГЭС КРТ с униполярным барьером			ГЭС КРТ со сверхрешеткой $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$		
	Концентрация, см^{-3}	Состав	Толщина, мкм	Концентрация, см^{-3}	Состав	Толщина, мкм
Контактный слой $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	$n \sim (3-8) \times 10^{16}$	0,34	0,2	$n \sim (3-8) \times 10^{16}$	0,32	0,5
Барьерный слой $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	–	0,7 (барьер)	0,35	–	0,72 (барьер)/ 0,03 (яма)	0,004 (барьер)/ 0,010 (яма); 10 периодов 0,140 (общая)
Поглощающий n -слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	$n \sim (3-5) \times 10^{15}$	0,32	3,0–4,0	$n \sim (3-5) \times 10^{15}$	0,30	3,0–4,0
Варизонный слой CdHgTe	–	1,0–0,32	1,0	–	1,0–0,30	1,0
Буферный слой CdTe	–	–	5,5	–	–	5,5
Буферный слой ZnTe	–	–	0,03	–	–	0,03
Оптически прозрачная подложка GaAs (013), $\varnothing 50,8$ мм			600			600

Сверху подложки GaAs в ростовом процессе МЛЭ последовательно формировались буферный слой ZnTe (толщиной ~ 30 нм), релаксирующий буферный слой CdTe (толщиной $\sim 5,5$ мкм), варизонный слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (толщиной ~ 1 мкм). $n\text{Вп}$ -архитектура включала поглощающий, барьерный и контактный слои $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, концентрация легирующей примеси в поглощающем и барьерных слоях составляла $n \sim (3-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация в контактном слое превышала $n > 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Поглощающий слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ имел толщину порядка 3–4 мкм, содержание CdTe в барьерном слое и состав в контактном слое толщиной ~ 1 мкм выбирались в зависимости от рабочего спектрального диапазона. В процессе выращивания легирование рабочей области проводилось донорной примесью индия.

3. Изготовление и исследование МФПУ на основе $n\text{Вп}$ архитектур CdHgTe

В работах [9, 10] рассмотрены свойства барьерных $n\text{Вп}$ -архитектур на основе CdHgTe , в которых барьерный слой (В) эффективно подавляет токовую составляющую основных

носителей заряда (электронов). Одинаковый тип легирования в барьерном и поглощающем слое обуславливает низкий темновой ток, ограниченный диффузионным механизмом [11].

Матрицы фоточувствительных элементов на основе $n\text{Вп}$ -гетероструктур CdHgTe изготавливались по меза-технологии. Размер ФЧЭ и шаг между ними гарантировался топологическими размерами и точностью изготовления фотошаблонов. Разделение элементов матрицы осуществлялось ионно-плазменным травлением через маску фоторезиста до барьерного или буферного n -слоя с финишным жидкостным дотравливанием с целью получения резких по профилю боковых поверхностей и дна канавки с ровной поверхностью без дополнительных неоднородностей. Кристалл матрицы формата 64×64 элемента с шагом 40 мкм между рядами ФЧЭ имел габаритные размеры $\sim 2,74 \times 2,74$ мм. Локальный размер n -области (коллектора) составил $0,02 \times 0,02$ мм, к каждому элементу матрицы технологической операцией фотолитографии изготавливался омический контакт, общие индиевые микроконтакты изготавливались к базовой области кристалла МФЧЭ.

Матричная структура после операции меза-травления с фоточувствительными элементами, разделенными меза-канавками с индиевыми микроконтактами на поверхности показана на рисунке 3 (а, б).

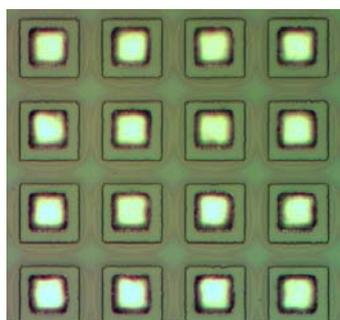
Расстояние между чувствительными элементами составило ~ 11–13 мкм. Выявлена анизотропная природа процесса травления в вертикальном направлении по отношению к поверхности структуры. На поверхности разделяющей канавки после травления наблюдались небольшие поверхностные неоднородности.

Травление на значительную глубину сопровождалось уменьшением маскирующего покрытия в процессе травления, что приводило к увеличению размера разделяющей канавки и уменьшению площади ФЧЭ. Элементы МФЧЭ с глубиной канавки, превышающей толщину барьерного слоя, имели небольшой разброс чувствительности по элементам матрицы. В процессе меза-травления выявлен ряд технологических проблем, одной из которых является необходимость пассивации боковой

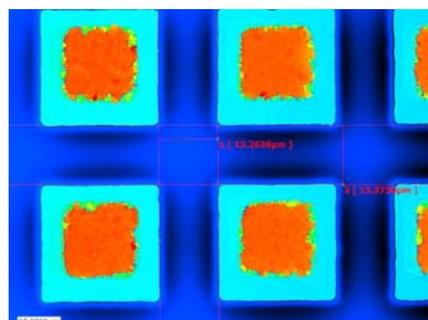
поверхности меза-элементов для защиты их поверхности с целью уменьшения процессов генерации-рекомбинации на поверхности после операции меза-травления.

Кремниевая БИС, предназначенная для считывания, предварительной аналоговой обработки и вывода фотосигналов с каждого элемента матрицы формата 64×64 элементов, обеспечивала накопление фототока на емкостях накопления, усиление и мультиплексирование в 2 аналоговых выхода.

Гибридизация МФЧЭ из КРТ и кремниевой БИС осуществлялась с помощью индиевых столбчатых микроконтактов методом диффузионной сварки давлением, позволяющим получить надежное электрическое соединение собираемых кристаллов. Гибридные кристаллы помещались в вакуумные криостатируемые корпуса. Выводы от контактных площадок кремниевой БИС разваривались на сапфировый растр навесными тонкими золотыми проводками, а затем с растра на внешние выводы корпуса МФПУ (рисунок 4а, б).

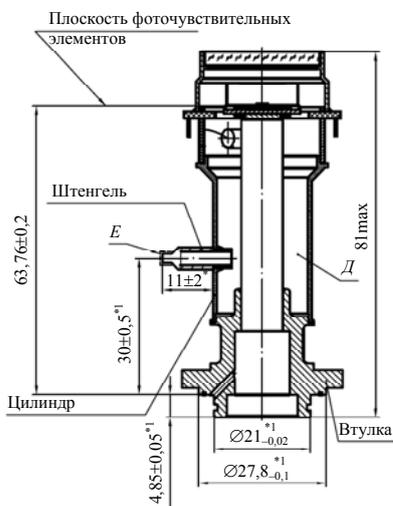


а) фрагмент МФЧЭ с In микроконтактами



б) измерение зазора между ФЧЭ

Рис. 3. Фрагмент МФЧЭ после операции меза-травления



а) конструкция корпуса



б) фотография МФПУ

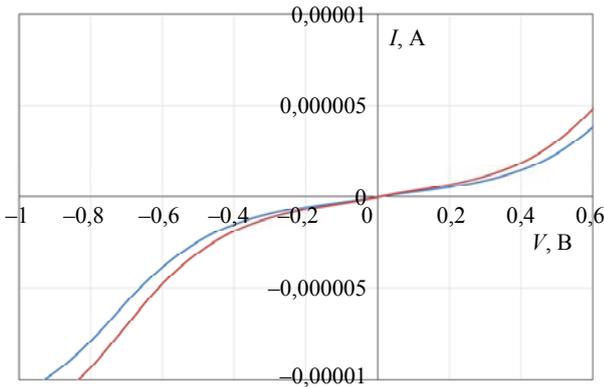
Рис. 4. Внешний вид МФПУ

Вольт-амперные характеристики тестовых ФЧЭ матриц МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02 формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe при $T = 300$ К представлены на рисунке 5а и 5б соответственно.

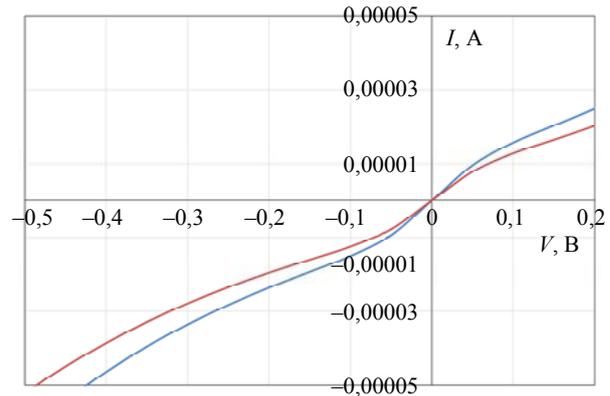
Проведены измерения спектральных характеристик чувствительности МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером и *nVn*-гетероструктур со

сверхрешеткой в качестве барьера. Результаты измерений спектральных характеристик тестовых элементов МФЧЭ показаны на рисунке 7 (а, б).

Результаты измерений: границ спектральной чувствительности тестовых элементов МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером (МФЧЭ-01) и со сверхрешеткой в качестве барьера (МФЧЭ-02), представлены в таблице 2.

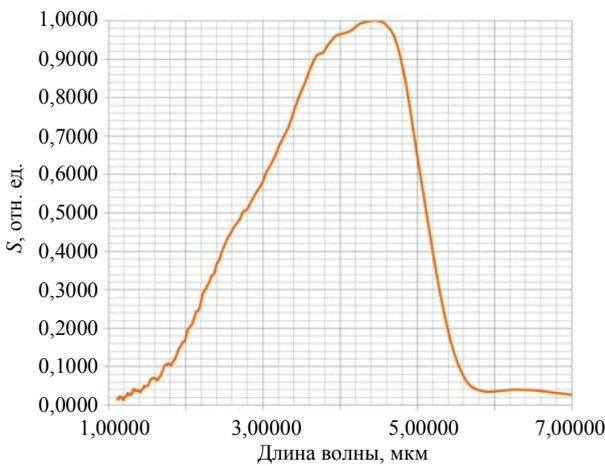


а) МФЧЭ-01 с широкозонным барьером

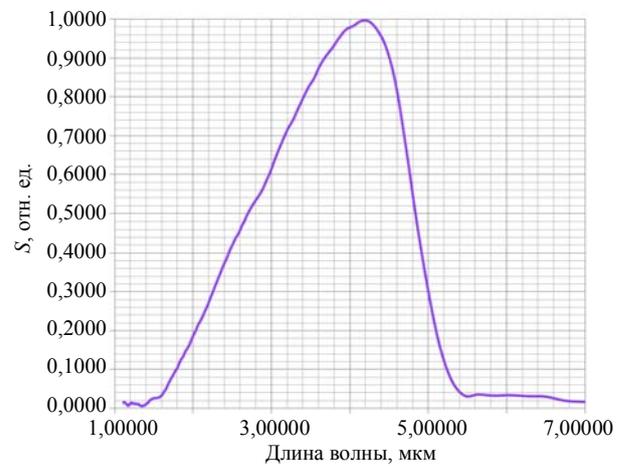


б) МФЧЭ-02 со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 5. Вольтамперные характеристики тестовых ФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонным барьером (а) и со сверхрешеткой в качестве барьера (б) при $T = 300$ К



а) МФЧЭ-01 с широкозонным барьером



б) МФЧЭ-02 со сверхрешеткой в качестве барьера

Рис. 7. Спектральные характеристики чувствительности тестовых элементов МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe: (а) – с широкозонным барьером и (б) – со сверхрешеткой в качестве барьера

Таблица 2

Границы спектральной чувствительности МФЧЭ на основе *nVn* гетероструктур *n*-CdHgTe с широкозонным барьером (МФЧЭ-01) и со сверхрешеткой в качестве барьера (МФЧЭ-02)

Наименование параметров	Результаты измерений МФЧЭ-01	Результаты измерений МФЧЭ-02
1 Длинноволновая граница области спектральной чувствительности, мкм	5,13	4,84
2 Коротковолновая граница области спектральной чувствительности, мкм	2,74	2,70

Длинноволновая граница спектральной характеристики чувствительности составила у тестовых элементов экспериментальных образцов МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02: $\lambda_{д0,5} = 5,13$ мкм и $\lambda_{д0,5} = 4,84$ мкм, она сформирована выбором состава x соединения $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), а коротковолновая граница составила $\lambda_{к0,5} = 2,74$ мкм и $\lambda_{к0,5} = 2,70$ мкм, она определяется поглощением излучения в варизонном слое nVn -гетероструктуры толщиной 1 мкм.

Определение фотоэлектрических параметров МФПУ на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$ проводилось по данным измерений фотосигнала и шума. Для проведения измерений использовалась гибкая автоматизированная система сбора и обработки информации, работающая в автоматическом режиме. Укрупнено структура измерительной системы состояла из следующих основных узлов:

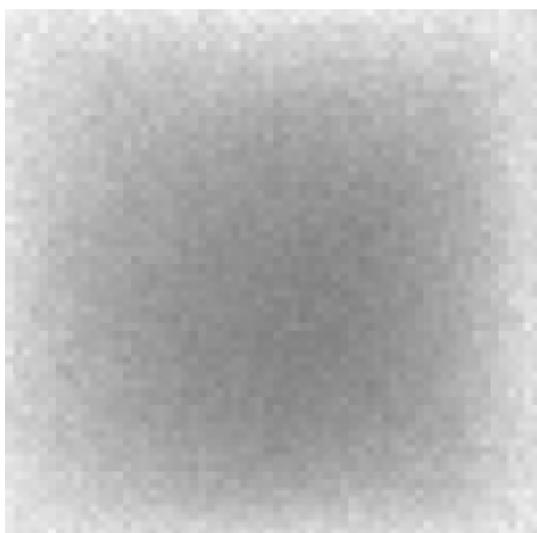
- формирователя оптического сигнала на основе абсолютно-черного тела (АЧТ);

- электроники управления (блока аналоговой обработки и управления ФПУ, блока аналого-цифровой обработки, блока сопряжения);

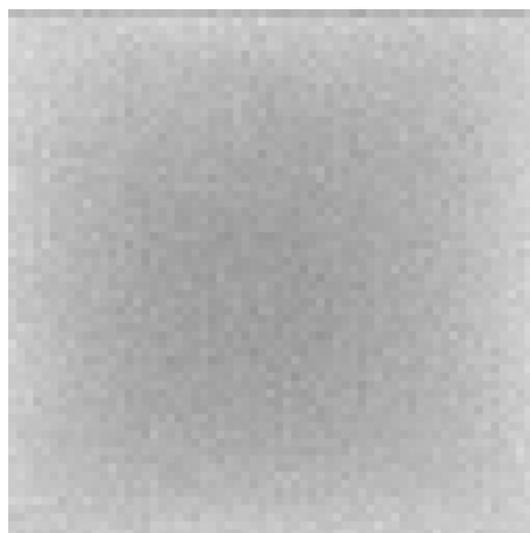
- системы измерения, в которую входили: вычислительный блок и интерфейсные платы.

Проведены измерения тока, фотосигнала и шума экспериментальных устройств: МФЧЭ-01 и МФЧЭ-02 средневолнового ИК диапазона спектра (диаграммы распределения тока по элементам матриц представлены на рисунке 8а, б).

Достижение высоких параметров МФПУ барьерного типа гарантируется как качеством исходных гетероструктур КРТ, так и технологией изготовления МФЧЭ, БИС и гибридной сборки на их основе по разработанному технологическому маршруту. Фотоэлектрические параметры барьерных МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм средневолнового ИК диапазона спектра на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$ представлены в таблице 3.



а) МФЧЭ-01



б) МФЧЭ-02

Рис. 8. Распределение тока по МФЧЭ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм на основе барьерных nVn -гетероструктур $CdHgTe$ MWIR-диапазона

Таблица 3

Фотоэлектрические параметры барьерных МФПУ формата 64×64 элементов с шагом 40 мкм средневолнового ИК диапазона спектра на основе nVn -гетероструктур $CdHgTe$

№ ФПУ	Фотоэлектрические параметры (800 К, $T_{нак} = 0,3$ мс)		
	Вольтовая чувствительность, S_v , В/Вт	Шум N , мкВ	Обнаружительная способность D^* , $см \cdot Гц^{1/2} \cdot Вт^{-1}$
МФЧЭ-01	$0,3 \times 10^8$	0,35	$0,52 \times 10^{11}$
МФЧЭ-02	$0,55 \times 10^8$	0,30	$0,61 \times 10^{11}$

Среднее значение обнаружительной способности для МФЧЭ-01 составило $D_{\text{cp}}^* = 0,52 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФЧЭ-01 составило $S_{\text{уср}} = 0,3 \times 10^8 \text{ В/Вт}$. Среднее значение обнаружительной способности для МФЧЭ-02 составило $D_{\text{cp}}^* = 0,61 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; среднее значение вольтовой чувствительности S_u по элементам МФЧЭ-02 составило $S_{\text{уср}} = 0,55 \times 10^8 \text{ В/Вт}$.

Полученные значения основных фотоэлектрических параметров подтверждают возможность создания МФПУ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, а также правильность путей обработки технических и конструктивно-технологических решений их изготовления. Для дальнейшего улучшения основных параметров МФПУ необходима оптимизация архитектур чувствительного элемента и доработка технологии изготовления МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и *nVn*-структур со сверхрешетками в качестве барьеров.

4. Заключение

В работе представлены перспективные *nVn*-архитектуры на основе CdHgTe с униполярными барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, экспериментально исследованы фотоэлектрические и спектральные характеристики, изготовленных на их основе МФПУ.

Получены следующие результаты:

Длинноволновая граница спектральной характеристики fotocувствительности тестовых элементов экспериментальных образцов МФПУ составила: $\lambda_{\text{д}0,5} \sim 5,0 \text{ мкм}$, она сформирована выбором состава x соединения $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а коротковолновая граница составила $\lambda_{\text{к}0,5} \sim 2,7 \text{ мкм}$, она определялась поглощением излучения в варизонном слое *nVn*-гетероструктуры толщиной 1 мкм. Значение обнаружительной способности порядка $10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, вольтовой чувствительности 10^8 В/Вт . Полученные значения основных фотоэлектрических параметров подтверждают возможность создания МФПУ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными

ми барьерами и со сверхрешетками в качестве барьеров, а также правильность путей обработки технических и конструктивно-технологических решений их изготовления. Для дальнейшего улучшения основных параметров МФПУ необходима оптимизация архитектур fotocувствительного элемента и доработка технологии изготовления МФЧЭ на основе *nVn*-гетероструктур CdHgTe с широкозонными барьерами и *nVn*-структур со сверхрешетками в качестве барьеров, а также оптимизация БИС считывания МФПУ для данного типа fotocувствительного элемента.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-62-10021,
<https://rscf.ru/project/23-62-10021/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Седнев М. В., Трухачев А. В., Иродов Н. А., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Войцеховский А. В., Горн Д. И., Михайлов Н. Н. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 38–44.
2. Войцеховский А. В., Горн Д. И. / Прикладная физика. 2016. № 4. С. 83–86.
3. Kopytko M. et al. / J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
4. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., Hu W. / Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 501.
5. Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Ремесник В. Г., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Швец В. А., Якушев М. В., Латышев А. В. / Автотметрия. 2020. Т. 56. № 5. С. 12–26.
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Jolley G., Antoszewski J., Faraone L. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. № 12.
7. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2022. № 3. С. 37–42.
8. Varavin V. S., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Marin D. V., Remesnik V. G., Predein A. V., Dvoretzky S. A., Vasilyev V. V., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V., Latyshev A. V. / Infrared Phys. Technol. 2020. Vol. 105. P. 103182. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103182>.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., Yakushev M. V. / Infr. Phys. and Techn. 2019. Vol. 102. P. 103035 (1–4).
10. Jiale He, Peng Wang, Qing Li, Fang Wang, Yue Gu, Chuan Shen, Lu Chen, Piotr Martyniuk, Antoni Rogalski, Xiaoshuang Chen, Wei Lu, Weida Hu / IEEE Trans. Electron Devices. 2020. Vol. 67. № 5.
11. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzkiy S. A., et al. / Journal of Communications Technology and Electronics. 2024. Vol. 69. № 4–6. P. 231–235. <https://doi.org/10.1134/S1064226924700372>.

HgCdTe Barrier Focal Plane Arrays for the Mid-Wave Infrared Range

K. O. Boltar^{1,2}, I. D. Burlakov^{1,3}, N. I. Iakovleva^{1,*}, A. V. Trukhachev¹,
D. I. Gorn⁴, and N. N. Mikhailov⁵

¹ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: niakovleva@mail.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

⁵ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

Received 23.10.2025; revised 23.12.2025; accepted 20.02.2026

Using experimental technology, focal plane arrays (FPAs) for the medium-wavelength spectral range (MWIR) based on nBn-heterostructures with unipolar barriers and HgTe/CdHgTe superlattices barriers have been manufactured and investigated. The current-voltage, spectral characteristics and performance of photosensitive elements of experimental samples have been measured. The obtained values of the performance confirm the possibility of creating FPAs based on CdHgTe nBn-heterostructures with wide-band barriers and superlattices as barriers, as well as the correctness of ways to develop technical and constructive technological solutions for their manufacture.

Keywords: unipolar photodetector, nBn-heterostructure, MWIR, HgCdTe, MCT, Focal Plane Array (FPA), spectral response.

REFERENCES

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Iakovleva N. I., Sednev M. V., Trukhachev A. V., Irodov N. A., Lopukhin A. A., Permikina E. V., Voitsekhovskiy A. V., Gorn D. I., and Mikhailov N. N., Applied Physics, № 1, 38–44 (2025) [in Russian].
2. Voitsekhovskiy A. V. and Gorn D. I., Applied Physics, № 4, 83–86 (2016) [in Russian].
3. Kopytko M. et al., J. Electron. Mater. **44** (1), 158–166 (2015).
4. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., and Hu W., Appl. Sci. **11**, 501 (2021).
5. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Remesnik V. G., Sabinina I. V., Sidorov Yu. G., Shvets V. A., Yakushev M. V., and Latyshev A. V., Autometry **56** (5), 12–26 (2020).
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Jolley G., Antoszewski J., and Faraone L., Appl. Phys. Lett. **105** (12), (2014).
7. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., and Yakushev M. V., Applied Physics, № 3, 37–42 (2022) [in Russian].
8. Varavin V. S., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Marin D. V., Remesnik V. G., Predein A. V., Dvoretzky S. A., Vasiliev V. V., Sidorov Yu. G., Yakushev M. V., and Latyshev A. V., Infrared Phys. Technol. **105**, 103182 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103182>.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., and Yakushev M. V., Infr. Phys. and Techn. **102**, 103035 (1–4) (2019).
10. Jiale He, Peng Wang, Qing Li, Fang Wang, Yue Gu, Chuan Shen, Lu Chen, Piotr Martyniuk, Antoni Rogalski, Xiaoshuang Chen, Wei Lu, and Weida Hu, IEEE Trans. Electron Devices **67** (5), (2020).
11. Voitsekhovskiy A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoretzky S. A., et al., Journal of Communications Technology and Electronics **69** (4–6), 231–235 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1064226924700372>.

Об авторах

Болтарь Константин Олегович, д.ф.-м.н., директор по прикладным разработкам, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: boltarko@yandex.ru SPIN-код: 9249-2720, AuthorID: 171355

Бурлаков Игорь Дмитриевич, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по инновациям и науке, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78). SPIN-код: 6042-3634, AuthorID: 171368

Яковлева Наталья Ивановна, д.т.н., главный научный сотрудник НТЦ МФЭ, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: niiakovleva@mail.ru SPIN-код: 1077-9113, AuthorID: 602076

Трухачев Антон Владимирович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: orionmoscow@mail.ru

Горн Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36). E-mail: gorn_dim@sibmail.com SPIN-код: 4514-3163, AuthorID: 724442

Михайлов Николай Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13). E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru SPIN-код: 3449-3155, AuthorID: 107682

УДК 621.383
EDN: IJZHSI

PACS: 85.60.–q

Капсуляция фоторезистивных структур на основе коллоидных квантовых точек HgTe методом атомно-слоевого осаждения© А. Г. Медведев¹, Д. С. Кузьмичёв¹, О. А. Сапцова¹, Т. В. Королева¹, К. Т. Хакимов¹,
В. О. Яковлев¹, В. П. Пономаренко^{1,2}, В. С. Попов^{1,2,*}¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия
*E-mail: popov.vs@mipt.ru²АО «НПО «Орион», Москва, 111538 РоссияСтатья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 19.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Коллоидные квантовые точки (ККТ) являются перспективным материалом для создания недорогих фотодетекторов инфракрасного диапазона, работающих при комнатной температуре. Однако формирование фоточувствительных слоев на их основе сопровождается образованием поверхностных дефектов и окислением, что приводит к деградации рабочих характеристик устройств. В данной работе для эффективной капсуляции слоя ККТ на основе теллурида ртути HgTe впервые предложено использовать метод атомно-слоевого осаждения для нанесения тонких пленок оксида гафния HfO₂. Целесообразность нанесения капсулирующего слоя HfO₂ подтверждена исследованиями фотоэлектрических характеристик изготовленных фоторезисторов. Показано, что защитное покрытие способствует снижению величины темнового тока при сохранении величины фотоотклика фоторезистора при облучении лазерным диодом с длиной волны 1550 нм. Полученные результаты демонстрируют потенциал метода АСО для создания стабильных и высокопроизводительных фотодетекторов ИК-диапазона нового поколения.

Ключевые слова: фотосенсор, средневолновый ИК-диапазон, коллоидные квантовые точки, ККТ, атомно-слоевое осаждение, капсуляция, оксид гафния.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-23-30

Введение

Фотодетекторы ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными детекторами (например, на основе InGaAs или МСТ), что обусловлено низкой стоимостью и простотой синтеза ККТ методами «мокрой химии», совместимостью с CMOS-технологией, возможностью работы при комнатной температуре и механической гибкостью сформированных светочувстви-

тельных слоев на подложках [1–5]. Возможность управления спектральными характеристиками ККТ теллурида ртути HgTe за счет эффекта квантового размерного ограничения позволяет изменять длину волны их поглощения от ближнего до дальнего ИК-диапазона. Это достигается контролем размера нанокристаллов в процессе синтеза, что делает данный материал перспективным для создания ИК-фотодетекторов [6]. Однако, несмотря на относительную стабильность ККТ теллурида ртути, процесс получения фоточувствитель-

ных слоев может приводить к возникновению нежелательных поверхностных состояний, и/или медленного разрушения поверхностного слоя вследствие окисления при контакте с влажным воздухом [7–9]. Кроме того, изменение стехиометрии при пост синтетической обработке нанокристаллов и формировании структур также приводит к резкому возрастанию ловушечных состояний и ухудшению чувствительности и быстродействия.

Одним из подробно разработанных и эффективных способов получения тонких пленок является технология атомно-слоевого осаждения (АСО, Atomic Layer Deposition, ALD), которая заключается в последовательных химических реакциях и имеет свойство самоограничения [10–13]. В процессе АСО прекурсоры поочередно вступают в многократное взаимодействие с поверхностью и, в результате, происходит воспроизводимый рост тонкой плёнки толщиной в монослой за одну стадию, в том числе на подложках сложной формы. Самоограничение поверхностных реакций позволяет контролировать осаждение на атомарном уровне. Процесс АСО развивался в связи с необходимостью получения качественных диэлектрических и люминесцентных плёнок, которые должны быть нанесены на подложки с большой площадью [14]. АСО используется для нанесения различных типов тонких плёнок, в том числе оксидных (Al_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 , ZnO , HfO_2), нитридных (TiN , TaN , WN , NbN), металлических (Ru , Ir , Pt) и сульфидных (ZnS) для разнообразных применений в производстве полупроводниковой микроэлектроники [15–20], фотовольтаических устройств [21–25] и устройств хранения энергии [26–28], катализаторов [29, 30], полупроводниковых газовых сенсоров [31–34], оптики и фотоники [35–37] и многих других [38]. Однако, метод АСО является относительно дорогим как с точки зрения сложности аппаратного оформления, так и вследствие высоких требований к чистоте и качеству используемых прекурсоров и подложек.

Применительно к фотодетекторам ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек метод АСО используется для нанесения пассивирующей пленки оксида алюминия для улучшения стабильности при проведении операций изготовления на воздухе. Например, для оптимизации параметров фоточувстви-

тельности и стабильности детекторов на основе сульфида PbS и селенида свинца PbSe [39, 40] и теллурида ртути HgTe [41].

В данной статье предложено использовать метод АСО для формирования защитного покрытия оксида гафния HfO_2 на массиве ККТ теллурида ртути HgTe . Развитие метода АСО сделало его конкурентным преимуществом возможность осаждения пленок при относительно низких температурах (менее 150°C), что обеспечивает стабильность поверхностного слоя неустойчивых материалов, в том числе биологических и органических образцов. Эффективность капсуляции контролировали измерением фоточувствительных характеристик фоторезистора: темнового тока и величины фотоотклика при облучении светоизлучающим диодом 1550 нм .

Экспериментальная часть

Синтез ККТ HgTe

ККТ HgTe были синтезированы методом горячей инъекции согласно протоколу, описанному ранее [41] при температуре реакции 80°C и времени реакции 30 минут для получения ККТ требуемого размера.

Методика формирования фоторезистивной структуры

ККТ наносили на кварцевую подложку с площадками из встречно-штыревых Au электродов, с промежуточной послойной активацией раствором этандитиола в соляной кислоте и изопропанолу HCl:EDT:IPA (1:1:20 по об.) и промывкой изопропиловым спиртом.

Методика капсуляции фоторезистивной структуры

Рост пленки HfO_2 производили при температуре реакционной камеры 90°C с использованием $\text{Hf}[\text{N}(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)]_4$ (ТЕМАН) и H_2O в качестве прекурсоров. Длительность напуска ТЕМАН в реакционную камеру составляла $0,5\text{ с}$, продувка – 12 с . Длительность напуска паров воды составляла $0,1\text{ с}$, длительность продувки – 12 с . Температуры баллонов с ТЕМАН и H_2O поддерживались стабильными во время всего процесса осаждения равными 100°C и 20°C , соответственно. Толщина защитного покрытия (27 нм) и скорость роста

($\sim 1,36 \text{ \AA/цикл}$) определялись с помощью эллипсометра с длиной волны 632 нм на образце-спутнике из кремния с естественным окислом.

Спектры ИК-Фурье были записаны на ИК-Фурье спектрометре Spectrum 100 (PerkinElmer, США) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

Зависимость тока, протекающего через исследуемый фоторезистор, от времени при импульсной засветке регистрировали при помощи источника-измерителя Keithley 2636В при постоянном напряжении смещения $U = 0,1 \text{ В}$. Для импульсной засветки применяли лазерный диод с волоконным выводом излучения на длину волны 1550 нм (мощность 8 мВт). Лазерный диод работал в режиме прямоугольной модуляции (период 4 с, длительность импульса 2 с), задаваемой генератором FeelTech FeelElec FY6900 60М. Излучение от лазерного диода проходило через коллиматор и далее фокусировалось собирающей кремниевой линзой в световое пятно диаметром около 300 мкм на фоточувствительной области исследуемого образца. Все измерения проводили при нормальных условиях на воздухе.

Обсуждение результатов

Синтез ККТ теллурида ртути проводили методом горячей инъекции взаимодействием хлорида ртути и раствора теллура в триоктилфосфине. Максимум пика поглощения ККТ, синтезированных при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и времени роста нанокристаллов 30 мин по данным ИК-Фурье спектроскопии, составил 2,83 мкм с полной шириной на полувысоте FWHM 0,4 мкм (рис. 1), что указывает на достаточно узкое распределение размеров нанокристаллов теллурида ртути. Изменение времени синтеза и природы прекурсоров ртути и халькогенида позволяет контролировать спектральные характеристики ККТ на основе халькогенидов ртути [42–44]. Приготовление фоторезистора осуществляли послойным нанесением пленок ККТ теллурида ртути из дисперсии методом спин-коутинга. При этом поверхность слоя обрабатывали раствором этандитиола для замены длинноцепочечных лигандов олеиламина на поверхности ККТ,

что является признанным подходом для настройки спектральных характеристик ККТ и снижения числа поверхностных состояний [45, 46].

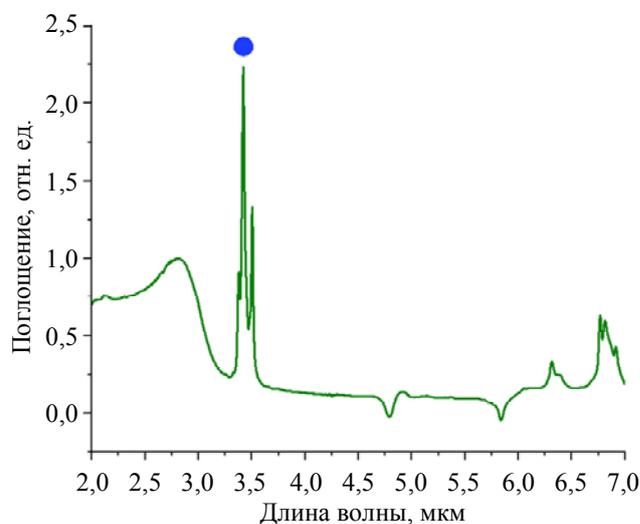


Рис. 1. ИК-спектр ККТ HgTe, полученных при температуре синтеза $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и времени 30 мин. Точкой отмечено положение пика, отвечающего валентным колебаниям C-H лигандной оболочки

Хранение фоторезисторной структуры на воздухе приводит к изменениям фотосенсорных характеристик. Так, экспонирование в течение 15 дней приводит к увеличению темнового тока на контактах с межэлектродным расстоянием 10 мкм с $1,62 \times 10^{-4}$ до $3,63 \times 10^{-4} \text{ А}$, в то время как при измерениях на контактах с межэлектродным расстоянием 2120 мкм темновой ток увеличился с $5,22 \times 10^{-8}$ до $1,09 \times 10^{-7} \text{ А}$. Амплитуда фотоотклика, рассчитываемая как разность токов при засветке лазером 1550 нм и темнового тока, при выдерживании в течение 15 дней увеличилась с $2,88 \times 10^{-7}$ до $2,18 \times 10^{-6}$ на контактах с коротким межэлектродным расстоянием и уменьшилась с $5,79 \times 10^{-10}$ до $3,47 \times 10^{-10} \text{ А}$ при измерении на контактах с длинным межэлектродным расстоянием. По-видимому, это связано с возможным образованием поверхностных состояний, вызванных адсорбцией и химическим взаимодействием с кислородом и водой. Наблюдаемые изменения характеристик демонстрируют относительно низкую стабильность образца. В связи с изменением фоточувствительных характеристик предложено выполнить капсуляцию фоторезисторной структуры тонкой пленкой оксида гафния.

Капсуляцию фоторезистора пленкой оксида гафния осуществляли при относительно низкой температуре реакционной камеры 90 °С [47]. Толщина защитного покрытия составила 27 нм. Эффективность применения такого подхода исследовали сравнительным анализом величин темнового тока, формы нарастания и затухания фотосигнала, и амплитуды фотосигнала до и после нанесения защитного покрытия оксида гафния при облучении лазером 1550 нм. Капсуляция приводит к снижению величины темнового тока до $5,47 \times 10^{-5}$ и $1,38 \times 10^{-8}$ А при измерении на контактах с межэлектродным расстоянием 10 мкм и 2120 мкм, соответственно. При этом амплитуда фотоотклика уменьшилась незначительно до $9,69 \times 10^{-7}$ и $2,10 \times 10^{-10}$ А, соответственно.

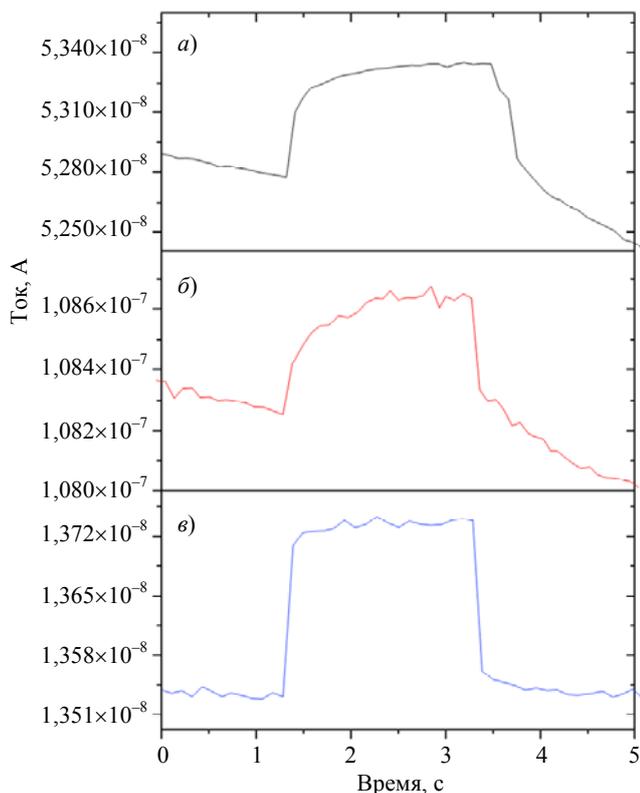


Рис. 2. Фотоотклик при засветке лазерным диодом с длиной волны 1550 нм фоторезистивной структуры свежеприготовленной структуры (а), после выдерживания на воздухе в течение 15 дней (б) и после нанесения пленки оксида гафния (в)

На рис. 2. представлены формы фотооткликов при облучении структуры лазером 1550 нм после изготовления, после 15 дней экспонирования на воздухе и после капсуляции тонкой пленкой оксида гафния. Следует

отметить, что результаты измерений приведены без удаления фона. Капсуляция структуры приводит к резкому уменьшению дрейфа темнового тока, при этом наблюдается быстрое нарастание фотосигнала до установления постоянного значения (рис. 2в), тогда как образец до капсуляции характеризовался сильным дрейфом темнового тока (рис. 2а, б) и медленным выходом фотосигнала на равновесное значение. Кроме того, следует отметить отсутствие области медленного затухания сигнала после капсуляции по сравнению со свежеприготовленной структурой и структурой, выдержанной на воздухе в течение 15 дней.

Несмотря на необходимость проведения дополнительных более глубоких исследований полученные предварительные результаты показывают эффективность капсуляции фоторезистивных структур ККТ тонкой пленкой оксида гафния методом АСО, сформированной при относительно низкой температуре. Это открывает широкие возможности по снижению темнового тока и повышению стабильности при изготовлении фоточувствительных слоев фотодетекторов ИК-диапазона на основе ККТ.

Заключение

Методом горячей инъекции получены коллоидные квантовые точки теллурида ртути с максимумом пика поглощения при 2,83 мкм, на основе которых изготовлена фоторезистивная структура на золотых встречно-штыревых электродах. Показана эффективность капсуляции полученной структуры тонкой защитной пленкой оксида гафния, осажденной методом АСО при относительно низкой температуре 90 °С. Осаждение пленки оксида гафния приводит к снижению величин темновых токов, сохранению величин фотоотклика, уменьшению дрейфа темнового тока и ускорению затухания сигнала при засветке структуры лазерным диодом 1550 нм. Полученные сведения показывают перспективу применения низкотемпературного АСО для получения тонких капсулирующих пленок оксида гафния в фотодетекторах ИК-диапазона на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов различных металлов.

Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(проект № FSMG-2025-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F.* / Russ. Chem. Rev. 2024. № 93. P. RCR5113.
2. *Kim D., Si M.-J., Kim J., Jung Y., Baek S.-W.* / Adv. Opt. Mater. 2025. P. 02859.
3. *Yu L., Tian P., Liang K., Yu L., Tian P., Liang K.* / Quantum Beam Sci. 2025. Vol. 9. № 1. P. 9.
4. *Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Девев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Лазарев П. С., Мирофянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф.* / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 45–54.
5. *Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Девев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Зарипов Ш. И., Лазарев П. С., Мирофянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф.* / Прикладная Физика. 2025. № 2. С. 12–20.
6. *Sergeeva K. A., Zhang H., Portniagin A. S., Bossavit E., Mu G., Kershaw S. V., Ithurria S., Guyot-Sionnest P., Keuleyan S., Delerue C., Tang X., Rogach A. L., Lhuillier E.* / Adv. Funct. Mater. 2024. № 34. P. 2405307.
7. *Dou H., Yuan C., Zhu R., Li L., Zhang J., Wenig T. C.* / Nanomaterials. 2024. № 14. P. 34.
8. *Kahmann S., Loi M. A.* / Appl. Phys. Rev. 2020. Vol. 7. P. 041305.
9. *Giansante C., Infante I.* / J. Phys. Chem. Lett. 2017. № 8. P. 5209–5215.
10. *Kol'tsov S. I.* / J. Appl. Chem. USSR. 1965. № 38. P. 1352.
11. *Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., Smirnov V. M.* / Chem. Vapor Depos. 2015. № 21. P. 216–240.
12. *Puurunen R. L.* / Chem. Vapor Depos. 2014. № 20. P. 332–344.
13. *Parsons G. N., Elam J. W., George S. M., Haukka S., Jeon H., Kessels W. M. M. (Erwin), Leskelä M., Poody P., Ritala M., Rosnagel S. M.* / J. Vac. Sci. Technol. A. 2013. Vol. 31. P. 050818.
14. *Suntola T.* / Mater. Sci. Rep. 1989. Vol. 4. № 5. P. 261–312.
15. *Ovanesyan R. A., Filatova E. A., Elliott S. D., Hausmann D. M., Smith D. C., Agarwal S.* / J. Vac. Sci. Technol. A. 2019. Vol. 37. P. 261–312.
16. *Kim S. E., Sung J. Y., Yun Y., Jeon B., Moon S. M., Lee H. Bin, Lee C. H., Jung H. J., Lee J. U., Lee S. W.* / Curr. Appl. Physics. 2024. Vol. 64. P. 8–15.
17. *Choi A. R., Lim D. H., Shin S. Y., Kang H. J., Kim D., Kim J. Y., Ahn Y., Ryu S. W., Oh I. K.* / Chem. Mater. 2024. Vol. 36. P. 2194–2219.
18. *O'Brien K. P., Naylor C. H., Dorow C., Maxey K., Penumatcha A. V., Vyatskikh A., Zhong T., Kitamura A., Lee S., Rogan C., Mortelmans W., Kavrik M. S., Steinhardt R., Buragohain P., Dutta S., Tronic T., Clendenning S., Fischer P., Putna E. S., Radosavljevic M., Metz M., Avci U.* / Nat. Commun. 2023. Vol. 14. P. 6400.
19. *Chernikova A. G., Sizykh N. A., Zabrosaev I. V., Markeev A. M.* / Surf. Interfaces. 2025. Vol. 62. P. 106135.
20. *Koroleva A. A., Kuzmichev D. S., Kozodaev M. G., Zabrosaev I. V., Korostylev E. V., Markeev A. M.* / Appl. Phys. Lett. 2023. Vol. 122. № 2. P. 022905.
21. *Niu W., Li X., Karuturi S. K., Fam D. W., Fan H., Shrestha S., Wong L. H., Tok A. I. Y.* / Nanotechnology. 2015. Vol. 26. P. 064001.
22. *Van Delft J. A., Garcia-Alonso D., Kessels W. M. M.* / Semicond. Sci. Technol. 2012. Vol. 27. P. 074002.
23. *Zardetto V., Williams B. L., Perrotta A., Di Giacomo F., Verheijen M. A., Andriessen R., Kessels W. M. M., Creatore M.* / Sustain. Energy Fuels. 2017. Vol. 1. P. 30–55.
24. *Dingemans G., Kessels W. M. M.* / J. Vac. Sci. Technol. A. 2012. Vol. 30. P. 040802.
25. *Zaera F.* / Chem. Soc. Rev. 2013. Vol. 42. P. 2746–2762.
26. *Hu Y., Miikkulainen V., Mizohata K., Norby T., Nilsen O., Fjellvåg H.* / Electrochim. Acta. 2020. Vol. 361. P. 137019.
27. *Put B., Mees M. J., Hornsveld N., Hollevoet S., Sepúlveda A., Vereecken P. M., Kessels W. M. M., Creatore M.* / J. Electrochem. Soc. 2019. Vol. 166. P. A1239.
28. *Kozen A. C., Pearse A. J., Lin C. F., Noked M., Rubloff G. W.* / Chem. Mater. 2015. Vol. 27. P. 5324–5331.
29. *Oneill B. J., Jackson D. H. K., Lee J., Canlas C., Stair P. C., Marshall C. L., Elam J. W., Kuech T. F., Dumesic J. A., Huber G. W.* / ACS Catal. 2015. Vol. 5. P. 1804–1825.
30. *Shim J. W., Lee Y. S., Choi Y. S., Henke T., Knaut M., Hossbach C., Mane A. U., Tong W. M., Brodie A. D., Mackus A. J. M., Weber M. J., Thissen N. F. W., Garcia-Alonso D., Vervuurt R. H. J., Assali S., Bol A. A., Verheijen M. A., Kessels W. M. M.* / Nanotechnology. 2015. Vol. 27. P. 034001.
31. *Мокрушин А. С., Дмитриева С. А., Горбань Ю. М., Стройкова А. Р., Симоненко Н. П., Аверин А. А., Симоненко Е. П.* / Неорганическая химия. 2025. Т. 70. № 4. С. 606–614.
32. *Mokrushin A. S., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Akkuleva K. T., Antipov V. V., Zaharova N. V., Malygin A. A., Bukunov K. A., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T.* / Appl Surf Sci. 2019. Vol. 463. P. 197–202.
33. *Pan H., Zhou L., Zheng W., Liu X., Zhang J., Pinna N.* / Internat. J. Extreme Manufact. 2023. № 5. P. 022008.
34. *Cho B., Hahn M. G., Choi M., Yoon J., Kim A. R., Lee Y. J., Park S. G., Kwon J. D., Kim C. S., Song M., Jeong Y., Nam K. S., Lee S., Yoo T. J., Kang C. G., Lee B. H.,*

- Ko H. C., Ajayan P. M., Kim D. H. / Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 8052.
35. Leskelä M., Mattinen M., Ritala M. / J. Vacuum Sci. Technol. B. 2019. Vol. 37. P. 030801.
36. He G., Zhu L., Sun Z., Wan Q., Zhang L. / Prog. Mater. Sci. 2011. Vol. 56. № 5. P. 475–572.
37. Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2025. № 5. С. 15–24.
38. Kessels E., Devi A., Park J. S., Ritala M., Yanguas-Gil A., Wiemer C. / Nat. Rev. Methods Primers. 2025. Vol. 5. P. 66.
39. Hu C., Gassenq A., Justo Y., Devloo-Casier K., Chen H., Detavernier C., Hens Z., Roelkens G. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. № 17. P. 171110.
40. Liu Y., Tolentino J., Gibbs M., Ihly R., Perkins C. L., Liu Y., Crawford N., Hemminger J. C., Law M. / Nano Lett. 2013. Vol. 13. P. 1578–1587.
41. Malachosky E. W., Ackerman M. M., Stan L. / Nanomaterials. 2024. Vol. 14. № 16. P. 1354.
42. Шуклов И. А., Миленкович Т., Майорова А. В., Вершинина О. В., Иванова В. А., Павлова В. Д., Попов В. С. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 43–50.
43. Шуклов И. А., Миленкович Т., Вершинина О. В., Дубровина Н. В., Сапцова О. А., Попов В. С., Иванов В. В. / Прикладная физика. 2025. № 3. С. 34–41.
44. Попов В. С., Миленкович Т., Хакимов К. Т., Королева Т. В., Деомидов А. Д., Давлетишин Р. В., Хамидуллин К. А., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Шуклов И. А., Короннов А. А., Егоров А. В., Пономаренко В. П. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 47–53.
45. Brown P. R., Kim D., Lunt R. R., Zhao N., Bawendi M. G., Grossman J. C., Bulović V. / ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 5863–5872.
46. Шуклов И. А., Демкин Д. В., Конавичева В. А., Попов В. С., Разумов В. Ф. / Прикладная физика. 2022. № 6. С. 35–42.
47. Chernikova A. G., Kuzmichev D. S., Negrov D. V., Kozodaev M. G., Polyakov S. N., Markeev A. M. / Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. P. 242905.

PACS: 85.60.–q

Encapsulation of photoresistive structures based on colloidal HgTe quantum dots by atomic layer deposition

A. G. Medvedev¹, D. S. Kuzmichev¹, O. A. Saptsova¹, T. V. Koroleva¹, K. T. Khakimov¹, V. O. Yakovlev¹, V. P. Ponomarenko^{1,2}, and V. S. Popov^{1,2,*}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

* E-mail: popov.vs@mipt.ru

² RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 25.12.2025; revised 19.01.2026; accepted 20.02.2026

Colloidal quantum dots (CQDs) are a promising material for low-cost infrared photodetectors operating at room temperature. However, the formation of CQD based photosensitive layers is accompanied by the formation of surface defects and oxidation, which leads to the degradation of the devices' performance. In this study, we propose using atomic layer deposition (ALD) to efficiently encapsulate a mercury telluride (HgTe) CQD layer by depositing thin films of hafnium oxide (HfO₂) for the first time. The feasibility of applying the HfO₂ encapsulating layer is confirmed by studying the photoelectric characteristics of the manufactured photoresistors. It is shown that the protective coating reduce the dark current while maintaining the photoresistor's photoresponse under 1550 nm laser irradiation. The obtained results demonstrate the potential of ALD for creating stable and high-performance next-generation IR photodetectors.

Keywords: photosensor; mid-wave IR range; colloidal quantum dots; atomic layer deposition; encapsulation; hafnium oxide.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., and Razumov V. F., *Russ. Chem. Rev.* **93** (4), RCR5113 (2024).
2. Kim D., Si M.-J., Kim J., Jung Y., and Baek S.-W., *Adv. Opt. Mater.* e02859 (2025).
3. Yu L., Tian P., Liang K., Yu L., Tian P., and Liang K., *Quantum Beam Sci.* **9** (1), 9 (2025).
4. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Pankov M. A., et al., *Applied Physics*, № 1, 45–54 (2025) [in Russian].
5. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Pankov M. A., et al., *Applied Physics*, № 2, 12–20 (2025) [in Russian].
6. Sergeeva K. A., Zhang H., Portniagin A. S., et al., *Adv. Funct. Mater.* **34** (39) 2405307 (2024).
7. Dou H., Yuan C., Zhu R., Li L., Zhang J., and Weng T. C., *Nanomaterials* **14** (1), 34 (2024).
8. Kahmann S. and Loi M. A., *Appl. Phys. Rev.* **7** (4) 041305 (2020).
9. Giansante C. and Infante I., *J. Phys. Chem. Lett.* **8** (20), 5209–5215 (2017).
10. Kol'tsov S. I., *J. Appl. Chem. USSR* **38**, 1352 (1965).
11. Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., and Smirnov V. M., *Chem. Vapor Depos.* **21** (10-12), 216–240, (2015).
12. Puurunen R. L., *Chem. Vapor Depos.* **20** (10-12), 332–344 (2014).
13. Parsons G. N., Elam J. W., George S. M., Haukka S., Jeon H., Kessels W. M. M., Leskelä M., Poodt P., Ritala M., and Rossnagel S. M., *J. Vac. Sci. Technol. A* **31** (5), 050818 (2013).
14. Suntola T., *Mater. Sci. Rep.* **4** (5), 261–312 (1989).
15. Ovanesyan R. A., Filatova E. A., Elliott S. D., Hausmann D. M., Smith D. C., and Agarwal S., *J. Vac. Sci. Technol. A* **37**, 060904 (2019).
16. Kim S. E., Sung J. Y., Yun Y., Jeon B., Moon S. M., Lee H., Lee C. H., Jung H. J., Lee J. U., and Lee S. W., *Curr. Appl. Phys.* **64**, 8–15 (2024).
17. Choi A. R., Lim D. H., Shin S. Y., Kang H. J., Kim D., Kim J. Y., Ahn Y., Ryu S. W., and Oh I. K., *Chem. Mater.* **36** (5), 2194–2219 (2024).
18. O'Brien K. P., Naylor C. H., Dorow C., et al., *Nat. Commun.* **14** (1), 6400 (2023).
19. Chernikova A. G., Sizykh N. A., Zabrosaev I. V., and Markeev A. M., *Surf. Interfaces* **62**, 106135 (2025).
20. Koroleva A. A., Kuzmichev D. S., Kozodaev M. G., Zabrosaev I. V., Korostylev E. V., and Markeev A. M., *Appl. Phys. Lett.* **122** (2), 022905 (2023).
21. Niu W., Li X., Karuturi S. K., Fam D. W., Fan H., Shrestha S., Wong L. H., and Tok A. I. Y., *Nanotechnol.* **26** (6), 064001 (2015).
22. Van Delft J. A., Garcia-Alonso D., and Kessels W. M. M., *Semicond. Sci. Technol.* **27** (7), 074002 (2012).
23. Zardetto V., Williams B. L., Perrotta A., Di Giacomo F., Verheijen M. A., Andriessen R., Kessels W. M. M. and Creatore M., *Sustain. Energy Fuels* **1** (1) 30–55 (2017).
24. Dingemans G. and Kessels W. M. M., *J. Vac. Sci. Technol. A* **30** (4), 040802 (2012).
25. Zaera F., *Chem. Soc. Rev.* **42** (7), 2746–2762 (2013).
26. Hu Y., Miikkulainen V., Mizohata K., Norby T., Nilsen O., and Fjellvåg H., *Electrochim. Acta* **361**, 137019 (2020).
27. Put B., Mees M. J., Hornsveld N., Hollevoet S., Sepúlveda A., Vereecken P. M., Kessels W. M. M., and Creatore M. J., *Electrochem. Soc.*, **166** (6), A1239 (2019).
28. Kozen A. C., Pearse A. J., Lin C. F., Noked M., and Rubloff G. W., *Chem. Mater.* **27** (15), 5324–5331 (2015).
29. Oneill B. J., Jackson D. H. K., Lee J., Canlas C., Stair P. C., Marshall C. L., Elam J. W., Kuech T. F., Dumesic J. A., and Huber G. W., *ACS Catal.* **5** (3), 1804–1825 (2015).
30. Woo Shim J., Seok Lee Y., Sung Choi Y., Henke T., Knaut M., Hossbach C., Mane A. U., Tong W. M., Brodie A. D., Mackus A. J., Weber M. J., Thissen N. F., Garcia-Alonso D., Vervuurt R. H., Assali S., Bol A. A., Verheijen M. A., and Kessels W. M., *Nanotechnol.* **27** (3), 034001 (2015).
31. Mokrushin A. S., Dmitrieva S. A., Gorban Y. M., Stroikova A. R., Simonenko N. P., Averin A. A., and Simonenko E. P., *Russ. J. Inorg. Chem.* **70**, 624–632 (2025).
32. Mokrushin A. S., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Akkuleva K. T., Antipov V. V., Zaharova N. V., Malygin A. A., Bukunov K. A., Sevastyanov V. G., and Kuznetsov N. T., *Appl. Surf. Sci.* **463**, 197–202 (2019).
33. Pan H., Zhou L., Zheng W., Liu X., Zhang J., and Pinna N., *Int. J. Extreme Manufact.* **5** (2), 022008 (2023).
34. Cho B., Hahm M. G., Choi M., Yoon J., Kim A. R., Lee Y. J., Park S. G., Kwon J. D., Kim C. S., Song M., Jeong Y., Nam K. S., Lee S., Yoo T. J., Kang C. G., Lee B. H., Ko H. C., Ajayan P. M., and Kim D. H., *Sci. Rep.* **5** (1), 8052 (2015).
35. Leskelä M., Mattinen M., and Ritala M., *J. Vac. Sci. Technol. B* **37**, 030801 (2019).
36. He G., Zhu L., Sun Z., Wan Q., and Zhang L., *Prog. Mater. Sci.*, **56** (5), 475–572 (2011).
37. Voitsekhovskii A. V., Dzyadukh S. M., Gorn D. I., Dvoret'skii S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu., and Yakushev M. V., *Applied Physics*, № 5, 15–24 (2025) [in Russian].
38. Kessels E., Devi A., Park J. S., Ritala M., Yanguas-Gil A., and Wiemer C., *Nat. Rev. Methods Primers* **5**, 66 (2025).

39. Hu C., Gassenq A., Justo Y., Devloo-Casier K., Chen H., Detavernier C., Hens Z., and Roelkens G., *Appl. Phys. Lett.* **105** (17), 171110 (2014).
40. Liu Y., Tolentino J., Gibbs M., Ihly R., Perkins C. L., Liu Y., Crawford N., Hemminger J. C., and Law M., *Nano Lett.* **13** (4), 1578–1587 (2013).
41. Malachosky E. W., Ackerman M. M., and Stan L., *Nanomaterials* **14** (16), 1354 (2024).
42. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., and Popov V. S., *J. Comm. Tech. Electron.* **70** (2), 61–67 (2025).
43. Shuklov I. A., Milenkovich T., Vershinina O. V., Dubrovina N. V., Saptsova O. A., Popov V. S., and Ivanov V. V., *Applied Physics*, № 3, 34–41 (2025) [in Russian].
44. Popov V. S., Milenkovich T., Khakimov K. T., Koroleva T. V., Deomidov A. D., Davletshin R. V., Khamidullin K. A., Saptsova O. A., Yakovlev V. O., Shuklov I. A., Koronov A. A., Egorov A. V., and Ponomarenko V. P., *J. Comm. Tech. Electron.* **70** (6), 278–282 (2025).
45. Brown P. R., Kim D., Lunt R. R., Zhao N., Bawendi M. G., Grossman J. C., and Bulović V., *ACS Nano* **8**, 5863–5872 (2014).
46. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Konavicheva V. A., Popov V. S., and Razumov V. F., *J. Comm. Tech. Electron.* **68** (S2), S184–S189 (2023).
47. Chernikova A. G., Kuzmichev D. S., Negrov D. V., Kozodaev M. G., Polyakov S. N., and Markeev A. M., *Appl. Phys. Lett.* **108** (24), 242905 (2016).

Об авторах

Медведев Александр Геннадьевич, к.х.н., заместитель заведующего лабораторией, старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: medvedev.ag@mipt.ru SPIN-код: 3699-6664, AuthorID: 822022, ORCID 0000-0002-6762-004X

Кузьмичёв Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: kuzmichev.ds@mipt.ru SPIN-код: 3865-0101, AuthorID: 822752, ORCID 0000-0002-8901-5051

Сапцова Ольга Александровна, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: saptsova.oa@mipt.ru SPIN-код: 3710-5884, AuthorID: 1323937, ORCID 0009-0008-5445-4629

Королева Таисия Викторовна, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: koroleva.tv@mipt.ru SPIN-код: 6991-6170, AuthorID: 1292280, ORCID 0000-0003-0792-1948

Хакимов Карим Тимурович, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: khakimov.kt@mipt.ru SPIN-код: 8812-6012, AuthorID: 1209525, ORCID 0000-0001-8133-6128

Яковлев Виктор Олегович, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: iakovlev.vo@mipt.ru SPIN-код: 3324-6931, AuthorID: 1290912, ORCID 0009-0009-3507-082X

Пономаренко Владимир Павлович, д.ф.-м.н., главный конструктор, заведующий кафедрой, профессор, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9); АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: 2392325@gmail.com SPIN-код: 6882-8721, AuthorID: 171358

Попов Виктор Сергеевич, к.х.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доцент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9); начальник центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru SPIN-код: 5846-8066, AuthorID: 862015, ORCID 0000-0002-0962-9775

УДК 621.383
EDN: MPKSTR

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp

Эффективность применения корректора граничной частоты фильтра высоких частот, используемого в сканирующих крупноформатных фотоприёмных устройствах инфракрасного диапазона (ИК ФПУ)

© В. В. Абилов, В. А. Стрельцов, В. В. Савцов*

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: vlvsav@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2025; после доработки 27.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 2.2.6

Рассматривается принципиальное устройство БИС считывания сканирующих фотомодулей (ФМ) инфракрасного диапазона (ИК) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН). Обозначена роль и влияние рекурсивного фильтра высоких частот (ФВЧ) во входных ячейках (ВЯ) БИС считывания на пороговые характеристики ФМ. Приведено математическое описание цифровой коррекции граничной частоты ФВЧ во входной ячейке. Описано устройство и принцип работы обучаемого классификатора, способного разделять ВЗН-каналы на группы по спектральной плотности мощности шума (СПМШ). Проведена коррекция граничной частоты ФВЧ ВЯ БИС считывания для большого количества ВЗН-каналов с разной СПМШ. Рассчитана эффективность применения этой коррекции для увеличения отношения сигнал/шум с учётом проведения стандартной для сканирующих ИК ФМ внутрикадровой обработки. Установлено, что пороговые характеристики без проведения оконной фильтрации в среднем улучшаются на 2,5 %, а с её проведением – всего на 1 %. Отмечено, что при большом количестве ВЗН-каналов с низкочастотным шумом коррекция может ухудшить пороговые характеристики на 1,5 %.

Ключевые слова: пороговые характеристики, фотомодуль, инфракрасный диапазон, режим временной задержки и накопления, шум, отношение сигнал/шум, внутрикадровая обработка, спектральная плотность мощности шума, фильтр верхних частот, граничная частота, многоклассовая классификация данных с независимыми признаками.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-31-38

Введение

Крупноформатные фотоприёмные устройства инфракрасного диапазона (ИК ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) активно используются в составе систем космического мониторинга Земли. Ключевым элементом таких ИК ФПУ являются инфракрасные фотомодули (ФМ), представляющие из себя большую интегральную схему (БИС) считывания, состыкованные с матрицей фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе

теллурида кадмия-ртути. Типовая блок-схема БИС считывания таких ФМ представлена на рис. 1.

Задача БИС считывания – принимать сигналы от МФЧЭ, которая подключена к БИС через микроконтакты (рис. 1, блок 1), и суммировать эти сигналы в определённой временной последовательности, то есть реализовать режим ВЗН.

Когда изображение равномерно перемещается сканером по фотомодулю, сигналы последовательно поступают с ФЧЭ (от 1 до 6) во

входные ячейки (ВЯ) БИС считывания. В этих ячейках происходит первичное накопление и высокочастотная фильтрация сигналов с помощью схем с переключаемыми конденсаторами (рис. 1, блок 2). Высокочастотная фильтрация увеличивает входной динамический диапазон за счёт вычитания разброса постоянной неинформативной составляющей сигналов с МФЧЭ. Затем эти сигналы коммутируются на каждый из входов (от 1 до 1152) ВЗН-регистра (рис. 1, блок 3). В ВЗН-регистре происходит взвешенное суммирование слага-

емых (сигналов), поступающих в разные моменты времени. Работа ВЗН-регистра считается завершённой, когда все 6 сигналов поступают на его входы с равными коэффициентами взвешивания $1/6$. В этом случае работу ВЗН-регистра можно рассматривать как операцию усреднения. Целью такого усреднения является значительное снижение уровня шумов и помех, повышение равномерности и стабильности сигналов от МФЧЭ, а также увеличение динамического диапазона на выходе.

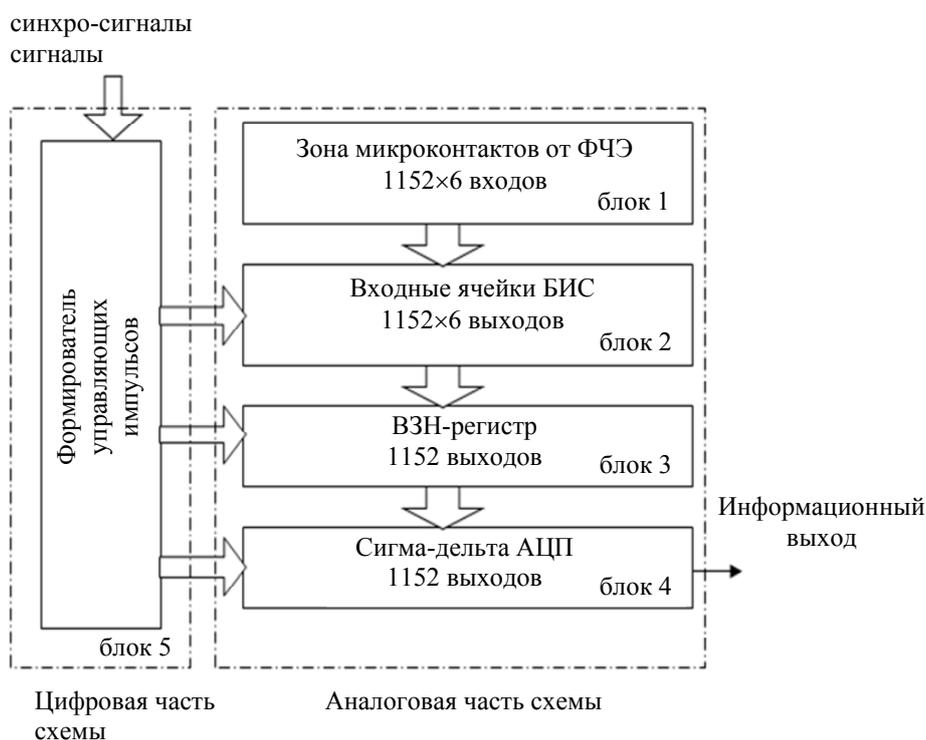


Рис. 1. Типовая блок-схема БИС считывания сканирующих ИК ФМ

Дальнейшие операции, выполняемые в блоке 4 (см. рис. 1), включают в себя:

- аналого-цифровое преобразование (АЦП);
- коммутацию сигналов на информационные выходы БИС.

Координация работы БИС и отбраковка дефектных ФЧЭ осуществляются цифровым блоком формирователя управляющих импульсов (рис. 1, блок 5) [1].

Так как низкочастотный шум значительно ухудшает точность измерения сигнала, получаемого на выходе ИК ФПУ [2], при том, что подавляющая часть спектральной плотности мощности сигнала от малоразмерных объектов, являющихся целевыми объектами

обнаружения для рассматриваемых ИК ФПУ, сосредоточена в области нижних частот, естественным образом возникает идея о необходимости коррекции граничной частоты $f_{\text{гран}}$ фильтра верхних частот ВЯ БИС считывания (далее по тексту – АС фильтр) (рис. 1, блок 2) в сторону её уменьшения. Проведение исследований по подбору оптимальных параметров математического рекурсивного фильтра, обеспечивающего уменьшение исходной граничной частоты АС фильтра со 120 Гц до 30 Гц, описанных в работе [3], показало значительный прирост отношения сигнал/шум (до 9 % для фильтра первого порядка и до 39 % для фильтра второго порядка). Однако в данной работе подбор параметров проводился

всего для одного ВЗН-канала, обладающего приближенным к «белому» спектром шума, хотя в той же работе [3] отмечено, что в реальном ИК ФПУ присутствует большое количество ВЗН-каналов с не «белым» спектром шума, эффективность фильтрации для которых значительно отличается. В связи с этим становится актуальным проведение исследования зависимости эффективности коррекции граничной частоты фильтра верхних частот БИС считывания в контексте увеличения отношения сигнал/шум, для большого количества ВЗН-каналов с различным распределением спектральной плотности мощности шума (СПМШ), чему и посвящена данная работа.

Коррекция граничной частоты

Процедура коррекции граничной частоты АС фильтра подразумевает применение к выходным изображениям ИК ФПУ комбинации из двух рекурсивных цифровых фильтров первого порядка, которые последовательно сначала выпрямляют амплитудно-частотную характеристику (Ф1), после чего она подвергается высокочастотной фильтрации (Ф2), но уже с новой требуемой граничной частотой (рис. 2). АЧХ результирующего фильтра (Ф) (красная кривая) вычислена как произведение АЧХ Ф1 и АЧХ Ф2. Скорректированная при помощи фильтра Ф АЧХ АС фильтра отображена фиолетовой кривой («Рез. АЧХ» на рис. 2).

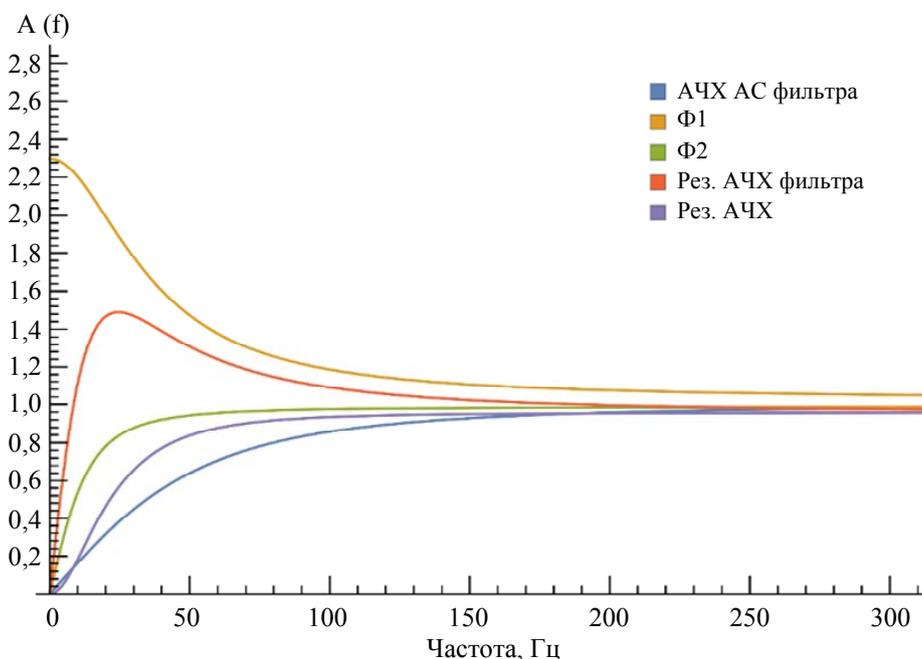


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики изначального АС фильтра, усилителя нижних частот (Ф1), ФВЧ с новой граничной частотой (Ф2), результирующего фильтра второго порядка (Ф), выходных данных после проведённой коррекции (Рез. АЧХ.)

Рекурсивный фильтр первого порядка описывается формулой:

$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + b_1y[n-1], \quad (1)$$

коэффициенты усилителя нижних частот Ф1: $a_0 = 1,061906$, $a_1 = -0,95238$, $b_1 = +0,95238$;

коэффициенты ФВЧ Ф2: $a_0 = +\alpha$, $a_1 = -\alpha$, $b_1 = +\alpha$, $\alpha = 0,975$.

Результирующий фильтр второго порядка Ф задаётся формулой:

$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + a_2x[n-2] + b_1y[n-1] + b_2y[n-2] \quad (2)$$

со следующими коэффициентами: $a_0 = 0,975$, $a_1 = -1,84944$, $a_2 = 0,874438$, $b_1 = 1,92738$, $b_2 = -0,928571$.

После проведения такой частотной коррекции увеличивается сигнал от малоразмерного объекта, так как большая часть его спектральной плотности мощности сосредоточена именно в области низких частот. Шум также

возрастает, однако в случае равномерного или высокочастотного шума это возрастание не пропорционально возрастанию сигнала, вследствие чего отношение сигнал/шум увеличивается, а пороговые характеристики улучшаются. Но если среди ВЗН-каналов преобладают низкочастотные шумы, такая обработка может либо оказаться неэффективной, либо ухудшить пороговые характеристики.

Классификатор СПМШ ВЗН-каналов

Для определения эффективности коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ необходимо проклассифицировать большое количество ВЗН-каналов по четырем основным классам шумов, описанным в работе [4] (элементарные классы):

- 1) шум стандартных ВЗН-каналов («Белый»);
- 2) шум с преобладающей высокочастотной составляющей (Высокочастотный);
- 3) шум с избыточными низкочастотными составляющими (Низкочастотный);
- 4) шум с подъёмом в окрестности 1/3 частоты дискретизации (ВЗН-шум).

Для автоматического осуществления идентификации СПМШ был разработан обучаемый классификатор, позволяющий определить вероятность принадлежности ВЗН-канала к одной из вышеописанных групп.

Исходными данными для классификатора являются зависимости СПМШ ВЗН-каналов от частоты, прошедшие предварительную цифровую обработку, выполняемую в 3 этапа [5]:

- 1) оконная фильтрация с использованием функции медианы в окне радиуса 2;
- 2) оконная фильтрация с использованием функции среднее арифметическое значение в окне радиуса 5;
- 3) нормировка – установление, чтобы среднее значение данных было равно единице.

На основе полученных после предобработки данных вычисляется 3 коэффициента (x_1, x_2, x_3), каждый из которых характеризует принадлежность ВЗН-канала к одной из групп:

1) Коэффициент наклона в низкочастотной области определяется как коэффициент наклона прямой, построенной методом наименьших квадратов (МНК) по данным из области [50; 500] Гц.

2) Коэффициент наклона в основной части СПМШ определяется как коэффициент наклона прямой, построенной МНК по данным из области [500; 1177] \cup [1377; 1915] Гц.

3) Коэффициент, характеризующий ВЗН-шум, определяется следующим образом: по данным из области $\Delta = [1177; 1377]$ Гц при помощи МНК рассчитываются коэффициенты аппроксимирующей параболы. После этого, в зависимости от значения коэффициента перед старшей степенью параболы (a), определяется значение коэффициента ВЗН-шума:

- а) если $a > 0$, то параметр равен 0;
- б) если $a < 0$ и положение максимума параболы находится вне диапазона области Δ , то параметр равен 0;
- в) в противном случае, параметр равен значению коэффициента корреляции данных из области Δ с дискретизированной аппроксимирующей параболой.

Обучение классификатора происходит посредством вычисления характеризующих коэффициентов СПМШ, для которых вручную определён класс, и построения на их основе функций плотности вероятности для каждого класса (рис. 3):

1) Для каждого элементарного класса C_k (белый, высокочастотный, низкочастотный, ВЗН; k – индекс параметра) и для каждого характеризующего коэффициента x производится оценка ширины распределения как медианное абсолютное отклонение, приведенное к значению СКО – $\sigma_{k,x}$.

2) Для каждого элементарного класса C_k и для каждого коэффициента x формируется плотность распределения данного коэффициента: итоговое значение плотности $\rho_{k,x}$ является суммой гауссоид со средним значением, равным значению параметра, и СКО, равным $\sigma_{k,x} \times n$, $n = 1/4$.

3) Полученные плотности распределения нормируются: $\int_{-\infty}^{\infty} \rho_{k,x}(x) dx = 1$.

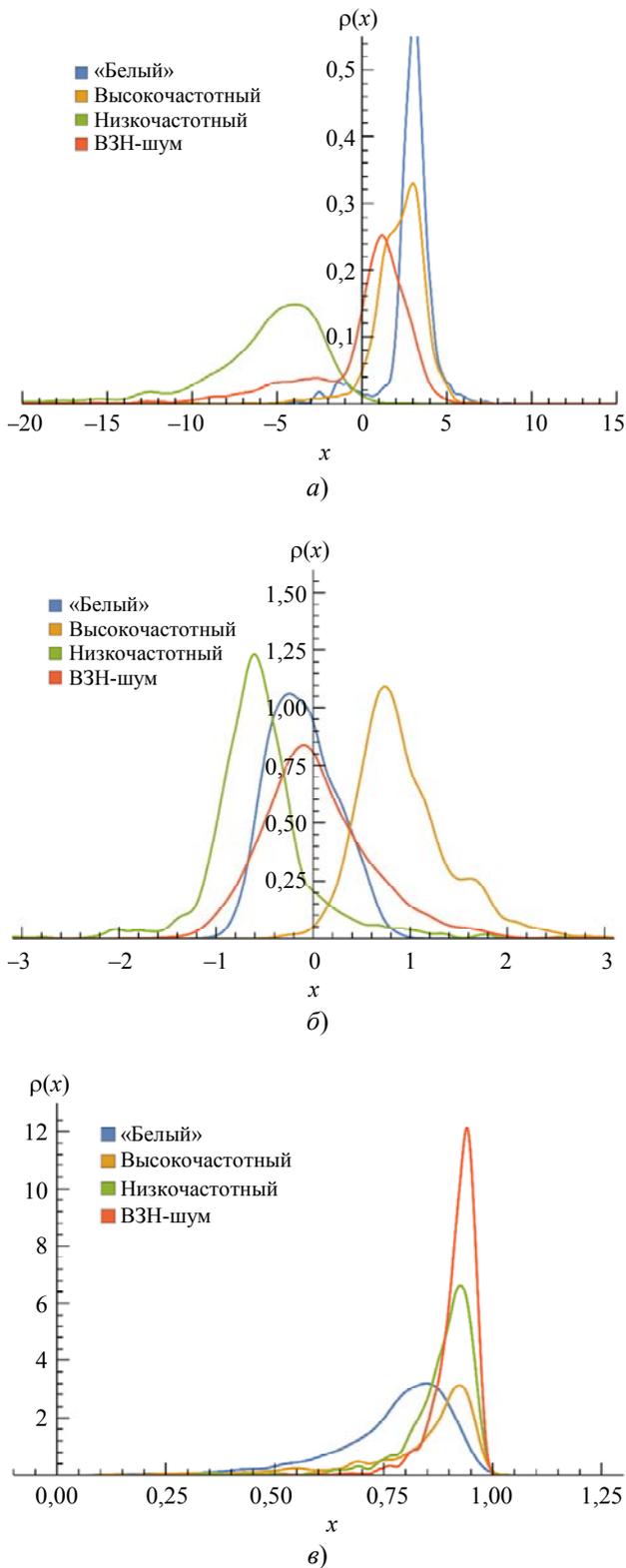


Рис. 3. Функции плотности вероятности каждого элементарного класса СПМШ: а) для коэффициента наклона низкочастотных шумов, б) для коэффициента наклона основной части СПМШ, в) для коэффициента корреляции преобразованных данных и аппроксимирующей параболы

После вычисления характеризующих коэффициентов классифицируемой СПМШ, по

формуле Байеса [6] вычисляется вероятность её принадлежности одному из элементарных классов:

$$P(C_k | \vec{x}) = \frac{P(C_k) \cdot P(\vec{x} | C_k)}{P(\vec{x})}, \quad (3)$$

где $\vec{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ – вектор со значениями параметров (коэффициентов);

$P(C_k)$ – вероятность встречи элементарного класса C_k ;

$P(\vec{x} | C_k)$ – вероятность того, что значение вектора со значениями коэффициентов, равными \vec{x} при условии, что входные данные относятся к классу C_k .

Априорная вероятность гипотезы C_k вычисляется по формуле:

$$P(C_k) = N_k / N \quad (4)$$

где N_k – количество выборок, в которых наблюдался элементарный класс k среди обучающей выборки;

N – общее количество обучающих выборок.

Ввиду независимости коэффициентов друг от друга, условная вероятность наблюдения коэффициентов \vec{x} при условии, что они относятся к элементарному классу C_k вычисляется по формуле:

$$P(\vec{x} | C_k) = \prod_{i=1}^3 \int_{|\xi_i - x_i| \leq \sigma_i \cdot n} \rho_k(\xi_i) d\xi_i. \quad (5)$$

Вероятность $P(\vec{x})$ вычисляется по формуле полной вероятности события, зависящего от нескольких несовместных гипотез:

$$P(\vec{x}) = \sum_{k=1}^4 P(\vec{x} | C_k) \cdot P(C_k). \quad (6)$$

Эффективность применения корректора граничной частоты АС фильтра для ВЗН-каналов с различными СПМШ

При помощи разработанного классификатора были разделены на группы 5760 ВЗН-

каналов из состава одной линейки образца сканирующего ИК ФПУ. При помощи СПМШ этих ВЗН-каналов были сгенерированы временные реализации шума длиной 1937 выборок для каждого из каналов, таким образом, образовав кадр, являющийся имитацией выходного низкофонового изображения ИК ФПУ. Используя шумовой кадр как основу, формируется серия кадров, каждый из которых представляет собой суперпозицию временных реализаций шума и изображения малоразмерного объекта, сфокусированного на один из ВЗН-каналов.

Получившаяся серия кадров параллельно подвергается двум способам цифровой обработки: стандартной (двухточечная коррекция и квазисогласованная с сигналом от малоразмерного объекта оконная фильтрация [7]) и последовательно применённой коррекции граничной частоты и стандартной обработки. Из обработанных кадров рассчитывается отношение сигнал/шум (ОСШ) для каждого ВЗН-канала, после чего находится отношение значений ОСШ, полученных из серии кадров, подвергнутых стандартной обработке с корректором граничной частоты, к значениям ОСШ, полученным из серии кадров, подвергнутых только стандартной обработке. Значения этих отношений характеризуют эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для улучшения пороговых характеристик каждого отдельного ВЗН-канала с учётом их взаимного расположения в линейке (за счёт оконной фильтрации).

Имея информацию о том, к какой группе по форме СПМШ относится каждый ВЗН-канал, можно соотнести эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра со спектром шума и его распространённостью в реальном образце сканирующего ИК ФПУ (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что применение корректирующего фильтра:

- а) для «белого» шума увеличивает ОСШ на 1 %;
- б) для высокочастотного шума увеличивает ОСШ на 2 %;
- в) для низкочастотного шума уменьшает ОСШ на 1,5 %;
- г) для ВЗН-шума увеличивает ОСШ на 1,3 %.

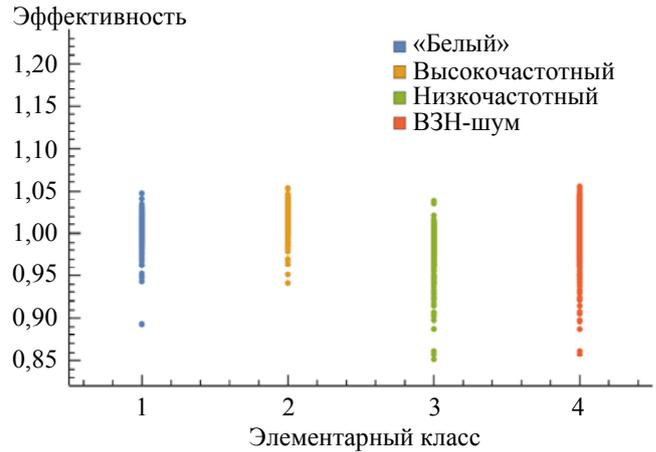


Рис. 4. Эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ с учётом квазисогласованной оконной фильтрации

Однако, если не проводить оконную фильтрацию выходных изображений, ограничив стандартную обработку только двухточечной коррекцией, то эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра будет распределена как показано на рис. 5.

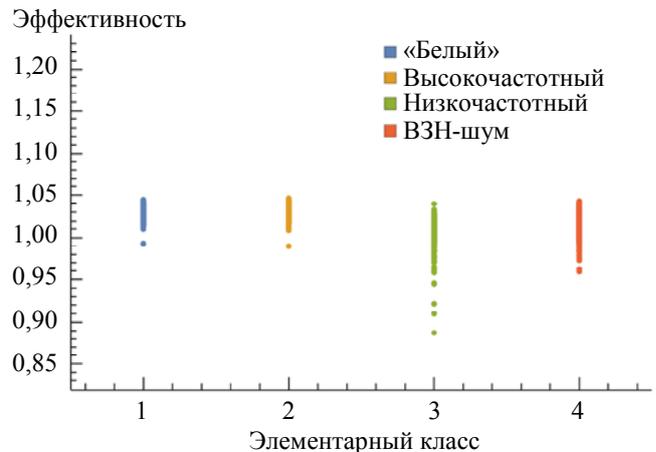


Рис. 5. Эффективность применения коррекции граничной частоты АС фильтра для различных типов СПМШ без учёта квазисогласованной оконной фильтрации

В этом случае применение корректирующего фильтра:

- а) для «белого» шума увеличивает ОСШ на 3 %;
- б) для высокочастотного шума увеличивает ОСШ на 3 %;
- в) для низкочастотного шума увеличивает ОСШ на 1 %;
- г) для ВЗН-шума увеличивает ОСШ на 2,3 %.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что эффективность коррекции граничной частоты АС фильтра в среднем незначительно улучшает пороговые характеристики (до 2,5 %), если оценивать их по исходным выходным изображениям ИК ФПУ. Однако, за счёт «размытия» временных выборок между ВЗН-каналами при применении оконной фильтрации, часто применяющейся с той же самой целью улучшения пороговых характеристик, этот эффект практически нивелируется (до 1 %). Также, в случае преобладания в фотомодуле низкочастотных шумов, коррекция граничной частоты АС фильтра может ухудшить его пороговые характеристики (до 1,5 %), что указывает на высокую специфичность этого вида предобработки выходных сигналов ИК ФПУ.

Заключение

В настоящей работе было проведено исследование влияния формы спектральной плотности мощности шума ВЗН-каналов ИК ФПУ на эффективность коррекции граничной частоты фильтра верхних частот БИС считывания в контексте увеличения отношения сигнал/шум с учётом применения стандартной внутрикадровой цифровой обработки, включающей в себя двухточечную коррекцию неравномерности чувствительности ВЗН-каналов и квазисогласованную с сигналом от малоразмерного объекта оконную фильтрацию. Для определения принадлежности графиков СПМШ ВЗН-каналов к одному из четырёх основных типов был разработан обучаемый классификатор, позволяющий на основании вручную проклассифицированных данных вычислить вероятность принадлежности классифицируемого ВЗН-канала к одной или сразу нескольким группам. При помощи классификатора было проидентифицировано большое количество ВЗН-каналов реального образца сканирующего ИК ФПУ, после чего при помощи их СПМШ была сгенерирована серия кадров, содержащих изображения малоразмерного объекта на каждом из исследуемых ВЗН-каналов. После параллельно проведённой внутрикадровой обработки этих кад-

ров с коррекцией граничной частотой АС фильтра и без неё было произведено сравнение эффективности этой коррекции для улучшения пороговых характеристик для различных типов ВЗН-каналов:

а) в случае применения оконной фильтрации коррекция граничной частоты АС фильтра в среднем увеличивает ОСШ на 1 %;

б) в случае без применения оконной фильтрации коррекция граничной частоты АС фильтра в среднем увеличивает ОСШ на 2,5 %.

Также было показано, что в случае преобладания в фотомодуле ВЗН-каналов с низкочастотными шумами коррекция граничной частоты АС фильтра уменьшает ОСШ на 1,5 %, что в совокупности с низкой эффективностью при применении оконной фильтрации указывает на высокую специфичность этого вида предобработки выходных сигналов ИК ФПУ и невозможность использовать его без предварительной оценки шумовых характеристик используемого прибора. В случае же преобладания в приборе шумов с равномерным или высокочастотным спектром эта коррекция позволяет немного улучшить пороговые характеристики, что тем не менее является удовлетворительным результатом для ИК ФПУ такого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочков В. Д., Дrajнников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 65–70.
2. Деомидов А. Д., Козлов К. В., Полесский А. В., Соломонова Н. А., Фирсенкова Ю. А. / Прикладная физика. 2015. № 4. С. 102–108.
3. Стрельцов В. А., Абилов В. В., Филиппов С. О. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 267–276.
4. Абилов В. В., Стрельцов В. А. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 55–62.
5. Press W. H., et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd ed. – Cambridge University Press, 2007.
6. Zhang M.-L., Pena Jos'e M., Robles Victor / Information Sciences 2009. Vol. 179. № 19. P. 3218–3229.
7. Дrajнников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. / Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566–572.

Efficiency of applying a high-pass filter cutoff frequency corrector used in the infrared focal-plane array with time delay integration mode (IR-FPA)

V. V. Abilov, V. A. Streltsov, and V. V. Savtsov*

RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

*E-mail: vlvsav@yandex.ru

Received 26.12.2025; revised 27.01.2026; accepted 20.02.2026

The fundamental design of the readout integrated circuit (ROIC) of scanning infrared (IR) photomodules (PM) with the time delay integration mode (TDI) is considered. The role and influence of the recursive high-pass filter (HPF) in the input cells (IC) of the readout integrated circuit on the threshold characteristics of the PM are outlined. A mathematical description of the digital correction of the HPF cutoff frequency in the input cell is given. The design and operating principle of a trainable classifier capable of dividing TDI-channels into groups based on the noise power spectral density (NPSD) are described. The cutoff frequency of the HPF of the IC has been corrected for a large number of TDI-channels with different NPSD. The efficiency of applying this correction to increase the signal-to-noise ratio has been calculated, taking into account the standard intra-frame processing for scanning IR PM. It was found that threshold characteristics without window filtering improve by an average of 2.5 %, while with it, they improve by only 1 %. It was noted that with a large number of TDI-channels with low-frequency noise, the digital correction of the HPF cutoff frequency can degrade threshold characteristics by 1.5 %.

Keywords: threshold characteristics, photomodule, infrared range, time delay and integration mode, noise, signal-to-noise ratio, intra-frame processing, noise power spectral density, high-pass filter, cutoff frequency, multi-label classification.

REFERENCES

1. Bochkov V. D., Drajnicov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V., and Solyakov V. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **2** (1), 65–70 (2014) [in Russian].
2. Deomidov A. D., Kozlov K. V., Polesskiy A. V., Solomonova N. A., and Firsenkova U. A., Applied Physics, № 4, 102–108 (2015) [in Russian].
3. Streltsov V. A., Abilov V. V., and Filippov S. O., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (3), 267–276 (2019) [in Russian].
4. Abilov V. V. and Streltsov V. A., Applied Physics, № 3, 55–62 (2023) [in Russian].
5. Press W. H., et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3er ed. Cambridge University Press, 2007.
6. Zhang M.-L., Pena Jos´e M., and Robles Victor, Information Sciences **179** (19), 3218–3229 (2009).
7. Drajnicov B. N., Kuznetsov P. A., Kozlov K. V., and Solyakov V. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **3** (6), 566–572 (2015) [in Russian].

Об авторах

Абилов Владислав Владимирович, к.т.н., главный специалист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: Abilov.V.V.@yandex.ru SPIN-код: 2756-7990, AuthorID: 1233856

Стрельцов Вадим Александрович, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: vadim.streltsov@phystech.edu SPIN-код: 7411-5614, AuthorID: 1242995

Савцов Владимир Валериевич, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: vlvsav@yandex.ru

УДК 53.043, 533.9.072
EDN: NLJLUBPACS: 33.20.Ni; 52.50.Dg; 52.77.-j;
61.30.Hn**Действие неравновесной атмосферной плазмы на гидрофильность
поверхности металлов**© Д. В. Белоплов^{1,*}, В. С. Скакун¹, Д. А. Сорокин^{1,2}, Э. А. Соснин^{1,2}, В. А. Панарин¹,
Б. А. Зайцев²¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, 634055 Россия

* E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, 634050 Россия

Статья поступила в редакцию 21.10.2025; после доработки 7.11.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.5

Определено сравнительное действие неравновесной плазмы атмосферного давления на краевой угол смачивания металлических поверхностей (Cu, нержавеющая сталь, сплав Al-Mg). При этом плазму формировали в апокампическом и наносекундном диффузном разрядах в воздухе и в плазменной струе аргона. Обработка в течение 15, 30, 60, 120 и 240 секунд выявила, что для получения максимальной гидрофильности во всех случаях достаточно 30–60 сек. Более простые в технической реализации апокампический разряд в воздухе и импульсный разряд в потоке аргона не уступают по способности к увеличению гидрофильности наносекундному атмосферному разряду. Отмечено частичное сохранение гидрофильных свойств в течение суток после всех трёх типов обработки.

Ключевые слова: апокампической разряд, вакуумное ультрафиолетовое излучение, наносекундный диффузный разряд, неравновесная низкотемпературная плазма, плазменная струя.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-39-47

Введение

Плазма атмосферного давления – перспективный агент для управления свойствами поверхности различных материалов (органических, неорганических, металлов). В частности, известно, что очистка и активация поверхности плазмой увеличивает адгезионные свойства на границах раздела «металл–металл» и «металл–полимер» примерно в 3,4 раза [1, 2]. Источниками такой плазмы традиционно являются дуговой, коронный и барьерный разряды, а также различные варианты т. н. плазменных струй атмосферного давления, в которых поток плазмы формируется в разрядном промежутке (возбуждение осуществляют радиочастотным, коронным, тлеющим или барьерным разрядом), после чего выталкивается через узкий капилляр или щель

за счет избыточного давления в зоне разряда, превышающего атмосферное [3–5].

В задаче управления краевым углом смачивания поверхности чаще всего изучаются полимерные и биологические материалы, применяемые в фотонике и микроэлектронике [6, 7]. Значительно меньше исследований посвящено управлению краевым углом смачивания металлов, хотя преимущества такой обработки по сравнению, например, с плазменной активацией при пониженных давлениях понятны: установки для получения плазменных струй мобильны и работают в нормальных условиях, позволяя воздействовать как на гладкие, так и профилированные поверхности.

В частности, получены данные о воздействии атмосферной плазмы на такие материалы, как Al, Cu, Cr, сталь (AISI 304L) и оцинкованная сталь (H300LAD) [8–12]. Во всех

этих случаях плазменная обработка уверенно увеличивала гидрофильность поверхностей.

В настоящем исследовании для придания гидрофильных свойств поверхности металлов мы будем использовать три источника атмосферной неравновесной плазмы, которые для этой цели ранее не применялись. Это – источники на основе апокампиического разряда в воздухе [13, 14], наносекундного диффузного разряда в воздухе [15] и новый источник вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения, формируемого в потоке аргона [16, 17]. Все три источника продуцируют активные частицы кислорода и азота на границе стримерного канала (плазменной струи) и окружающего воздуха или непосредственно в диффузном разряде. Кроме того, первый и второй источники преимущественно излучают ультрафиолет во второй положительной системе азота (переходы $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$), а третий – на переходах $3s^2P-2p^2P^\circ$ и $3s^2P-2p^2D^\circ$ атомарного азота на 174,3 и 149,3 нм, соответственно.

Цель работы – оценка способности указанных источников плазмы к достижению максимального и долговременного изменения гидрофильности металлических поверхностей (Cu, сталь, сплав Al-Mg) с учётом того, что ранее они для этой цели не применялись.

Экспериментальные установки и методики

Объекты и способы обработки. Объектом воздействия были металлические фольги меди, нержавеющей стали и сплава алюминия и магния (97 % Al, 3 % Mg), толщиной 20, 100 и 50 мкм, соответственно. Все эти материалы широко распространены в производстве. Прямоугольные образцы фольг (15×15 мм) размещались на пути распространения стримера апокампиического разряда, аргоновой плазменной струи или в области действия диффузного разряда на различных расстояниях x от электродной системы (рис. 1).

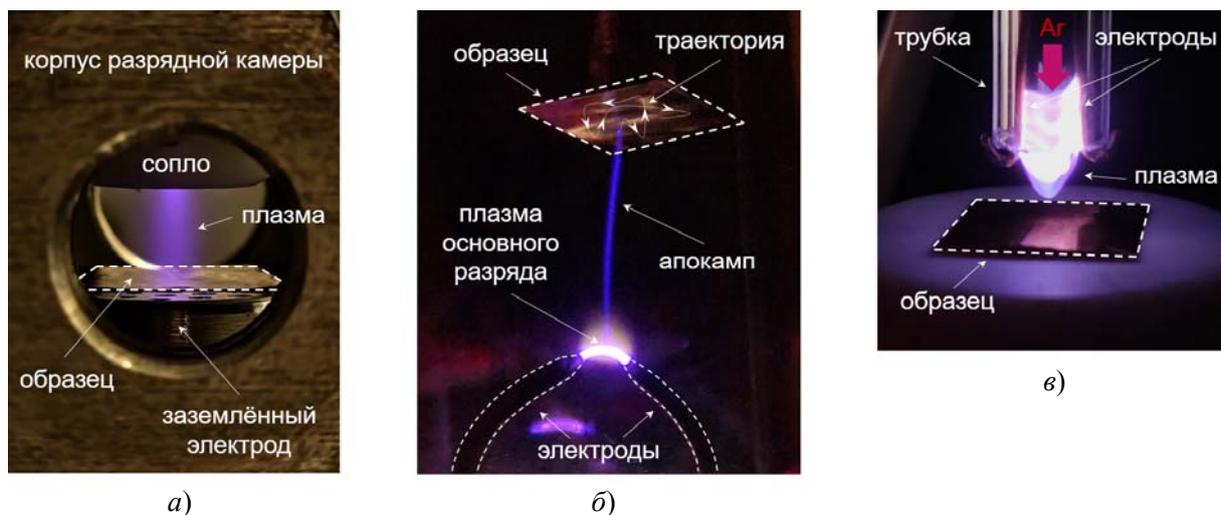


Рис. 1. Фотографии разрядных систем в процессе обработки образцов (15×15 мм) из меди:
 (а) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении при частоте следования импульсов 100 Гц, выдержка 1/90 сек, (б) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, выдержка 1/30 сек, (в) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения, выдержка 1/30 сек

Наносекундный разряд [15] формировался в промежутке острей–плоскость, расположенном внутри коаксиальной разрядной камеры (рис. 1а). На электрод диаметром 6 мм из нержавеющей стали, конец которого имел коническую форму с углом раствора 60 градусов, подавались импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой –25 кВ и длительностью 4 нс. Частота следования

импульсов напряжения составляла 100 Гц. Ответный заземлённый электрод имел форму цилиндра диаметром 20 мм. Расстояние между электродами составляло 6 мм. Образцы металлических фольг, подвергавшиеся воздействию плазмы наносекундного разряда, помещались на торец заземлённого электрода. Вдоль оси разрядного промежутка осуществлялась прокачка воздуха с помощью мем-

бранного насоса и специального сопла, надеваемого на высоковольтный электрод. Скорость прокачки не превышала 5 л/мин.

Апокампиский разряд формировался между заострёнными стержнями диаметром 2 мм из нержавеющей стали, которые были ориентированы навстречу друг другу (рис. 1б). Расстояние между ними составляло 4 мм. На один из электродов подавались импульсы напряжения положительной полярности амплитудой 10 кВ и длительностью 1 мкс, а частота следования импульсов составляла 27 кГц. Ответный электрод был соединён с обкладкой конденсатора ёмкостью 10 пФ, вторая обкладка которого была заземлена. Эта электрическая схема имеет принципиальное значение для формирования апокампиского разряда [18]. На стадии роста напряжения (0,5 мкс) происходил пробой промежутка (за десятки нс) между стержнями, формируя разрядный канал с характерным тёмным пространством вблизи катода и протяжённым положительным столбом. По мере роста напряжения конденсатор заряжался почти до напряжения холостого хода генератора (с учётом падения напряжения в канале плазмы, как на активной нагрузке). От изгиба разрядного канала, имеющего положительный потенциал, стартовал положительный стример в направлении, перпендикулярном оси разрядного промежутка. Таким образом, формировался апокамп длиной 2–3 см, визуально напоминающий т. н. плазменную струю (рис. 1б). Образцы металлических фольг помещались на пути распространения апокампа на расстоянии 2 см от электродов. Воздействие плазмы апокампа осуществлялось при непосредственном контакте его вершины, хаотично перемещающейся по поверхности образцов.

Импульсный разряд в потоке аргона зажигался между параллельными проволочками внутри кварцевой трубки длиной 50 мм и внутренним диаметром 6 мм (рис. 1в). Через кварцевую трубку прокачивался аргон (99,99 % чистоты) со скоростью 2 л/мин. Одна из проволочек была заземлена. Вторая проволочка подключалась к высоковольтному выходу импульсного генератора (амплитуда 10 кВ, длительность 1 мкс, частота следования импульсов 27 кГц) через конденсатор ёмкостью 10 пФ. В результате между проволочками

формировался разрядный канал, скользящий вдоль проволочек в направлении потока аргона. На конечном этапе разрядный канал «выныривал» из торца трубки на расстояние 5–7 мм и обрывался, после чего процесс повторялся. Напомним, что ранее было показано, что в плазме такого разряда генерируется ВУФ-излучение (174,3 и 149,3 нм) на переходах атомарного азота ($3s^2P - 2p^2P^0$ и $3s^2P - 2p^2D^0$) [17], образующихся при диссоциации молекулярного азота, содержащегося в баллоне с аргоном в виде примеси, а также при выдавливании разрядного канала из торца кварцевой трубки в атмосферу. Образцы металлических фольг помещались на расстоянии 8–10 мм от торца трубки так, что плазменный канал не касался их поверхности (рис. 1в). Однако ВУФ-излучение могло достигать поверхности образцов за счёт вытеснения воздуха потоком аргона, прозрачного для ВУФ-излучения.

Образцы обрабатывались плазмой в течение 15, 30, 60, 120 и 240 секунд. Всего было 15 образцов каждого металла. Измерения краевого угла смачивания проводились сразу после обработки и через сутки.

Измерение краевого угла смачивания (θ) поверхности металлических образцов выполнялось с использованием статического метода лежачей капли [19] и дистиллированной водой в качестве тестовой жидкости.

Измерительный стенд был собран таким образом, чтобы обеспечить высокую точность регистрации профиля капли. Для этого исследуемый образец помещался на трёхкоординатный столик с микрометрическими винтами для точного позиционирования. Непосредственно над образцом фиксировался шприц с дистиллированной водой.

Процедура нанесения капли заключалась в формировании на кончике иглы капли дистиллированной воды диаметром 1,25 мм ($V \approx 1$ мкл), после чего столик плавно перемещался вверх до момента аккуратного контакта и переноса капли на обработанную (центральную) часть поверхности образца, что минимизировало динамические эффекты. Диаметр капли контролировался предварительно откалиброванной цифровой экранной линейкой.

Освещение осуществлялось рассеянным излучением полупроводникового лазерного диода ($\lambda = 652$ нм) без коллиматора, прошед-

шим через матовое стекло, что обеспечивало равномерный и контрастный фон для чёткого выделения профиля капли.

Профиль лежащей на поверхности образца капли фотографировался сбоку с помощью полнокадрового цифрового фотоаппарата EOR S (Canon Ltd, Япония) с длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax с фокусом CentriTel и объективом CF-3 (Infinity Photo-Optical Company, США), имеющего высокое (до 1,7 мкм) пространственное разрешение. Это обеспечивало необходимую детализацию границ раздела «капля-воздух-образец». Изображение с фотоаппарата передавалось на компьютер в режиме реального времени по Wi-Fi каналу.

Краевой угол смачивания определялся на основе полученных изображений с использованием программного обеспечения ImageJ [20] с установленным плагином Contact Angle [<https://imagej.net/ij/plugins/contact-angle.html>]. Данный плагин позволял провести математическую аппроксимацию профиля капли и вычислить угол между касательной к профилю капли в точке контакта и базовой линией (поверхностью образца). Для повышения статистической достоверности и учёта возможной неоднородности поверхности, измерение θ проводилось 2–4 раза на различных участках каждого образца. Конечный результат представлялся в виде среднего значения по всем измерениям, а также рассчитывалась случайная ошибка при доверительной вероятности 0,95, что позволяло оценить точность и воспроизводимость полученных данных. В зависимости от способа и режима обработки образцов относительная случайная ошибка измерений краевого угла смачивания могла составлять от 10 до 40 %.

Результаты и их обсуждение

Вначале были измерены краевые углы смачивания исходных необработанных плазмой образцов меди, нержавеющей стали и сплава алюминия с магнием. Так, исходные значения θ_0 для меди, нержавеющей стали и сплава алюминия с магнием составили, соответственно, $97,0 \pm 3,6^\circ$, $75,5 \pm 3,3^\circ$, $72,9 \pm 3,4^\circ$. Полученные значения позволяют охарактеризовать исходную поверхность каждого образ-

ца. Так, поверхность образца из медной фольги можно считать слабо гидрофобной, поскольку среднее значение краевого угла превышает 90° . Как правило, для чистых металлов характерна гидрофильность. Гидрофобный же характер образца из меди, вероятно, обусловлен наличием адсорбированных органических загрязнений, что снижает поверхностную энергию. Поверхность образцов нержавеющей стали и из сплава Al-Mg можно охарактеризовать как гидрофильную (краевой угол смачивания значительно ниже 90°). Эти свойства, вероятно, определяются наличием оксидных плёнок, связи «металл – кислород» в которых полярны и могут взаимодействовать с диполями – молекулами воды.

На рисунке 2 представлены зависимости значений краевого угла смачивания исследуемых образцов сразу же после обработки всеми способами.

Анализ полученных зависимостей краевого угла смачивания, измеренного сразу после обработки, выявляет ключевую закономерность, общую для всех образцов и способов обработки, а именно – воздействие плазмы всех трёх видов разряда (апокампиский разряд в воздухе, наносекундный разряд в воздухе и импульсный разряд в Ar с ВУФ) приводит к значительному снижению краевого угла смачивания, что свидетельствует об увеличении гидрофильности поверхности образцов.

Рассмотрим подробно результаты для каждого способа обработки поверхности образцов. При воздействии на образцы плазмой апокампа наиболее сильный эффект снижения краевого угла наблюдается для сплава Al-Mg. Так, исходное значения $\theta_0 \approx 73^\circ$ снизилось до примерно 20° уже после 30 секунд обработки. Даже после 15 секунд воздействия угол смачивания снижается до 28° . Для меди и нержавеющей стали снижение краевого угла смачивания также существенно. При этом медь демонстрирует наибольшую разницу между исходным углом (97°) и после воздействия (32°). Наиболее резкое снижение θ происходит при коротких временах обработки (15–60 с). Дальнейшее увеличение длительности обработки (до 240 с) приводит к более умеренному дополнительному снижению или стабилизации угла с учётом случайной ошибки измерений, что указывает на достижение некоего предела модификации поверхности.

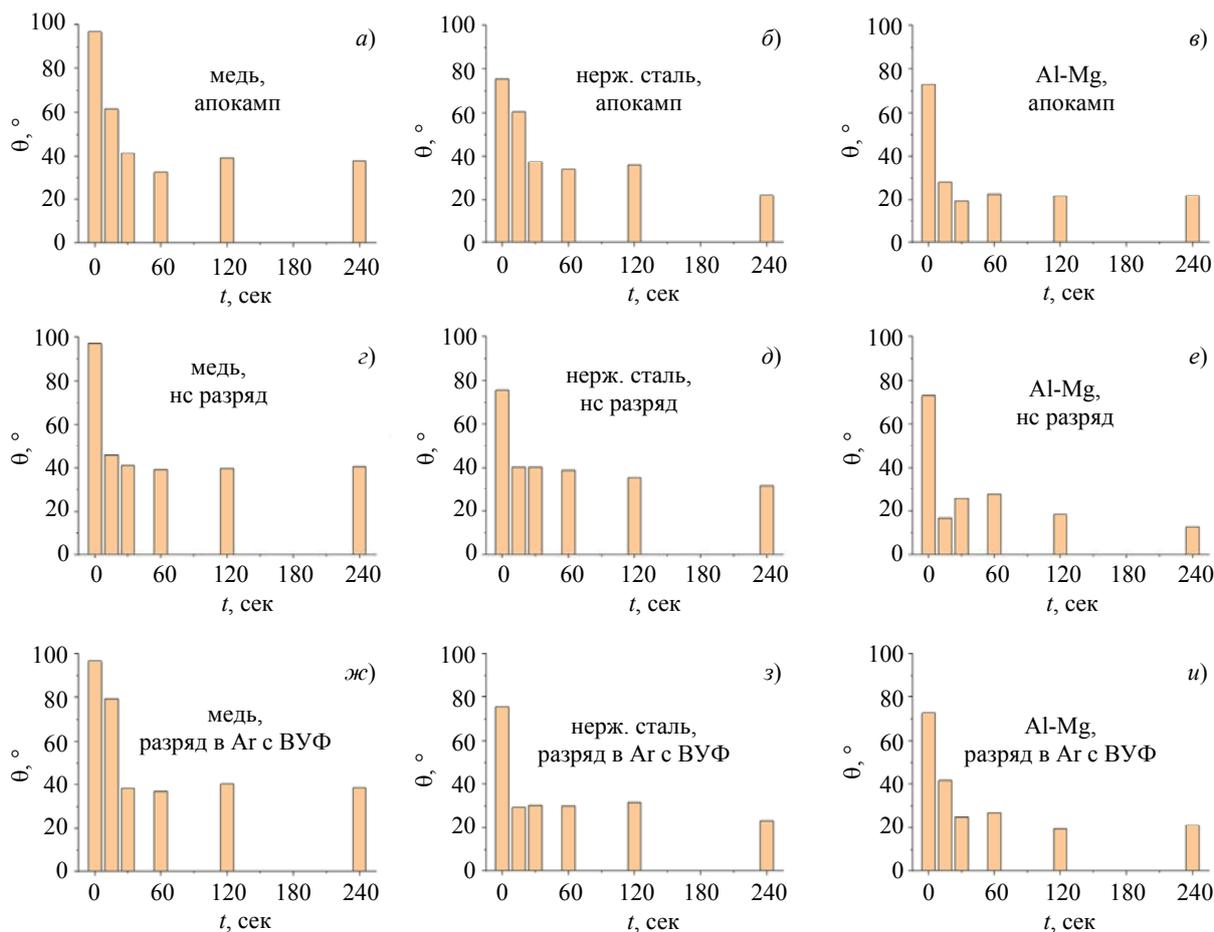


Рис. 2. Зависимости краевого угла смачивания поверхности образцов от длительности и способа обработки сразу после обработки: (а–в) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, (г–е) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении, (ж–и) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения. Материал образцов: (а, г, ж) медь, (б, д, з) нержавеющая сталь, (в, е, и) сплав Al-Mg

При обработке образцов плазмой наносекундного разряда также достигается максимальная (во всей проведенной серии опытов) гидрофилизация поверхности. Сплав Al-Mg вновь демонстрирует наименьшие значения θ вплоть до 13° . С учётом случайной ошибки (десятки %) абсолютное снижение θ при воздействии плазмы наносекундного разряда сопоставимо с результатами, получаемыми при воздействии плазмы апокампа. Для меди и нержавеющей стали конечные значения θ также сопоставимы с тем, что получилось при воздействии плазмы апокампа. Кроме того, как и в случае апокампа, основное снижение угла смачивания достигается за первые 30–60 с, после чего наблюдается стабилизация или незначительные изменения.

При обработке образцов плазмой импульсного разряда в потоке аргона, сочетающего в себе также воздействие ВУФ-излучения, все три металла также быстро достигают

низких значений θ ($\approx 20\text{--}30^\circ$) при времени обработки 30 с и более. При этом нержавеющая сталь демонстрирует наиболее быстрый отклик на воздействие по сравнению с другими металлами и разрядами: при длительности обработки 15 с θ достигает $\approx 30^\circ$. Это может указывать на особую чувствительность оксидной плёнки нержавеющей стали к ВУФ-излучению или активным частицам из потока аргона. Для сравнения медь за 15 с воздействия показывает снижение краевого угла смачивания всего до $\approx 80^\circ$. Однако при 30 с и более происходит резкое уменьшение θ до $36\text{--}40^\circ$ с последующей стабилизацией. Сплав Al-Mg показывает лучшие результаты. Эффективное снижение θ до $\approx 20\text{--}25^\circ$ достигается после 30 с воздействия.

На рисунке 3 представлены значения краевого угла смачивания исследуемых образцов, полученные через сутки после обработки.

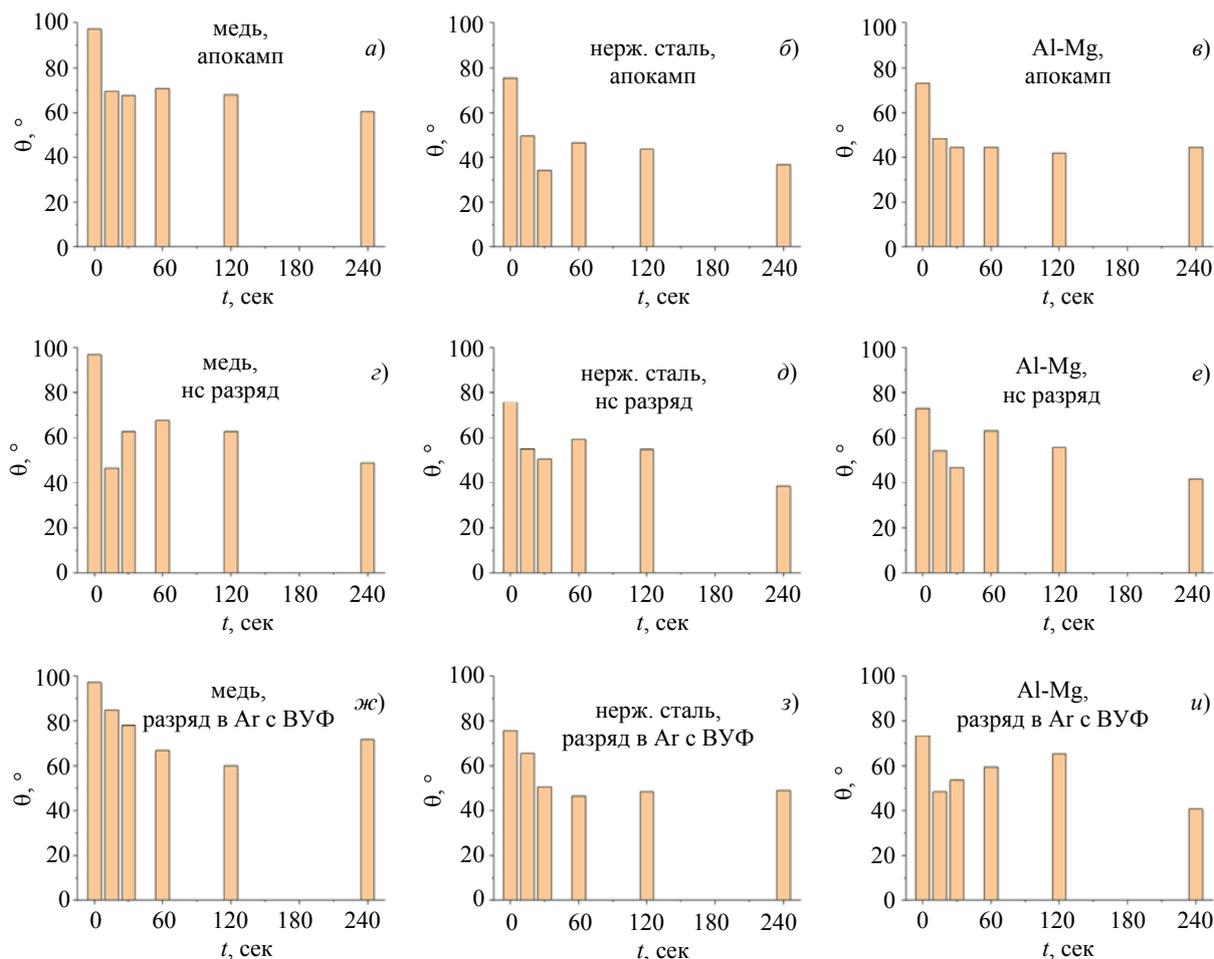


Рис. 3. Краевые углы смачивания поверхности образцов при различных длительности и способах обработки через сутки после обработки: (а–в) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, (г–е) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении, (ж–и) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения. **Материал образцов:** (а, г, ж) медь, (б, д, з) нержавеющая сталь, (в, е, и) сплав Al-Mg

Измерения, проведённые через сутки после обработки, показывают общее для всех образцов и всех способов обработки частичное восстановление краевого угла смачивания, специфичное по отношению к применяемым материалам.

Так, для случая обработки плазмой апокампа быстрее всего восстановление краевого угла смачивания наблюдается у образцов из меди. Значения θ восстанавливаются до $60\text{--}70^\circ$ при всех длительностях обработки. Для нержавеющей стали и сплава Al-Mg восстановление более умеренное. Углы находятся в диапазоне $40\text{--}50^\circ$. Следует отметить, что чёткой зависимости конечного угла от длительности обработки не наблюдается. Возможно такая зависимость может проявиться при измерениях краевого угла смачивания через минуты–часы после воздействия.

В случае обработки образцов плазмой наносекундного разряда степень восстановле-

ния θ для меди и нержавеющей стали сопоставима с апокампом, с конечными значениями θ в диапазоне $50\text{--}70^\circ$ для меди и $40\text{--}60^\circ$ для нержавеющей стали. Сплав Al-Mg показывает чуть менее выраженное восстановление, значения θ остаются в диапазоне $40\text{--}55^\circ$.

Наиболее сильное восстановление значений θ (до $70\text{--}80^\circ$) наблюдается для меди спустя сутки после воздействия продуктами импульсного разряда в потоке аргона, сочетающего в себе также испускание ВУФ-излучения. Это может свидетельствовать о том, что увеличение гидрофильности поверхности достигается именно за счёт ВУФ-модификации, эффект от которой менее устойчив. Для нержавеющей стали и сплава Al-Mg восстановление θ также наблюдается, но конечные значения θ остаются относительно низкими ($\approx 50\text{--}60^\circ$).

Полученные данные свидетельствуют, что в наших экспериментах изменение смачи-

ваемости металлических образцов – это результат комплексного воздействия (продуктов плазмы и ВУФ-излучения). Их вклад зависит от типа разряда и материала. В случае прямого воздействия на поверхность образцов плазмой апокампа и наносекундного разряда в воздухе высокоактивные частицы плазмы (активные формы азота и кислорода, радикалы и ионы), вероятно, эффективно разрушают и удаляют с поверхности образцов слабосвязанные загрязнения. Затем длительное пребывание на открытом воздухе приводит к реадсорбции загрязнений/пыли высокоэнергетичной поверхностью. Кроме того, при прямом контакте воздушной плазмы с поверхностью может происходить химическая модификация в результате взаимодействия с теми же активными формами азота и кислорода. Происходит образование новых полярных кислородсодержащих функциональных групп (например, оксидов) на поверхности металла, значительно повышая поверхностную энергию и, следовательно, гидрофильность.

В случае же воздействия на образцы продуктами импульсного разряда в потоке аргона, включающего в себя также действие ВУФ-излучения, могут происходить как фотохимические реакции на поверхности, вызывающие разрушение загрязнений и образование радикалов, так и реакции с метастабильными частицами аргона и молекул азота. Эти факторы могут модифицировать структуру или химический состав имеющихся оксидных и других плёнок.

Заключение

Три источника неравновесной плазмы атмосферного давления с различным спектральным составом и предположительно различным содержанием количественным составом активных компонент, впервые использованы для увеличения гидрофильности металлических поверхностей (Cu, нержавеющая сталь, сплав Al-Mg). Показано, что краевой угол смачивания падает до минимума за 30–60 секунд, не изменяясь при больших экспозициях с учётом ошибки измерений.

Измерения, проведённые через сутки после обработки, показывают общее для всех образцов и всех способов обработки частич-

ное восстановление краевого угла смачивания, специфичное по отношению к применяемым материалам. Полученные данные являются первичными для последующего выявления физических факторов, влияющих на гидрофильность поверхности металлов.

С точки зрения выбора источника (из взятых для исследования), обеспечивающего максимальное и долговременное изменение гидрофильности можно заключить следующее:

– по сравнению с наносекундным разрядом, апокампический разряд обеспечивает сопоставимое долговременное изменение гидрофильности поверхностей металлов и его технически проще реализовать (не нужна техника формирования наносекундных импульсов и не требуется согласование импедансов выхода генератора, передающей линии и нагрузки);

– источник ВУФ-излучения, формируемого в потоке аргона позволяет точно локализовать место воздействия по сравнению с апокампическим разрядом.

Поэтому в дальнейшем для обработки иных металлических поверхностей, в частности, применяемых в медицине, следует сделать выбор в пользу сравнительно простых в эксплуатации источников – апокампического разряда и источника ВУФ-излучения, формируемого в потоке аргона.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-79-31008,
<https://rscf.ru/project/25-79-31008/>*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Massines F., Rabehi A., Decomps P., Gadri R. B., Segur P., Mayoux C. / J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 2950.
2. Klages C.-P., Hopfner K., Klake N., Thyen R. / Proc. Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Chemistry, Hakone VII. 2000. P. 429.
3. Tendero C., Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. / Spectrochimica Acta Part B. 2006. Vol. 61. P. 2.
4. Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Park J. Y., Selwyn G. S., Hicks R. F. / IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. P. 1685.
5. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., Fang Z. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 726.
6. Penkov O. V., Khadem M., Lim W.-S., Kim D.-E. / J. Coat. Technol. Res. 2015. Vol. 12. P. 225.

7. Сидорова С. В., Моисеев К. М., Васильев Д. Д., Назаренко М. В., Михайлова И. В. / Фотоника. 2022. Т. 16. С. 288.
8. Kim M. C., Yang S. H., Boo J. H., Han J. G. / Surf. Coat. Technol. 2003. Vol. 174–175. P. 839.
9. Tang S., Kwon O. J., Lu N., Choi H. S. / Korean J. Chem. Eng. 2004. Vol. 21. P. 1218.
10. Prysiaznyy V. / J. Surf. Eng. Mat. Adv. Technol. 2013. Vol. 3. P. 138.
11. Liu X., Chen F., Huang Sh.-A., Yang X.-L., Lu Y., Zhou W. L., Xu W.-J. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 1959.
12. Kanbir Ö., Ayas K., Çavdar K. / Materials Testing. 2025. Vol. 67. P. 875.
13. Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бакут Е. Х. / Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 857.
14. Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. А., Тарасенко В. Ф. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 32.
15. Сорокин Д. А., Белоплотов Д. В., Гришков А. А., Шкляев В. А., Тарасенко В. Ф., Беломытцев С. Я., Ломаев М. И. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. – Томск: СГТ, 2020.
16. Соснин Э. А., Панарин В. А., Панченко А. Н., Скакун В. С., Сорокин Д. А. Способ получения вакуумного ультрафиолетового излучения. Патент RU 2844454 С1. Заявка № 2024119294. Приоритет: 10.07.2024. Опубл.: 30.07.2025. Бюл. № 22.
17. Панченко А. Н., Белоплотов Д. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Сорокин Д. А. / Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133. С. 719.
18. Соснин Э. А., Бабаева Н. Ю., Кожевников В. Ю., Козырев А. В., Найдис Г. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. / УФН. 2021. Т. 191. С. 199.
19. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976.
20. Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W. / Nat. Methods. 2012. Vol. 9. P. 671.

PACS: 33.20.Ni; 52.50.Dg; 52.77.-j; 61.30.Hn

Effect of non-equilibrium atmospheric plasma on the hydrophilicity of metal surfaces

D. V. Beloplotov^{1,*}, V. S. Skakun¹, D. A. Sorokin^{1,2}, E. A. Sosnin^{1,2}, V. A. Panarin¹, and B. A. Zaitsev²

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055 Russia
*E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

² Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

Received 21.10.2025; revised 7.11.2025; accepted 20.02.2026

The comparative effect of non-equilibrium atmospheric pressure plasma on the contact angle of metal surfaces (Cu, stainless steel, Al-Mg alloy) was determined. The plasma was generated using apokampic and nanosecond diffuse discharges in air and in an argon jet. Treatment for 15, 30, 60, 120 and 240 sec revealed that a 30–60 sec treatment is sufficient in all cases to achieve maximum hydrophilicity. The apokampic discharge in air and the pulsed discharge in an argon flow, which are simpler in technical implementation, are not inferior to the nanosecond atmospheric discharge in their ability to increase hydrophilicity. Partial preservation of the hydrophilic properties was noted for 24 hours after all three types of treatment.

Keywords: apokampic discharge, vacuum ultraviolet radiation VUV, nanosecond diffuse discharge, non-equilibrium low-temperature plasma, plasma jet.

REFERENCES

1. Massines F., Rabehi A., Decomps P., Gadri R. B., Segur P., and Mayoux C., J. Appl. Phys. **83**, 2950 (1998).
2. Klages C.-P., Hopfner K., Klake N., and Thyen R. Proc. Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Chemistry, Hakone VII. 2000, p. 429.
3. Tendero C, Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., and Leprince P., Spectrochimica Acta Part B **61**, 2 (2006).

4. Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Park J. Y., Selwyn G. S., and Hicks R. F., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 1685 (1998).
5. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., and Fang Z., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 726 (2015).
6. Penkov O. V., Khadem M., Lim W.-S., and Kim D.-E., *J. Coat. Technol. Res.* **12**, 225 (2015).
7. Sidorova S. V., Moiseev K. M., Vasilev D. D., Nazarenko M. V., and Mikhailova I. V., *Photonics* **16**, 288 (2022).
8. Kim M. C., Yang S. H., Boo J. H., and Han J. G., *Surf. Coat. Technol.* **174–175**, 839 (2003).
9. Tang S., Kwon O. J., Lu N., and Choi H. S., *Korean J. Chem. Eng.* **21**, 1218 (2004).
10. Prysiashnyi V., *J. Surf. Eng. Mat. Adv. Technol.* **3**, 138 (2013).
11. Liu X., Chen F., Huang Sh.-A., Yang X.-L., Lu Y., Zhou W. L., and Xu W.-J., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 1959 (2015).
12. Kanbir Ö., Ayas K., and Çavdar K., *Materials Testing.* **67**, 875 (2025).
13. Sosnin E. A., Skakun V. S., Panarin V. A., Pechenitsin D. S., Tarasenko V. F., and Baksht E. Kh., *JETF Letters.* **103**, 761 (2016).
14. Andreev M. V., Kuznetsov V. S., Skakun V. S., Sosnin E. A., Panarin V. A., and Tarasenko V. F., *Applied Physics*, № 6, 32 (2016) [in Russian].
15. Sorokin D. A., Beloplotov D. V., Grishkov A. A., Shklyayev V. A., Tarasenko V. F., Belomyttsev S. Ya., and Lomaev M. I. High-voltage nanosecond discharge in an inhomogeneous electric field and its properties. Tomsk, STT, 2020 [in Russian].
16. Sosnin E. A., Panarin V. A., Panchenko A. N., Skakun V. S., and Sorokin D. A. Sposob polucheniya vakuumnogo ul'trafiol'tovogo izlucheniya. Patent RU 2844454 C1. Application № 2024119294. Priority: 10.07.2024. Published: 30.07.2025. *Bull.* 22.
17. Panchenko A. N., Beloplotov D. V., Panarin V. A., Skakun V. S., and Sorokin D. A., *Optics and Spectroscopy* **133**, 719 (2025) [in Russian].
18. Sosnin E. A., Babaeva N. Yu., Kozyrev A. V., Kozhevnikov V. Yu., Naidis G. V., Skakun V. S., Panarin V. A., and Tarasenko V. F., *Phys. Usp.* **64**, 191 (2021).
19. Summ B. D. and Goryunov Yu. V. *Physico-chemical bases of wetting and spreading.* Moscow, Khimiya, 1976 [in Russian].
20. Schneider C. A., Rasband W. S., and Eliceiri K. W., *Nat. Methods.* **9**, 671 (2012).

Об авторах

Белоппотов Дмитрий Викторович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: dv.beloplotov@hcei.ru SPIN-код: 1677-3530, AuthorID: 688871

Скакун Виктор Семенович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: vs.skakun@hcei.ru SPIN-код: 8772-3430, AuthorID: 40357

Сорокин Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3); Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: da.sorokin@hcei.ru SPIN-код: 6447-6366, AuthorID: 614296

Соснин Эдуард Анатольевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3); Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: ea.sosnin@hcei.ru SPIN-код: 1546-9106, AuthorID: 40356

Панарин Виктор Александрович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: va.panarin@hcei.ru SPIN-код: 4482-5747, AuthorID: 505811

Зайцев Богдан Александрович, магистрант, Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: bogdanzaitsev683@gmail.com

УДК 52.77
EDN: OARCOA

PACS: 52.80.Hc

Нитризация почвы коронным разрядом

© В. Л. Бычков*, И. Г. Степанов, П. А. Горячкин, А. П. Шваров, Д. В. Бычков,
А. А. Логунов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

* E-mail: bychvl@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9.09.2025; после доработки 19.11.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9

Проведены экспериментальные и теоретические исследования возможности нитризации дерновоподзолистой почвы. Полученные экспериментальные результаты показывают, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост их концентрации за 2 часа обработки до 14,5 мг/л и дальнейшим снижением концентрации при обработке 4 часа 12,8 мг/л, по отношению к контрольному значению 9 мг/л. Расчеты показывают рост концентрации в плазме азотных компонентов. Их нарабатываемые концентрации достигают $5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов за время эксперимента. Результаты подтверждают идею о возможности использования коронного разряда для нитризации бедных почв.

Ключевые слова: нитризация, дерновоподзолистая почва, электропроводность, нитраты, воздух, эксперимент, расчеты.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-48-53

Введение

Задачи по обработке почвы газовым разрядом представляются актуальными с точки зрения приложений в сельском хозяйстве. Они связаны с обеззараживанием воздуха, зерна, улучшением плодородия почвы, модификации ее компонентов, изменением их проводимости, химического состава, генерацией в них активных частиц [1–7]. Наша работа посвящена этим вопросам. В ней мы исследуем вопрос насыщения почвы компонентами азота, т. е. может ли воздействие коронного разряда приводить к нитрификации почвы.

Как известно, [2] азот – важнейший питательный элемент всех растений: он входит в состав таких важных органических веществ, как белки, нуклеиновые кислоты, нуклеопр-

теиды, хлорофилл, алкалоиды, фосфатиды и др. Содержание азота в растениях существенно изменяется в зависимости от вида растений, их возраста, почвенно-климатических условий выращивания культуры и т. д. Доступные растениям азотистые соединения образуются главным образом из органического вещества почвы в результате его разложения. Запасы азота в почве пополняются в основном в результате азотфиксирующей деятельности свободноживущих и клубеньковых микроорганизмов и поступления его с атмосферными осадками. Запас азота в почве в некоторой степени пополняется азотом атмосферных осадков.

По данным литературы [2], с осадками на каждый гектар ежегодно поступает от 2 до 11 кг азота. Известные источники пополнения

природных запасов азота представляют практический интерес, но они поставляют лишь часть азота, который уносится с урожаями сельскохозяйственных культур. Поэтому следует принимать меры для увеличения плодородия почвы и, прежде всего, пополнения в ней запасов азота.

В опытах с изотопом ^{15}N [2] показано, что потери азота из-за улетучивания в среднем составляют 15% от внесенного, иногда они достигают 30%. Наибольшее количество азота из-за улетучивания теряется в виде аммиака (NH_3), молекулярного азота (N_2) и закиси азота (N_2O). Значительная часть газообразного азота теряется из почвы вследствие процесса денитрификации [2]. Этот процесс восстановления нитратного азота почвы до свободного газообразного азота (N_2) происходит в результате жизнедеятельности почвенных организмов. Процесс денитрификации идет через ряд промежуточных этапов [2]



Молекулярный азот и закись азота являются основными газообразными продуктами биологической денитрификации, за счёт улетучивания которых происходят потери азота из почв. Задачей данной работы являлось выяснение вопроса, можно ли при помощи плазмы коронного разряда, реализованной в воздухе вблизи поверхности почвы проводить нитрификацию почвы. Т. е. можно ли ослабить реализацию процесса (1).

Наши исследования проводились как экспериментально с использованием отрицательного коронного разряда, так и теоретически на основе модели плазмы разряда. Для проведения этих исследований служили следующие соображения [1, 8]. Время дрейфа образованных ионов на типичной длине иглки электрода в электрическом поле коронного разряда порядка $5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-7}$ с в воздухе много меньше типичного времени обработки почвы, достигающего 1–4 ч. Образованные в плазме воздуха активные частицы при действии диффузии также быстро двигаются к поверхности почвы. Так, характерное время диффузии частиц, образованных в плазме, к поверхности почвы находится в диапазоне 0,3–1 с, что также меньше времени обработки почвы плазмой коронного разряда, достигаю-

щего 1–4 ч. Поэтому можно считать, что образование активных частиц в воздухе коронным разрядом, которые в наших условиях влияют на процессы в почве, является важным результатом воздействия плазмы.

Несомненный интерес представляет влияние фактора влажности на результаты действия коронного разряда, поэтому в расчетах мы использовали модель влажного воздуха, которая отличается от модели [9]. В настоящей работе приведены результаты модельных исследований по оценке влияния плазмы коронного разряда на свойства приземного слоя воздуха вблизи поверхности почвы при реальной степени влажности, достигающей 2%, ионные компоненты которой внедряются в почву.

Эксперимент

В экспериментах использовался коронный разряд в воздухе при напряжениях 5–10 кВ, током порядка 100 мкА, описание которого представлено в [7]. Время действия разряда варьировалось от 30 минут до 4 часов. В качестве пробного разряда в эксперименте использовалась отрицательная корона. Содержание нитратов определяется в водной вытяжке при соотношении почва-вода 1:5. Продукты химических реакций в почве переходят в раствор. Содержание нитратов в растворе производится потенциал метрическим методом с использованием ион-селективных электродов на приборе иономер «ЭКСПЕРТ-001.» Прибор калибруется под конкретный ион с использованием стандартных растворов. Для нитратов используется KNO_3 .

Использован образец пахотного горизонта агродерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на покровных суглинках, подстилаемых мореной. Координаты разреза почвы отбора образца X: 56.03867°, Y: 37.16581°, Z: 215,0 БС (Балтийская система). Местоположение: Чашниково, Солнечногорского р-на, Московской области.

Основные свойства образцов подвергнутых коронному разряду:

1. Влажность образцов – в воздушно-сухом состоянии, в состоянии гигроскопической влажности 2,81 % (0,281 г H_2O /г почвы).

2. Кислотность рН = 5,53–5,56. Содержание гумуса 2,73 %.

3. Емкость катионного обмена (ЕКО) – 14,25 мгэкв/100 г почвы.
4. Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм) 26,8 %.
5. Удельная поверхность 51,0 м²/грамм.
6. Плотность поверхностного заряда $2,4 \times 10^{-3}$ мг/м².

Результаты эксперимента

Эксперимент показал, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) контроля дерновоподзолистой водной вытяжки почвы (без обработки) 169–170 мВ, ОВП водной вытяжки из почвы растет до +187 мВ при 2 часах обработки, а затем при обработке 4 часа падает до +180 мВ. ОВП дистил. воды 147 мВ+. Исходная влажность почвы 2,8 %, насыщенная паром 6,0 %, при обработке почвы в течение 2 ч – влажность составляет 5,4 %; при обработке почвы в течение 4 ч – влажность составляет 2,9 %.

Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост за 2 часа до 14,5 мг/л и дальнейшим падением при обработке в 4 часа 12,8 мг/л, по отношению к контролю 9 мг/л. Итак, за 4 часа при вводимой мощности 1 Вт произошло увеличение концентрации нитратов на ~ 40 %, что больше максимальной величины потери азота в 30 % из-за улетучивания. При этом одновременно произошло улучшение качества почвы, как показали рост ОВП и электропроводности.

Модельные расчеты

В данном разделе приведены результаты модельных исследований по оценке влияния плазмы коронного разряда на свойства приземного слоя воздуха вблизи поверхности почвы. Модельные расчеты выполнялись с помощью программы Kinet, с проверкой в программном обеспечении Maple 2024, ис-

пользуя метод Розенброка. Нас интересовали в первую очередь N_xO_y соединения, и их выход из реакций, т. к. при взаимодействии с водой они образуют HNO_3 и главный источник NO_3^- в соответствии с расчетами в [10]. На основе анализа констант скоростей реакций [8–12] в модель включены 150 химических реакций и 34 компонента, участвующих в превращениях, такие как: e, O, O₂, O₃, O⁻, O₂⁻, O₃⁻, O₄⁻, O⁺, O₂⁺, O₄⁺, N, N₂, N₂⁺, N₂O, NO, NO₂, NO₃, N₂O₅, NO⁺, NO⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, NO₂⁺, H₂O, H₂O⁺, H₃O⁺, H₂, H, H⁻, OH, OH⁻, HO₂, HNO₂, HNO₃. Расчеты проводились для значений приведенного электрического поля: 150 Тд и влажности 2 % (в данном случае имеется в виду отношение концентрации молекул воды в воздухе к общей концентрации компонентов в воздухе). Для влажного воздуха константа скорости диссоциативного прилипания в поле при 150 Тд принималась равной $9,4 \times 10^{-10}$ см³/с, константа скорости диссоциации молекул кислорода в таком поле принималась равной $1,9 \times 10^{-8}$ см³/с, а константа скорости ионизации бралась из [8].

В случае величины электрического поля в 150 Тд концентрация O₃ выросла до 3×10^{18} см⁻³, OH (быстро расходуется, его концентрация падает за 6 секунд от 8×10^{16} см⁻³ до 2×10^0 см⁻³ (т. е. практически почти до нуля), N₂O $\approx 2 \times 10^{14}$ см⁻³, NO $\approx 4,7 \times 10^{10}$ см⁻³, NO₂ $\approx 1,7 \times 10^{12}$ см⁻³, NO₃ $\approx 6 \times 10^{14}$ см⁻³, N₂O₅ $\approx 1,3 \times 10^{17}$ см⁻³, HNO₃ падает до 4×10^{10} см⁻³ с учетом обратной реакции с HNO₂, рост которого выходит на величину $3,2 \times 10^{17}$ см⁻³. Это видно из рис. 1. На этом рисунке представлена эволюция концентраций компонентов HNO₃ и HNO₂. Видно, что в рамках представленной модели в результате прохождения последовательности химических реакций в системе остаются компоненты HNO₂, которые участвуют в обогащении почвы компонентами азота.

С увеличением влажности воздуха концентрация электронов увеличивалась до двух порядков величины, что приводит в модели к ускорению получения компонент, так, например, для озона при влажности 1 % концентрация озона O₃ поднимается до величины в 3×10^{18} см⁻³ за 50 мкс, и при отсутствии влаги за это же время. Максимальные достигаемые

значения компонент отличались, особенно для азотных компонентов.

На рис. 2 представлены результаты расчета концентрации отрицательных ионов при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O . Видно, что на больших временах концентрации ионов выходят на стационарные значения, при этом максимальный рост наблюдается у иона NO^- .

На рис. 3 представлены концентрации компонентов с участием молекул азота и озона в зависимости от разных концентраций H_2O в воздухе $E/N = 150$ Тд. Видно, что концентрация N_2O_5 является основной среди азотсодержащих компонентов при всех рассмотренных значениях влажности.

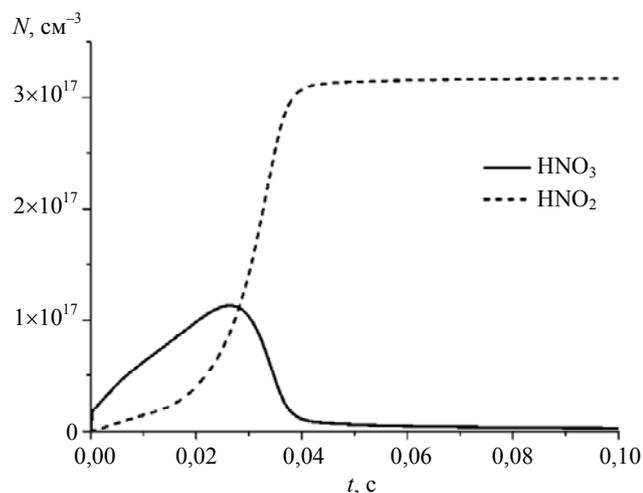


Рис. 1. Эволюция HNO_3 и HNO_2 (cm^{-3}) при воздействии разряда при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O

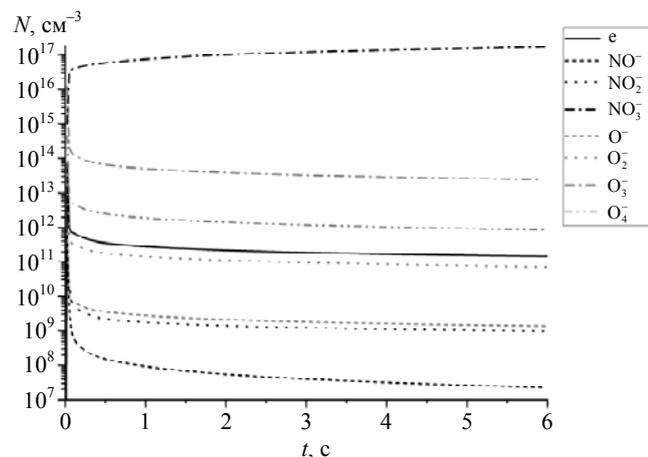


Рис. 2. Эволюция концентраций отрицательных ионов в воздухе при действии разряда при $E/N = 150$ Тд в воздухе при 2 % H_2O

Сравнение с моделями Kossyi et al. [9] и Sekimoto et al. [10] подтверждает корректность относительных концентраций компонентов и их зависимости от электрического поля, однако абсолютные значения концентраций HNO_3 и N_2O_5 требуют дальнейшего уточнения в рамках развития теоретической модели.

В модели не учитывались результаты работы [12] о роли положительных ионов азота близи электродов, а также тот факт, что частицы состава почвы могут поступать в плазму. Полученные результаты позволяют сделать сравнение экспериментальных и теоретических данных.

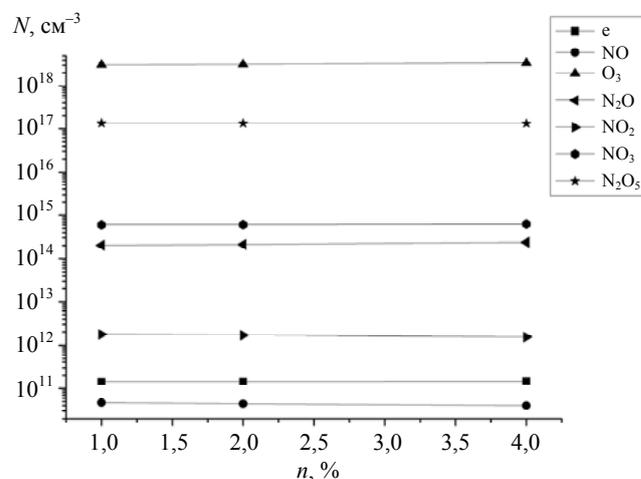


Рис. 3. Концентрации нейтралов для различных концентраций H_2O в воздухе ($n = 1\%$, 2% и 4%). Времена расчета для влажного воздуха составляли 600 мкс, а для сухого воздуха – до 100 с, $E/N = 150$ Тд

Измерения показали, что среднее содержание нитратов в водной вытяжке из почвы за 2 и 4 часа растет на 5 мг/л по отношению к контролю, или $5 \times 10^{-4} г/см^3$. В качестве реперной компоненты будем рассматривать HNO_2 . Из Рис.1 можно оценить скорость наработки HNO_2 как $Q=10^{19} см^{-3} \cdot c^{-1}$. Это дает, что за 4 часа в объеме наработается $2.4 \times 10^{21} см^{-3}$ HNO_2 , такого же порядка будет нарабатываться концентрация N_2O_5 , т.е. в сумме оба механизма наработки нитратов дадут их величину $\sim 5 \times 10^{21} см^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов. Мы видим, что происходит эффективная наработка нитратов.

Заклучение

Полученные экспериментальные результаты показывают, что электропроводность образца пахотного горизонта дерновоподзолистой почвы растет со временем воздействия плазмы, электропроводность почвенной пасты после обработки в течение 2 часов равняется 285 мкСм/см, после обработки в течение 4 часов – 317 мкСм/см, при контрольном значении электропроводности образца 115 мкСм/см. Окислительно-восстановительный потенциал водной вытяжки из почвы растет до +187 мВ при 2 часах обработки, а затем при обработке 4 часа падает до +180 мВ. Это показывает, что происходит улучшение качества почвы. Содержание нитратов в водной вытяжке из почвы показывает рост за 2 часа до 14,5 мг/л и дальнейшее падение при обработке за 4 часа до 12,8 мг/л по отношению к контролю 9 мг/л. Последний результат показывает, что действие маломощного коронного разряда приводит к положительному воздействию на свойства приповерхностных слоев почвы. При этом содержание нитратов растет в среднем на 50 %. Проведенные расчеты показывают рост концентрации в плазме азотных компонентов, которые поступают в почву. Их нарабатываемые концентрации достигают $5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что по порядку величины близко к экспериментальному значению нарабатываемых нитратов за время эксперимента. Полученные результаты подтверждает идею о воз-

можности использования коронного разряда для нитризации бедных почв. Поэтому использование коронного разряда можно рекомендовать в качестве средства для активации почв в местах рискованной жизнедеятельности человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Сер. Б. Тематический т. 9-5: Прикладная химия плазмы / под ред. Фортова В. Е. – М.: «Янус-К», 2008.
2. Мунеев В. Г. Агрохимия. – М.: Наука, 2006.
3. Александров А. Ф., Бычков В. Л., Бычков Д. В. и др. / Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 67.
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M., et al. / Plasma Phys. Rep. 2021. Vol. 47. P. 623.
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1028.
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. Vol. 48. № 2. P. 350.
7. Бычков В. Л., Шваров А. П., Горячкин П. А. и др. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 11.
8. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., Kosmachevskii K. V. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol. 1 / Ed. Matveev I. B. – Denver, Colorado: Outskirts press, 2013.
9. Kossyi I. A., Kostinskiy A., Matveev A. A. / Plasma Sources Sci. Tech. 1992. Vol. 1. P. 207.
10. Sekimoto K., Takayama M. / Eur. Phys. J. D. 2008. Vol. 50. P. 297.
11. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., et al. / Chem. Phys. 2004. Vol. 4. P. 1461.
12. Чистилинов А. В., Якушин Р. В., Лубин А. А., Угрюмов А. В. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 17.

PACS: 52.80.Hc

Nitrization of soil by corona discharge

V. L. Bychkov*, I. G. Stepanov, P. A. Goryachkin, A. P. Shvarov, D. V. Bychkov,
and A. A. Logunov

M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*E-mail: bychvl@gmail.com

Received 9.09.2025; revised 19.11.2025; accepted 20.02.2026

Experimental and theoretical studies of the nitrization possibility of turf-podzolic soil have been carried out. The experimental results obtained show that the electrical conductivity of the sample of the arable horizon of turf-podzolic soil increases with the time of exposure to plasma, the electrical conductivity of the soil paste after treatment for 2 hours is 285 $\mu\text{Sm/cm}$, after treatment for 4 hours is 317 $\mu\text{Sm/cm}$, with a reference value of the electrical conductivity of

the sample of 115 $\mu\text{Sm}/\text{cm}$. The nitrate content in the aqueous extract from the soil shows an increase in 2 hours to 14.5 mg/l, and a further decrease in 4 hours to 12.8 mg/l, relative to the control of 9 mg/l. Calculations show an increase in plasma concentrations of nitrogen components that enter the soil. Their accumulated concentrations reach $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, which is an order of magnitude close to the experimental value of the accumulated nitrates during the experiment. The results confirm the idea of the possibility of using corona discharge for nitrization of poor soils.

Keywords: nitrization, turf-podzolic soil, electrical conductivity, nitrates, air, experiment, calculations.

REFERENCES

1. Encyclopedia of low-temperature plasma: Series B. Thematic Vol. **9-5**: Applied Plasma Chemistry / ed. Fortov V. E. Moscow, Janus-K, 2008 [in Russian].
2. Mineev V. G. Agrochemistry. Moscow, Nauka, 2006 [in Russian].
3. Alexandrov A. F., Bychkov V. L., Bychkov D. V., et al., Vestnik Moscow Univ. Ser. 3. Phys. Astron. № 4, 67 (2011) [in Russian].
4. Panov V. A., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M., et al., Plasma Phys. Rep. **47**, 623 (2021).
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **49** (3), 1028 (2021).
6. Bychkov V. L., Bikmukhametova A. R., Chernikov V. A., Deshko K. I., et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **48** (2), 350 (2020).
7. Bychkov V. L., Shvarov A. P., Goryachkin P. A., et al., Applied Physics, № 6, 11 (2023) [in Russian].
8. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., and Kosmachevskii K. V. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol. **1** / Ed. Matveev I. B. Denver, Colorado, Outskirts press, 183 (2013).
9. Kossyi I. A., Kostinskiy A., and Matveev A. A., Plasma Sources Sci. Tech. **1**, 207 (1992).
10. Sekimoto K. and Takayama M., Eur. Phys. J. D. **50**, 297 (2008).
11. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., et al., Chem. Phys. **4**, 1461 (2004).
12. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Lubin A. A., and Ugryumov A. V., Applied Physics, № 6, 17 (2024) [in Russian].

Об авторах

Бычков Владимир Львович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: bychvl@gmail.com SPIN-код: 2936-116; AuthorID: 18266, ORCID 0000-0002-5470-1297, Scopus Author ID 7102540048, WoS Researcher ID V-7141-2018

Логунов Александр Александрович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: logunov_aa@physics.msu.ru SPIN-код: 8069-9474, AuthorID: 244088, Scopus ID: 57214977963

Шваров Александр Петрович, к.б.н., доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: ashvarov@mail.ru SPIN-код: 5431-8919, AuthorID: 91766; Scopus ID 6505890527

Степанов Илья Георгиевич, младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: ilyastep91@mail.ru AuthorID: 1164557, Scopus ID 56900826700

Бычков Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: bychkovdv@gmail.com AuthorID: 611220 Scopus ID 24502747200

Горячкин Павел Алексеевич, аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: mystereo@mail.ru Scopus ID 57202727406

УДК 621.793.7
 EDN: OUUGOX

PACS: 52.77.-n

Влияние мощности источника плазмы и состава газовой смеси на параметры сформированных структур на карбиде кремния

 © В. С. Климин^{1,*}, И. Е. Лысенко²
¹ *Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Ростовская область, г. Таганрог, 347922 Россия*

* E-mail: kliminv.s@mail.ru

² *ООО «Матпер», Москва, 109316 Россия*

 Статья поступила в редакцию 31.07.2025; после доработки 27.08.2025; принята к публикации 20.02.2026
 Шифр научной специальности: 2.2.2

Изучались процессы формирования структур на поверхности карбида кремния и влияние параметров процесса плазмохимической обработки на геометрические параметры сформированных структур. Экспериментально установлены корреляции между мощностью индуктивно-связанной плазмы (ИСП), составом газовой смеси ($O_2/SF_6/Ar$) и ключевыми параметрами: высотой структур, шероховатостью поверхности и углом наклона стенок. Показано, что увеличение мощности ИСП и концентрации SF_6 в газовой смеси приводит к росту скорости травления. В частности, при мощности ИСП 300 Вт и соотношении газов $O_2/SF_6/Ar$ (81/7/11) достигнуты: высота структуры $983,62 \pm 37,64$ нм, шероховатость поверхности $14,13 \pm 2,15$ нм и угол наклона $74,63 \pm 1,87^\circ$.

Ключевые слова: карбид кремния, плазмохимическое травление, фторидная плазма, формирование структур, микроэлектроника.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-54-58

Введение

Карбид кремния сохраняет статус ключевого материала не только для силовой электроники и ВЧ-устройств, но и для перспективных элементов газовых сенсоров, что обусловлено его уникальным сочетанием свойств: широкой запрещённой зоной, высокой электрической прочностью и исключительной химической стабильностью в агрессивных средах [1–3]. Последнее свойство особенно значимо для сенсорики, где элементы из карбида кремния способны длительно функционировать при повышенных температурах, обеспечивая детектирование горючих газов и токсинов в условиях, недоступных традиционным материалам [4].

Однако использование карбида кремния в стандартной технологии ограничивается его

высокой твёрдостью и химической инертностью, затрудняющими формирование микро- и наноструктур с заданной геометрией и низкой дефектностью поверхности [4–6].

Плазмохимическое травление является одним из перспективных методов создания функциональных элементов устройств на карбиде кремния, включая элементы МОП-транзисторов, МЭМС и оптические волноводы [4–7]. Для газовых сенсоров критически важны показатели морфологии поверхности вытравленной поверхности, напрямую влияющие на сорбционную ёмкость и скорость отклика [7].

Ключевыми управляемыми параметрами процесса, определяющими результирующие характеристики структур, являются мощность источника плазмы и состав газовой смеси

[8–13]. Исследования подтверждают сложную взаимосвязь этих параметров. Варьирование состава газовой смеси ($\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{N}_2$, Cl_2/Ar) влияет на химические процессы травления, скорость удаления материала и формирование пассивирующих слоёв, что определяет анизотропию и морфологию [8, 10, 14–16]. Добавки кислорода влияют на угол наклона структуры [13], а азота – ремоделирование профиля через осаждение побочных продуктов [15]. Для сенсорных применений это позволяет создавать наноструктурированные поверхности с увеличенной активной площадью. Мощность источника плазмы регулирует плотность ионов и радикалов, определяя баланс химического травления и физического распыления. Её оптимизация критична для достижения высоких скоростей [12], минимизации дефектов [5, 10, 17] и формирования структур с высоким аспектным соотношением [18–21], что актуально для миниатюризации сенсорных элементов. Однако комбинирование высокой мощности и температуры может вызывать деградацию масок [19, 22] и аморфизацию поверхности [5, 10, 20, 22], ухудшающую электронные свойства чувствительных слоёв.

Несмотря на прогресс [1–6], количественное исследование влияния совместного варьирования мощности и состава газовых смесей на параметры структур остаётся актуальным, особенно в части применения для технологических процессов создания микро- и наноструктур в сенсорике нового поколения [7, 14, 9, 23–25].

Целью данной работы является установление экспериментальных зависимостей параметров сформированных структур от режимов плазмохимической обработки при различных мощностях источников индуктивно-связанной плазмы и состава газовой смеси, включая шероховатость, угол наклона структуры, критически важных для эффективности газочувствительных элементов.

Методика эксперимента

В качестве образцов в экспериментальных исследованиях были использованы пластины карбида кремния, гексагонального поли типа 6H-SiC. На пластину карбида кремния

методом магнетронного напыления была нанесена тонкая плёнка Al толщиной 1 мкм. В работе использовался фоторезист ФП 9120-1, его сушка производилась при 110 °С в течение 15 мин. Проявление производилось в водном растворе NaOH (0,6 %) вплоть до полного вытравливания незащищённой фоторезистом поверхности алюминия. Вновь нанесённый слой фоторезиста ФП 9120-1 обеспечил защиту поверхности пластины от загрязнений при разделении образцов методом лазерной резки. Полное удаление фоторезиста производилось в кислородной индуктивно-связанной плазме в течение 3 мин, при мощности источника плазмы 650 Вт. Состав смеси O_2/Ar (87/13).

Плазмохимическая обработка образцов карбида кремния проводилась для трех групп образцов. Газовая смесь для создания плазмы для первой группы образцов имела следующий состав $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (81/7/11); для второй группы – $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (74/14/11); для третьей – $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (67/21/11). Значения мощности источника индуктивно связанной плазмы для каждой группы образцов варьировались от 300 Вт до 500 Вт. Мощности источника емкостной связанной плазмы, равной 150 Вт и напряжении смещения 109 В. Рабочее давление в реакторе составляло 2,5 Па.

По завершению процесса плазмохимической обработки производилось удаление остатков защитной маски Al путём её травления в растворе NaOH (0,6 %). Затем производилось сканирование образца на профилометре. Сканирование осуществлялось в области, сформированной в процессе травления ступеньки с целью выявления её параметров. Также осуществлялось повторное сканирование подвергнутой в процессе травления воздействию плазмы поверхности карбида кремния.

Результаты экспериментов

На рис. 1 показано изображение сформированной структуры на поверхности пластины карбида кремния из первой экспериментальной группы (ступенька на рис. 1а, профиль протравленной структуры на рис. 1б).

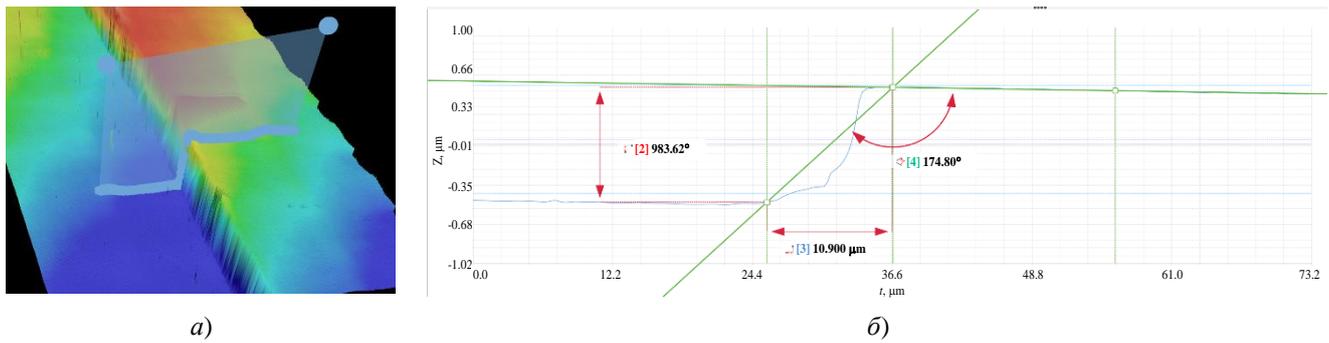


Рис. 1. Изображение (а) и профиль (б) одной из полученных структур

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие зависимость высоты полученных структур от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси.

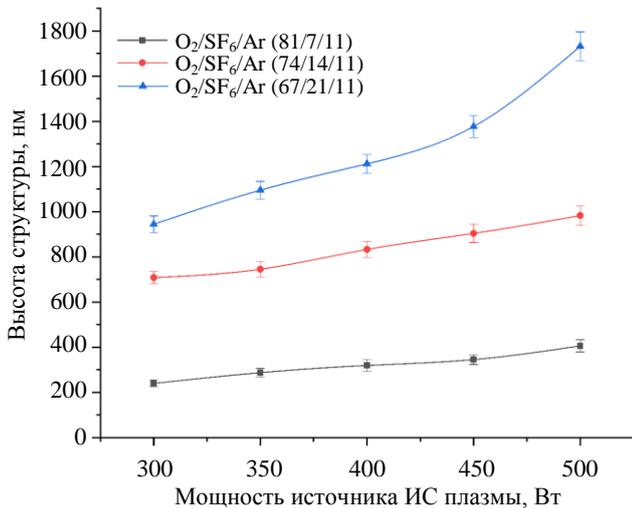


Рис. 2. Зависимости высоты вытравленного слоя карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Анализ зависимостей показал, что при заданных режимах зависимости имеют фактически линейный характер. При увеличении мощности источника плазмы растет высота структуры, что можно объяснить энергией частиц и степенью разложения реакционной газовой смеси, что приводит к интенсификации процесса. Также можно увидеть, что при увеличении доли фторсодержащего газа количество активных ионов фтора в плазме повышается, которые, в свою очередь, взаимодействуют с кремниевой составляющей структуры карбида кремния и обеспечивают тяжелые ионы для процесса реактивного ионного трав-

ления, что в свою очередь приводит к увеличению высоты сформированных структур.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси на угол наклона сформированной структуры.

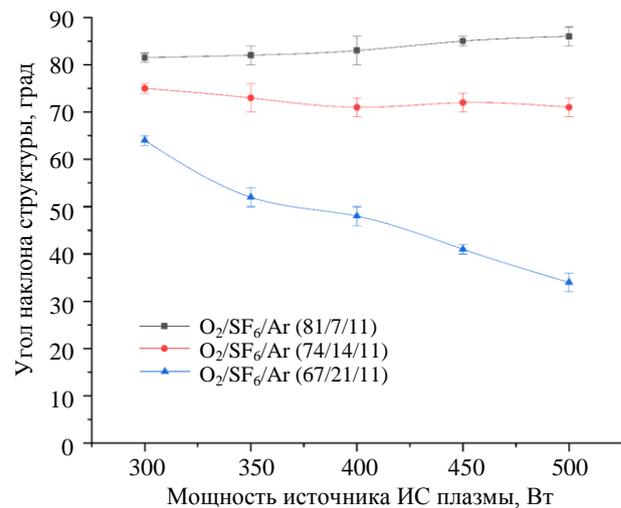


Рис. 3. Зависимости угла сформированной структуры на поверхности карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Полученная зависимость показывает, что уменьшение кислорода в смеси значительно влияет на угол структуры, который измерялся, как показано на рис. 1. Из показанной зависимости можно заключить, что при более низком значении кислорода и повышении мощности источника индуктивно связанной плазмы значение угла наклона структуры снижается. При увеличении процентного содержания кислорода в смеси значение угла наклона менялось незначительно и имеет фактически линейный характер, что коррелируется с теоретическими исследованиями.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси на шероховатость вытравленной поверхности.

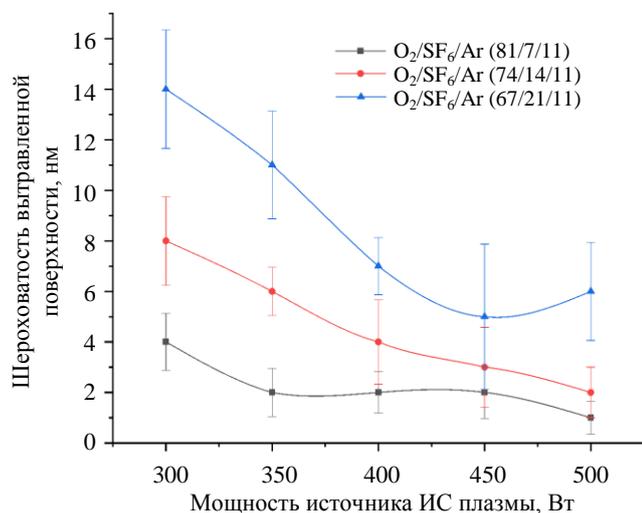


Рис. 4. Зависимости шероховатости вытравленной поверхности карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Полученная зависимость показывает, что при увеличении доли фторсодержащего газа количество тяжелых ионов увеличивается, и шероховатость вытравленной поверхности увеличивается, при увеличении мощности, вероятно, происходит процесс химической плазменной полировки и снижается составляющая, отвечающая за физическое распыление, соответственно, шероховатость вытравленной поверхности падает.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности высоты сформированных плазменным травлением структур и шероховатости вытравленной поверхности от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси. Также были получены закономерности величины угла наклона структур от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси. Были определены режимы, соответствующие мини-

мальной и максимальной шероховатости вытравленной поверхности при задаваемых высотах структур, а также режимы формирования наклонных структур. Выявленные экспериментальные зависимости показали, что увеличение мощности источника индуктивно связанной плазмы, а также увеличение содержания фторсодержащего газа приводит к увеличению скорости плазмохимического травления, так, при мощности источника ИСП 300 Вт и составе газовой смеси O₂/SF₆/Ar (81/7/11) высота структуры на карбиде кремния составила 983,62 ± 37,64 нм, а шероховатость вытравленной поверхности составила 14,13 ± 2,15 нм, угол наклона структуры составил 74,63 ± 1,87 градусов. Показано, что увеличение кислорода в смеси ведет к увеличению угла наклона структуры, при этом влияние мощности на угол наклона структуры с увеличением кислородной составляющей падает.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, <https://rscf.ru/project/25-29-00722/> в Южном федеральном университете. Результаты исследования получены с использованием оборудования ООО "Manner".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Huff J., *Advanced Materials Technologies* **8** (12), 2201235 (2023).
- Ashurov K., et al., *Semiconductor Science and Technology* **38** (4), 043001 (2023).
- Klimin V. S., Kessler I. O., Morozova Yu. V., Saenko A. V., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., *Applied Physics*, № 6, 23–28 (2022) [in Russian].
- Saenko A. V., Klimin V. S., Rozhko A. A., and Malyukov S. P., *Journal of Communications Technology and Electronics* **67**, 108–114 (2022).
- Donaev R., et al., *Materials* **15** (1), 123 (2022).
- Dzhuplin V. N., Klimin V. S., Morozova Y. V., Rezvan A. A., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., *Russian Microelectronics* **50** (6), 412–419 (2021).
- Tan X., et al., *Microelectronics Engineering* **301**, 111567 (2024).
- Evans P., et al., *Applied Physics Letters* **102** (19), 192109 (2013).
- Kato T., et al., *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* **34** (2), 198–205 (2021).
- Li C., et al., *Journal of Materials Chemistry C* **12**, 18211–18237 (2024).
- Klimin V. S., Kessler I. O., Morozova Yu. V., Saenko A. V., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **86**, S96–S99 (2022).

12. Ivanov A., et al., Scientific Reports **10**, 19977 (2020).
13. Pirnaci K., et al., Journal of Vacuum Science & Technology A **35** (3), 031301 (2017).
14. Liu G., et al., ECS Journal of Solid State Science **11** (4), 043008 (2022).
15. Klimin V. S., Morozova Y. V., Kots I. N., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., Russian Microelectronics **51** (4), 236–242 (2022).
16. Arslan S., et al., Journal of Micromechanics and Microengineering **31** (8), 085002 (2021).
17. Pant B. and Tandon U., Plasma Chemistry and Plasma Processing **19**, 545–558 (1999).
18. Popova E., et al., Vacuum **193**, 110523 (2021).
19. Wang L., et al., Materials **15** (1), 123 (2022).
20. Zhang Y., et al., Journal of Applied Physics **130** (15), 153301 (2021).
21. Saenko A. V., Vakulov Z. E., Klimin V. S., Bilyk G. E., and Malyukov S. P., Russian Microelectronics **52** (4), 297–302 (2023).
22. Miyazaki H., et al., Nanotechnology **32** (25), 255301 (2021).
23. Holst F., et al., Applied Surface Science **579**, 152189 (2022).
24. Klimin V. S., Geldash A., and Ageev O. A., Russian Microelectronics **53** (2), 117–122 (2024).

PACS: 52.77.-n

Influence of plasma power and gas mixture composition on the formation of structures on silicon carbide

V. S. Klimin^{1,*} and I. E. Lysenko²

¹ Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Taganrog, Rostov Region, 347922 Russia

* E-mail: kliminvs@sfnu.ru

² Mapper LLC, Moscow, 109316 Russia

Received 31.07.2025; revised 27.08.2025; accepted 20.02.2026

This work investigates the processes of structure formation on silicon carbide (SiC) surfaces. The influence of plasma-chemical processing parameters on the geometric characteristics of fabricated structures was examined. Correlations were established between the power of the inductively coupled plasma (ICP) source, the composition of the gas mixture (O₂/SF₆/Ar), and key structural parameters: height, surface roughness, and wall inclination angle. It was demonstrated that increasing ICP power and SF₆ concentration in the gas mixture enhances the etching rate. Processing conditions correspond to extremes in surface roughness and specific wall inclination angles were identified. Notably, under conditions of 300 W ICP power and a gas ratio of O₂/SF₆/Ar = 81/7/11, the following results were achieved: structure height of 983.62 ± 37.64 nm, surface roughness of 14.13 ± 2.15 nm, and inclination angle of 74.63 ± 1.87°.

Keywords: silicon carbide, plasma-chemical etching, fluoride plasma, structure formation, microelectronics.

Об авторах

Климин Виктор Сергеевич, к.т.н., доцент, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (347922, Россия, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44). E-mail: kliminvs@sfnu.ru SPIN-код: 1023-2994, AuthorID: 596163, Orcid ID 0000-0002-9794-4459, Scopus Author ID 57191376740

Лысенко Игорь Евгеньевич, д.т.н., руководитель проекта по организации НТО, ООО «Мэппер» (109316, Россия, Москва, Волгоградский пр. 42, к. 5). E-mail: igor.lysenko@mapperllc.ru SPIN-код: 7114-3671, AuthorID: 160157, Orcid ID 0000-0002-7505-1983, Scopus Author ID 55971078200

УДК 533.9.07
EDN: PGRBLW

PACS: 52.75.Hn

Исследование электрофизических характеристик однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами при работе на воздухе

© А. А. Сафронов, Ю. Д. Дудник*, М. И. Васильев, В. Н. Ширяев, О. Б. Васильева, А. В. Никонов, Г. В. Наконечный

ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191181 Россия
*E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3.09.2025; после доработки 26.09.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13

Приведены результаты исследования однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами мощностью до 10 кВт. Измерения проводились с использованием медных кольцевых электродов при атмосферном давлении при расходе воздуха до 3,5 г/с. Проведено исследование развития разряда плазмотрона при двух положениях высокоскоростной камеры: первое – главная оптическая ось камеры совпала с главной осью плазмотрона, вторая – главная оптическая ось камеры расположена перпендикулярно струе плазмы на выходе из плазмотрона. Получены временные зависимости интенсивности излучения плазмы внутри камеры и свободного плазменного факела. Проведено сравнение вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы при фронтальном положении видеокамеры. Определено, что интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию мощности дуги с коэффициентом корреляции 0,96.

Ключевые слова: плазмотрон, переменный ток, кольцевые электроды, интенсивность излучения плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-59-65

Введение

Широкое внедрение плазмотронов в промышленные технологии обуславливает необходимость углубленного изучения механизмов возникновения и поддержания стабильности дугового разряда. Стандартные методы диагностики, базирующиеся исключительно на оценке электрических характеристик, часто оказываются недостаточно информативными для адекватного воспроизведения сложной временной и пространственной динамики горения дуги, особенно в условиях быстро меняющихся процессов.

Применение новейших цифровых камер с высокими показателями разрешения и скорости записи кадров обеспечивает получение

исчерпывающих сведений о пространственно-временных особенностях разряда, данные методики позволяют детально зафиксировать мгновенные трансформации структуры дуги, проследить траектории ее движения.

Предлагаемый в данной работе аналитический подход основан на свойстве обратимости преобразования Фурье, позволяющем выявлять взаимосвязь основных частот спектрального разложения и характеристик самого сигнала. Анализируя интенсивность излучения плазмы, возникает необходимость выявления связи между пространственно-временными изменениями яркости свечения и внутренними механизмами формирования электрической дуги. Для этого удобно воспользоваться свойствами преобразования Фурье,

способного представить сигнал (например, изменение интенсивности излучения) в виде набора гармонических колебаний различной частоты. Один из ключевых выводов теории заключается в том, что если основные компоненты спектра двух функций совпадают, то сами функции достаточно близки в пределах первого приближения. Иными словами, характер изменения основного компонента спектра излучения плазмы тесно связан с особенностями развития электрического разряда.

Практически это означает, что, измеряя распределение частот в спектре интенсивности излучения плазмы, можно косвенно судить о параметрах самой электрической дуги таких, как сила тока, напряжение и температура плазмы. Таким образом, установление подобной зависимости позволит создать эффективный инструмент диагностики состояния плазматрона в процессе эксплуатации.

Целью данной работы является исследование процессов развития разряда в плазматроне при двух различных положениях высокоскоростной камеры и проведение сравнительного анализа вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы. Измерения проводились с использованием плазмообразующего газа – воз-

духа в диапазоне расходов от 0,84 г/с до 1,75 г/с при атмосферном давлении.

Экспериментальная установка и методы измерений

Экспериментальная установка включала в себя однофазный плазматрон переменного тока с кольцевыми электродами, источник электропитания, систему водяного охлаждения, систему подачи плазмообразующих газов, измерительный комплекс.

Вид работающего плазматрона представлен на рисунке 1. Ключевой конструктивной особенностью представленного плазматрона является отказ от традиционного цельного корпуса, что принципиально отличает данную конструкцию от аналогичных устройств [1–3]. Однофазный плазматрон представляет собой совокупность состыкованных электродов кольцевой формы, выполненных из меди марки М1 и М2. Для обеспечения визуального наблюдения за развитием дуги внутри плазматрона электрод 1 оснащен смотровым окном, присоединенным к нему посредством установочного фланца. Фланец имеет отверстие для штуцера, его внутренняя конструкция создает контур для подачи плазмообразующего газа – контур 1.

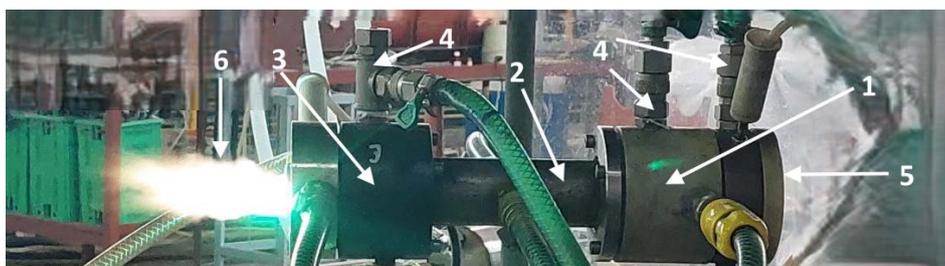


Рис. 1. Фотография работающего плазматрона с кольцевыми электродами:
1 – электрод 1; 2 – электрод 2; 3 – электрод 3; 4 – контуры подачи газа;
5 – смотровое окно; 6 – плазменный факел

Электрод 1 и 2 соединяются между собой через изолирующий фланец с тангенциальным кольцом для подачи газа – контур 2. Подобным образом с противоположной стороны к электроду 2 крепится электрод 3, образуя еще один контур для подачи газа – контур 3. Величина межэлектродных зазоров между электродами 1 и 2 и 2 и 3 может варьироваться в диапазоне от 0,1 до 3 мм. Наружная поверхность электрода 2 оснащена приварен-

ной обечайкой с патрубками, формирующими водяную рубашку охлаждения. Герметичность конструкций обеспечивается резиновыми уплотнителями, препятствующими проникновению плазмообразующего газа и охлаждающей жидкости вовне плазматрона.

При приложении высокого напряжения к электродам 1 и 3 плазматрона происходит электрический пробой межэлектродных промежутков, последовательно возникающий

между электродами 1 и 2, а затем между электродами 2 и 3. Результатом становится формирование двух независимых электрических дуг.

Движение дуг обусловлено воздействием плазмообразующего газа, вводимого в контуры подачи тангенциально, а также совместным действием электродинамических и газодинамических сил. Под их влиянием точки привязки дуг начинают перемещаться по поверхности торцов электродов, вызывая постепенную деформацию и удлинение дуг, взаимно сближая их. Постепенно дуги смыкаются, сливаясь в единую электрическую дугу, простирающуюся от электрода 1 до выходного сопла плазмотрона, где точка присоединения дуги локализуется на выходной кромке сопла. Объединенная дуга продолжает свое распространение вдоль осевого направления канала плазмотрона, плавно удлиняясь и выходя из сопла, обеспечивая работу устройства.

Управление источником питания основано на применении промышленного микроконтроллера Advantech, позволяющего осуществлять мониторинг осциллограмм тока и напряжения, мгновенные значения токов и напряжений фиксируются посредством включенных в состав системы питания датчиков тока и напряжения. Система газовой подачи воздуха включала в себя коллекторную стойку с установленными на ней регуляторами давления с манометрами, обеспечивающими возможность регулировки подачи газа на каждый из контуров.

Запись осциллограмм тока и напряжения электрической дуги проводилась одновременно со скоростной видеосъемкой работы на воздухе однофазного плазмотрона с кольцевыми электродами с установленными зазорами $D_1 = 1,9$ мм и $D_2 = 2,5$ мм при помощи видеокамеры Citius imaging High Speed Video Camera, которая фиксировалась в двух положениях относительно главной оси плазмотрона. В первом случае главная оптическая ось камеры совпадала с главной осью плазмотрона, то есть происходила фронтальная фиксация разряда внутри разрядной камеры плазмотрона. Во втором случае главная оптическая ось камеры была перпендикулярна главной оси плазмотрона, и камера записывала струю плазмы на срезе выхода плазмотрона.

Были получены временные зависимости интенсивности излучения плазмы внутри ка-

меры и свободного плазменного факела. Камера производила видеосъемку с частотой 4000 кадров в секунду (fps) с высоким разрешением и была подключена к персональному компьютеру. Видеозаписи плазмы записывались в память компьютера для последующей обработки. Данный метод регистрации позволил определить характер привязки дуги и провести детальный анализ временных и пространственных характеристик дугового разряда.

Результаты и обсуждения

Электрическая дуга в воздухе при атмосферном давлении – это устойчивый электрический разряд, который сопровождается очень ярким свечением. Дуга возникает между электродами при большой силе тока и сравнительно низком напряжении [4]. Температура в столбе дуги может достигать 4000–10000 К, что создает континуум излучения, который по форме близок к спектру черного тела при подобных температурах из-за сильного тормозного (Bremsstrahlung) и рекомбинационного излучения. Можно отметить, что при атмосферном давлении спектр излучения электрической дуги близок к непрерывному, на который накладываются линейчатые (или полосатые) спектры атомов и молекул. Длина волны широкого максимума и общая форма спектра часто хорошо аппроксимируются законом Планка.

Следует отметить, что интеграл интенсивности излучения фонового спектра по всем длинам волн дает больший вклад по сравнению с линейчато-полосатым спектром, вклад от которого составляет 10–30 % общей излучаемой энергии [5, 6]. В этой же работе отмечено, что энергия ультрафиолетового излучения электрической дуги при напряжении 4 кВ, составляет всего 30 % от энергии, испускаемой в виде оптического излучения. Преобладающая доля приходится на энергию фотонов видимого света – до 69 %. Энергия инфракрасного излучения очень мала и составляет всего 1 % от общей энергии во всем спектральном диапазоне.

С учетом спектральной чувствительности видеокамеры Citius imaging, использованной в работе, которая ограничена от 300 до

1050 нм с широким максимумом на 450–750 нм, высокоскоростная съемка дает информацию об интенсивности излучения плазмы и отражает колебания столба дуги, гашение/перезапуск, флуктуации температуры и форму дуги. Эти визуальные изменения связаны с изменениями в токе и тепловой мощности и, поэтому, можно предположить, что, в первом приближении, отражают эволюцию энергии плазмы электрической дуги.

В результате проведения скоростной видеосъемки разряда плазмотрона были сняты файлы, записанные в формате «.avi». Каждый файл представлял собой последовательность отдельных кадров, сформированных светочувствительной матрицей видеокамеры Citius imaging. Таким образом файлы «.avi» отражают динамику интенсивности излучения плазмы различных режимов плазмотрона. Далее проводилась последующая обработка файлов: значения всех пикселей каждого j -го кадра суммируются, итоговая сумма записывается в j -ю позицию. Результат суммирования запи-

сывался в j -ю позицию нового вектора, длина которого соответствовала количеству кадров в файле «.avi» видеосъемки. В исследовании использовалась скорость записи 4000 кадров/с с разрешением 320×306.

В рамках проведенных исследований был выполнен ряд экспериментов с различными режимами расхода воздуха, которые представлены в таблице. Расход воздуха на каждый из контуров варьировался от 0,9 г/с до 1,75 г/с, а мощность плазмотрона изменялась в пределах до 10 кВт, общая продолжительность экспериментов не превышала 30 мин., в ходе которых плазмотрон показал устойчивую работу. Для всех проведенных экспериментов синхронно измерялась сила тока плазмотрона и напряжение на дуге с временным шагом 100 мкс.

Измеренные осциллограммы мгновенных значений тока (отмечены синим цветом) и напряжения дуги (отмечены красным цветом) для характерного режима 13 представлены на рисунке 2.

Таблица

Режимы работы плазмотрона

Номер записи	Расход G_1 , [г/с]	Расход G_2 , [г/с]	Расход G_3 , [г/с]	Суммарный расход G , [г/с]
Видеокамера перпендикулярна главной оси плазмотрона (профиль)				
1-3	0,9	1	1,75	3,65
4-6	0,9	0,84	1,75	3,49
7-9	0,9	0,74	1,75	3,39
10	0,9	0,61	1,75	3,26
Видеокамера соосна главной оси плазмотрона (фронтальный вид)				
11	0,9	0,92	1,72	3,54
12	0,9	0,84	1,72	3,46
13	0,9	0,74	1,72	3,36

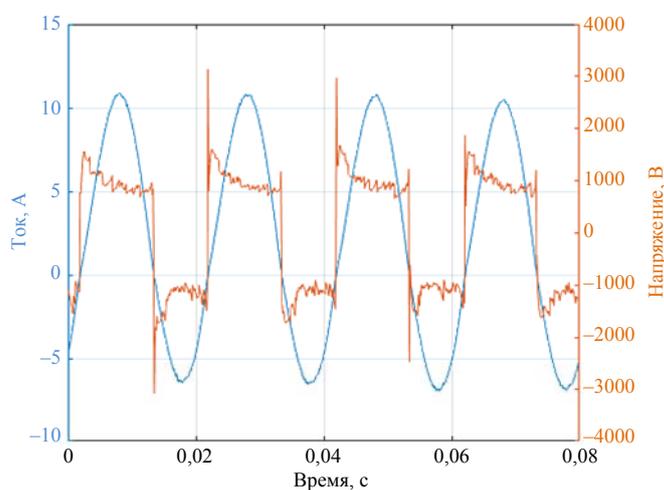


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения дуги для режима 13

Вычисленное значение мощности дуги как произведения мгновенных значений тока и напряжения показано на рисунке 3 синим цветом, а зависимость интенсивности излучения плазмы при наблюдении с фронтального расположения видеокамеры – красным цветом.

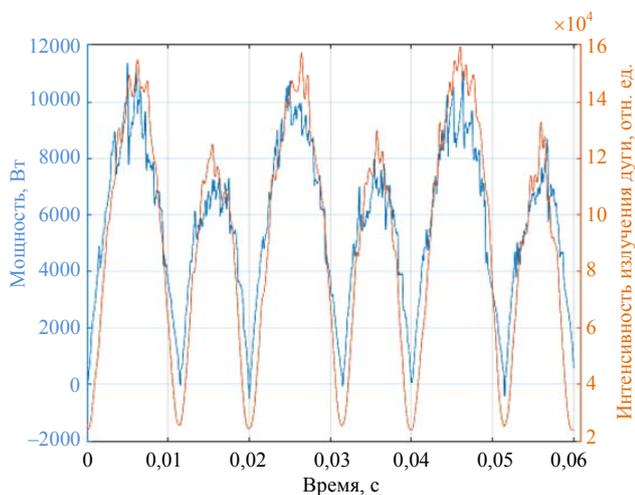


Рис. 3. Вычисленное значение мощности дуги и наблюдаемая интенсивность излучения плазмы при фронтальном положении видеокамеры

Поскольку отсчеты электрических параметров дуги выполнялись с временным шагом 100 мс, а запись видеок кадров осуществлялась с шагом 250 мс, то для вычисления коэффициента корреляции двух зависимостей на рисунке 3 была проведена унификация отсчетов при помощи интерполяции. Коэффициент корреляции между вычисленным значением мощности дуги и наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы составил $R = 0,9612$, что подтверждает предположение о том, что измеренная скоростной видеокамерой интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию энергии плазмы электрической дуги в хорошем приближении.

Для функции вычисленной мощности разряда (рис. 3) и функции интенсивности излучения плазмы при помощи быстрого преобразования Фурье (далее—fft) определена частотная характеристика процессов.

На рисунке 4 представлены результаты быстрого преобразования Фурье для вычисленного значения мощности дуги (верхний график) и интенсивности излучения плазмы в двух положениях видеокамеры – фронтальном (средний график) и профильном (нижний график). Для всех преобразований основная частота составила 100 Гц и очень близким соот-

ношением по амплитуде сателлитных частот, кратных основной.

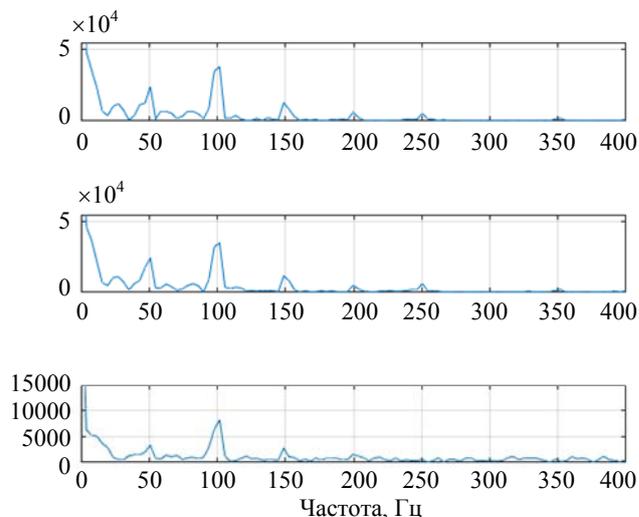


Рис. 4. Преобразование Фурье: верхний график—fft вычисленного значения мощности дуги; средний график—fft интенсивности излучения плазмы при фронтальном положении камеры (соосно главной оси плазматрона) и нижний график—fft интенсивности излучения плазмы, когда камера перпендикулярна струе плазмы на выходе из плазматрона

Из использования свойства обратимости преобразования Фурье следует, что совпадение по основным частотам преобразования Фурье функций влечет близость, в первом приближении, самих функций. Таким образом и при подобном рассмотрении можно предположить, что интенсивность излучения плазмы хорошо коррелирует с мощностью разряда электрической дуги.

Заключение

В работе проведено исследование процессов развития разряда в плазматроне при двух различных положениях высокоскоростной камеры и проведено сравнение вычисленной по осциллограммам тока и напряжения мощности дуги с наблюдаемой интенсивностью излучения плазмы. В ходе анализа результатов измерений были рассмотрены динамические характеристики, связанные с изменениями процесса горения дуги во времени, величина мощности дуги рассчитывалась как произведения мгновенных значений тока и напряжения.

Сравнение вычисленного значения мощности электрической дуги и наблюдаемой ин-

тенсивности излучения плазмы подтверждает предположение о том, что измеренная скоростной видеокамерой интенсивность излучения плазмы отражает эволюцию энергии плазмы электрической дуги в хорошем приближении, при этом коэффициент корреляции составляет $\sim 0,9612$.

Дополнительное подтверждение возможности использования интенсивности излучения плазмы для анализа мощности электрической дуги плазмотрона основано на свойстве обратимости преобразования Фурье, из которого следует, что совпадение по основным частотам преобразования Фурье функций влечет близость, в первом приближении, самих функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафронов А. А., Ковшечников В. Б., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Кузнецов В. Е., Ширяев В. Н. / Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 6. С. 846–851.
2. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Васильева О. Б., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н. / Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 58–66.
3. Сафронов А. А., Кузнецов В. Е., Дудник Ю. Д., Ширяев В. Н., Васильева О. Б. / Завалишинские чтения 23. Сб. докл. XVIII Межд. Конф. по электромеханике и робототехнике. – Санкт-Петербург, 2023. С. 391–395.
4. Lee T. H., Kam D. H., Oh J. H., Kim Ch. / JMR&T. 2022. Vol. 19. P. 685–696.
5. Nagi Ł., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 19. P. 5137.
6. Nagi Ł., Koziol M., Zygarlicki J. / Energies. 2020. Vol. 13. № 7. P. 1676.

PACS: 52.75.Hn

Study of the dynamics of arc discharge burning in a methane-hydrogen-containing atmosphere in an alternating current plasma torch

A. A. Safronov, Yu. D. Dudnik*, M. I. Vasilyev, V. N. Shiryaev, O. B. Vasilieva,
A. V. Nikonov, and G. V. Nakonechnyi

*Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 191181 Russia
* E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru*

Received 3.09.2025; revised 26.09.2025; accepted 20.02.2026

The paper deals with the results of a study of a single-phase plasma torch with ring electrodes with a power of up to 10 kW. The measurements were carried out using copper ring electrodes at atmospheric pressure with an air flowrate of up to 3.5 g/s. A study of the plasma torch discharge development was carried out at two positions of the high-speed chamber: the first – the main optical axis of the chamber coincided with the main axis of the plasma torch, the second – the main optical axis of the chamber is located perpendicular to the plasma jet at the exit from the plasma torch. Time dependences of the plasma radiation intensity inside the chamber and a free plasma torch were obtained. A comparison was made of the arc power calculated from the oscillograms of current and voltage with the observed plasma radiation intensity at the frontal position of the video camera. It was determined that the plasma radiation intensity reflects the evolution of the arc power with a correlation coefficient of ~ 0.96 .

Keywords: plasma torch, alternating current, arc discharge, high-speed video recording, correlation between plasma radiation intensity and arc power.

REFERENCES

1. Safronov A. A., Kovshechnikov V. B., Vasilieva O. B., Dudnik Y. D., Kuznetsov V. E., and Shiryaev V. N., High Temperature **57**(6), 808–812 (2019).
2. Safronov A. A., Kuzhnetsov V. E., Vasilieva O. B., Dudnik Yu. D., and Shiryaev V. N., Instruments and Experimental Techniques **62** (2), 193–200 (2019).

3. Safronov A. A., Kuzhnetsov V. E., Dudnik Yu. D., Shiryaev V. N., and Vasilieva O. B. Zavalishenskie chteniya 23. Collection of reports of the XVIII Int. Conf. on Electromechanics and Robotics. Sankt-Petersburg, 2023, pp. 391–395 [in Russian].
4. Lee T. H., Kam D. H., Oh J. H., and Kim Ch., JMR&T **19**, 685–696 (2022).
5. Nagi Ł., Koziół M., and Zygarlicki J., Energies **13** (19), 5137 (2020).
6. Nagi Ł., Koziół M., and Zygarlicki J., Energies **13** (7), 1676 (2020).

Об авторах

Сафронов Алексей Анатольевич, д.т.н., член-корреспондент РАН, заведующий отделением, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: 9932553@mail.ru SPIN-код: 5771-1927, AuthorID: 37228, Scopus ID 7101711564

Дудник Юлия Дмитриевна, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru SPIN-код: 7170-7912, AuthorID: 670805, ORCID ID 0000-0002-0640-9419, Scopus ID 5719415463

Васильев Михаил Иванович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: milavas@mail.ru SPIN-код: 6836-0810, AuthorID: 162131

Ширяев Василий Николаевич, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: shiryaev_vasily@mail.ru SPIN-код: 6728-5133, AuthorID: 37225, Scopus ID 7004970484

Васильева Ольга Борисовна, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: vasilieva_olg@mail.ru SPIN-код: 7691-1515, AuthorID: 161866, ORCID ID 0000-0003-1095-7677, Scopus ID 56803683100

Никонов Алексей Валерьевич, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: nikonav@mail.ru SPIN-код: 8215-1982, AuthorID: 161871, ORCID ID 0000-0003-1471-2327, Scopus ID: 57193909837

Наконечный Геннадий Валерьевич, научный сотрудник, ФГБУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 18). E-mail: ghennady@mail.ru SPIN-код: 6708-9658, AuthorID: 161870, Scopus ID: 57198769946

УДК 621.383.4/5
EDN: QGQBYPPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Сравнительный анализ рефрактивных и спектральных свойств границы раздела бромида калия с бор-нитридными нанотрубками**© П. В. Кужаков^{1,2}, Н. В. Каманина^{1,2,3,*}¹ АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, 192171 Россия

* E-mail: nvkamanina@mail.ru

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300 Россия³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022 РоссияСтатья поступила в редакцию 16.04.2024; после доработки 31.05.2024; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 2.2.6, 2.2.7

Проведен анализ рефрактивных и спектральных свойств границы раздела бромида калия с бор-нитридными нанотрубками. Выполнены расчеты дисперсионных зависимостей показателя преломления бор – нитридных нанотрубок с разной хиральностью, а также дисперсионных зависимостей коэффициента отражения на границе раздела KBr-BNNT с разной хиральностью. Выявлен наиболее оптимальный тип хиральности бор-нитридной нанотрубки во всем исследованном спектральном диапазоне.

Ключевые слова: спектральный диапазон, показатель преломления, граница раздела, спектры отражения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-66-71

Введение

В последние годы нанотрубки нитрида бора (BNNT) привлекли внимание исследователей из-за их существенной щели полупроводникового характера [1] и высокой структурной стабильности, которые делают этот материал пригодным для применения в фотолюминесцентных устройствах [2]. Электронные и структурные свойства BNNT были теоретически подробно исследованы. Зависимость ширины запрещенной зоны BNNT была изучена как функция внутреннего диаметра и хиральности нанотрубки [3]. Сильное уменьшение щели наблюдалось для диаметров нанотрубок менее примерно 1,3 нм. Расчеты минимальной энергии решетки, проведенные Эрнандесом и др., показывают, что наиболее благоприятной хиральностью для BNNT явля-

ется зигзаг [4]. Они также предсказали модуль Юнга около 300 ГПа как для зигзагообразных, так и для кресельных нанотрубок и некоторую степень изгиба перпендикулярно оси нанотрубки. Экспериментальных работ, выполненных с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) – много [5–14], гораздо меньше статей об электронных и оптических свойствах образцов BNNT. Это, например, ИК-ответ колебаний BN в BNNT, который может быть использован для характеристики образцов нанотрубок. BNNT были впервые получены методами дугового разряда и лазерной абляции. Большинство произведенных BNNT имеют зигзагообразную геометрию.

В наше время наблюдается большой интерес к нанотрубкам из нитрида бора за их электронные [15–17], тепловые [18–21] и ме-

ханические свойства [22, 23], которые во многих случаях отличаются или превосходят аналогичные параметры углеродных нанотрубок. Анализ инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье проводят с использованием анализатора инфракрасного спектра в диапазоне волновых чисел $4000\text{--}500\text{ см}^{-1}$, относительно к матрице кристалла KBr. Как показано на рис. 1а,б, при схожести кривых поглощения в BNNT наблюдаются характерные пики при 1380 см^{-1} и 800 см^{-1} , обусловленные колебаниями B–N связи, параллельными и перпендикулярными оси нанотрубки, соответственно [24]. Оба пика демонстрируют сильный ИК-ответ, что наблюдается в ИК-отражательной способности.

Спектр, представленный на рис. 1в, показывает сильные колебания при 1375 и 793 см^{-1} , которые являются характерными первичными и вторичными полосами поглощения BNNT, соответственно. Полоса погло-

щения при 1375 см^{-1} связана с хорошо известной плоскостной колебательной модой (E2g) BNNT, тогда как слабые полосы поглощения при 793 см^{-1} соответствуют внеплоскостной вибрации [25]. И профиль спектра, и полосы поглощения аналогичны тем, которые сообщаются для BNNT, что дополнительно подтверждает, что необработанные продукты являются BNNT.

Спектры поглощения BNNT (рис. 1з), демонстрируют острый пик поглощения при 204 нм . Свойство поглощения света и ширина запрещенной зоны BNNT были исследованы с помощью спектроскопии, работающей в режиме отражения, как показано на рисунке 1д. Спектры отражения в УФ-видимом диапазоне демонстрирует две полосы поглощения при $266,4\text{ нм}$ ($4,65\text{ эВ}$) и $214,3\text{ нм}$ ($5,79\text{ эВ}$), соответствующие экситонному поглощению и оптическому поглощению на краю полосы BNNT [25].

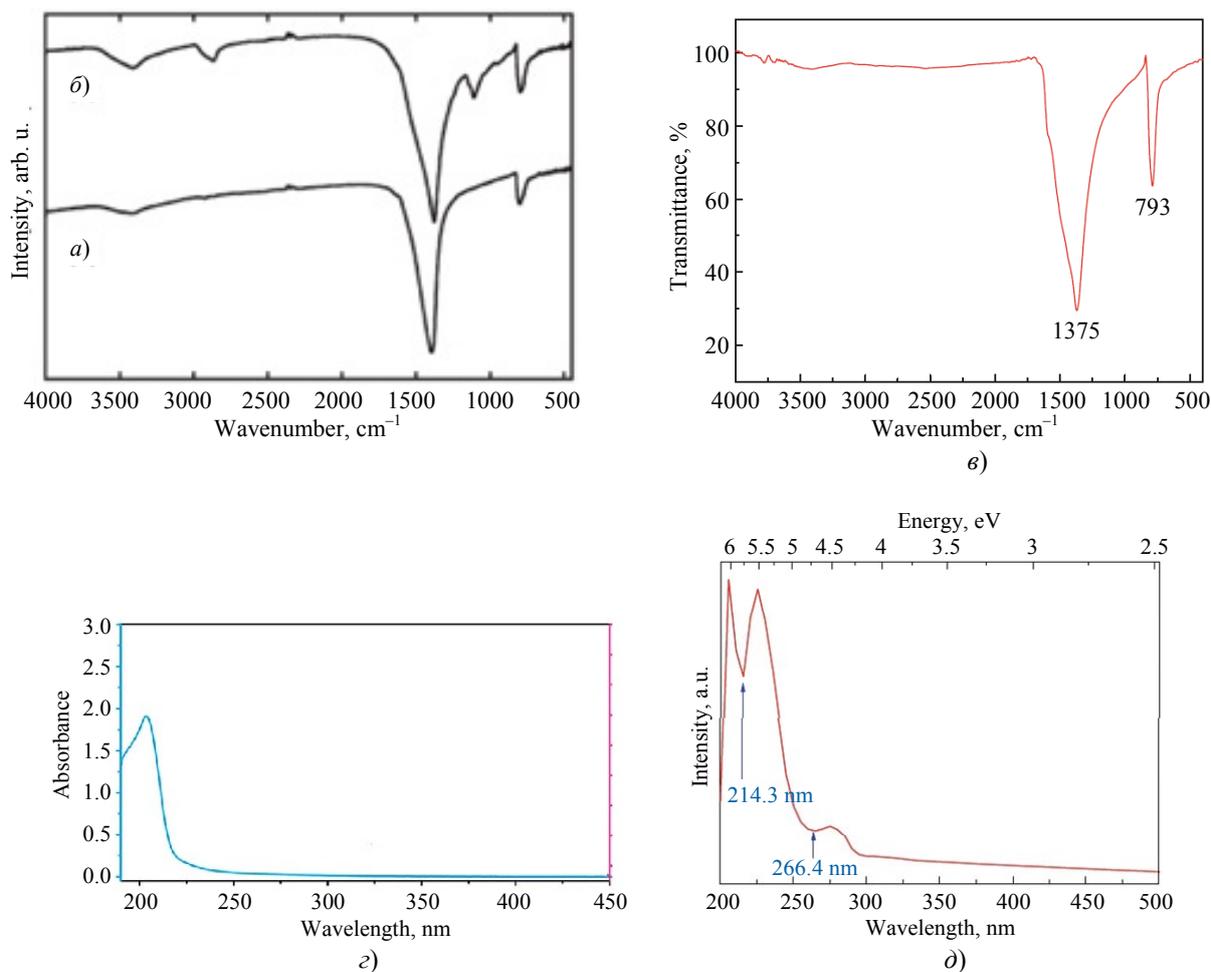


Рис. 1. Инфракрасные Фурье-спектры пропускания исходных (а) и восстановленных (б) бор-нитридных образцов в матрице KBr[26], (в) спектр пропускания BNNT (з) спектры поглощения в УФ-видимом диапазоне BNNT, (д) спектры отражения в УФ-видимом диапазоне BNNT [25]

Модели показателя преломления

Дисперсионная зависимость показателя преломления KBr хорошо известна и аппроксимируется следующим образом [27]:

$$n^2 = 1,39408 + \frac{0,79221\lambda^2}{\lambda^2 - (0,146)^2} + \frac{0,01981\lambda^2}{\lambda^2 - (0,173)^2} + \frac{0,15587\lambda^2}{\lambda^2 - (0,187)^2} + \frac{0,17673\lambda^2}{\lambda^2 - (60,61)^2} + \frac{2,06217}{\lambda^2 - (87,72)^2} \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны, выраженная в мкм.

Используя вычислительный метод, представленный в работах [27–29], в настоящей работе выполнены следующие расчеты.

Показано (рис. 2), что показатель преломления нанотрубок на основе нитрида бора зависит от хиральности (кресельные, зигзагообразные, хиральные).

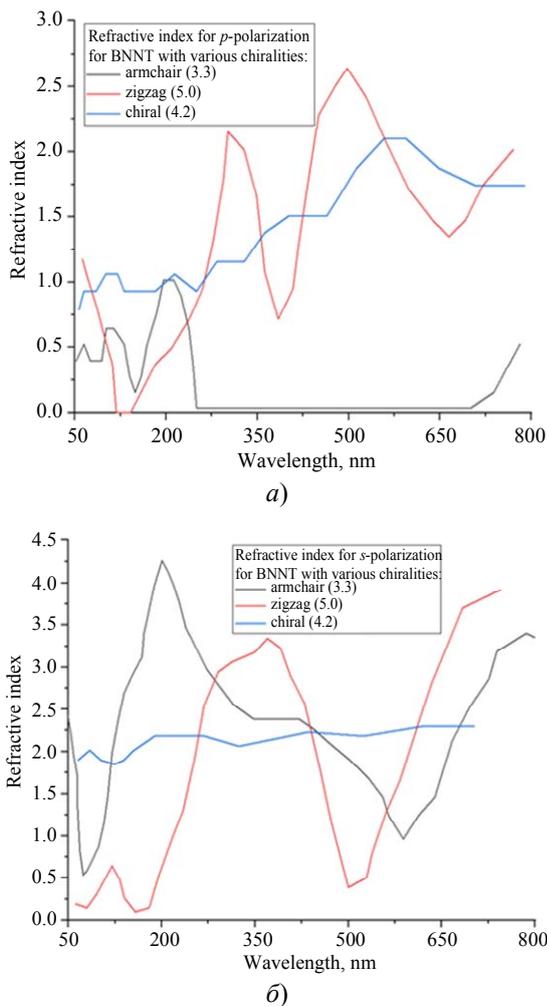


Рис. 2. Дисперсионные зависимости показателя преломления BNNT с разной хиральностью для р-поляризованного (а) и s-поляризованного (б) излучения в спектральном диапазоне 50–800 нм

Полученные рефрактивные свойства BNNT с разными видами хиральности не противоречат данным публикаций [30–34], где также были изучены оптические свойства таких структур.

Модели спектра отражения

Продолжая изучение спектральных параметров BNNT, нами также были рассчитаны потери на отражение на границе раздела KBr-BNNT (рис. 3), используя формулу Френеля (2) для нормального падения:

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_{\text{KBr}}(\lambda) - n_{\text{BNNT}}(\lambda)}{n_{\text{KBr}}(\lambda) + n_{\text{BNNT}}(\lambda)} \right)^2 \quad (2)$$

Здесь n_{KBr} и n_{BNNT} – показатели преломления для KBr (см. выражение 1) и BNNT (из данных рис. 2), которые зависят от длины волны λ .

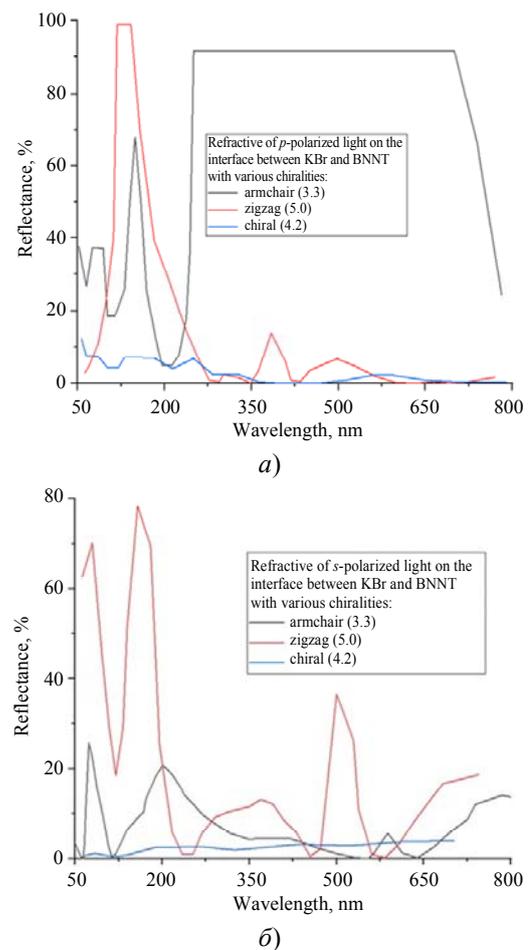


Рис. 3. Дисперсионные зависимости коэффициента отражения на границе раздела KBr-BNNT с разной хиральностью для р-поляризованного (а) и s-поляризованного (б) излучения в спектральном диапазоне 50–800 нм

Заметим, что при выборе хиральности нанотрубок были выбраны BNNT с хиральностью (4,2), аналогично [35]. Исходя из анализа публикаций [36–40] различных типов BNNT, данный тип нанотрубок обладает более оптимальной атомной конфигурацией.

Заключение

Из проведенных расчетов для дисперсионных зависимостей показателя преломления BNNT с разной хиральностью, а также из оценки дисперсионных зависимостей коэффициента отражения на границе раздела KBr-BNNT с разной хиральностью, установлено, что наиболее стабильными свойствами во всем исследованном спектральном диапазоне (от рентген до ближнего инфракрасного диапазона) являются бор – нитридные нанотрубки с хиральностью (4,2).

Показано, что для дальнейших расчетов энергий химических связей и оптимизации структур предпочтительнее использовать бор – нитридные нанотрубки с хиральностью (4,2), спектры отражения которых не более, чем на 10 % отличаются от расчетных и предсказуемы в обеих поляризациях в спектральном диапазоне от 50 до 800 нм.

Изученный наноструктурированный материал можно будет использовать в качестве нового конструкционного материала для спектроскопии например, при оптимизации поляризации плоскопараллельных пластин бромида калия в рентгеновских установках. Здесь приоритетом может стать невысокое отражение для выделенного спектрального диапазона. Проведенное исследование будет полезно в обучающем процессе при исследовании свойств наноструктурных композитов, функционирующих не только в видимом, но и в ИК-области спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блейз Х., Рубио А., Луи С. Г., Коэн М. Л. / *Europhys. Lett.* 1994. Vol. 28. P. 335.
2. Bai X. D., Wang E. G., Yu J. / *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 77. P. 67.
3. Рубио А., Коркилл Дж. Л., Коэн М. Л. / *Phys. Rev. B.* 1994. Vol. 49. P. 5081.
4. Эрнандес Э., Гоце К., Бернье П., Рубио А. / *Phys. Lett.* 1998. Vol. 80. P. 4502.
5. Чонра Н. Г., Луйкен Р. Дж., Чеппу К., Крепси В. Х., Коэн М., Луи С. Г., Зеттл А. / *Science.* 1995. Vol. 269. P. 966.
6. Loiseau A., Willaime F., Demoncey N., Hug G., Pascard H. / *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 76. P. 4737.
7. Terrones M., Hsu W., Terrones H., Zhang J., Ramos S., Hare J., Castollo R., Prassides K., Cheetham A., Kroto H., Walton D. / *Chem. Phys. Lett.* 1996. Vol. 259. P. 568.
8. Chen Y., Fitz Gerald J., Williams J., Bulcock S. / *Chem. Phys. Lett.* 1999. Vol. 299. P. 260.
9. Лу П., Гавилле Дж., Лами М., Шанель Д., Луазо А. / *Phys. Ред. Б.* 2001. Vol. 64. P. 121405.
10. Ма П., Бандо Й., Сато Т. / *Письма по химии и физике.* 2001. Т. 337. С. 61.
11. Гольберг Д., Бандо Ю., Курашима К., Сато Т. / *Chem. Phys. Lett.* 2000. Т. 323. P. 185.
12. Гольберг Д., Бандо Ю., Буржуа Л., Курашима К., Сато Т. / *Carbon.* 2000. Т. 38. P. 2017.
13. Han W., Bando Y., Kurashima K., Sato T. / *Chem. Phys. Lett.* 1999. Vol. 299. P. 368.
14. Han W., Bando Y., Kurashima K., Sato T. / *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 73. P. 3085.
15. Rubio A., Corkill J., Cohen M. / *Phys. Rev. B.: Condens. Matter.* 1994. Vol. 49. P. 5081.
16. Radosavljevi M., Appenzeller J., Derycke V., Martel R., Avouris Ph., Loiseau A., Cochon J.-L., Pignache D. / *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 82. P. 4131.
17. Cumings J., Zettl A. / *Solid State Commun.* 2004. Vol. 129. P. 661.
18. Han W., Mickelson W., Cumings J., Zettl A. / *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 81. P. 1110.
19. Tang C., Bando Y. / *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83. P. 659.
20. Xiao Y., Yan X., Xiang J., Mao Y., Zhang Y., Cao J., Ding J. / *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84. P. 4626.
21. Chopra N., Zettl A. / *Solid State Commun.* 1998. Vol. 105. P. 297.
22. Bettinger H., Dumitrica T., Scuseria G., Yakobson B. / *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* 2002. Vol. 65. P. 41406.
23. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Eklund P. C. *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes.* Academic Press. – New York, 1996.
24. Jacoby M. *Chem / Eng. News.* 2004. Vol. 82 (35). P. 34.
25. Zhong B., Huang X., Wen G., Yu H., Zhang X., Zhang T., Bai H. *Large / Nanoscale Res Lett.* 2010. Vol. 26.6 (1). P. 36.
26. Xie S. *et al.* / *Chem. Commun.* 2005. P. 3670–3672.
27. Li H. H. / *Journal of Physical and Chemical Reference Data.* 1976. Vol. 5. № 329. P. 436–448.
28. Jain S. K., Srivastava P. / *Journal of Applied Physics.* 2013. Vol. 114. № 073514. P. 1–9.
29. Sotudeh M., Boochani A., Parhizgar S. S., Masharian S. R. / *International Nano Letters.* 2020. Vol. 10. P. 293–301.
30. Bادهian H. A., Vatankhah C. / *Journal of Molecular Structure.* 2022. Vol. 1262. № 133069. P. 1–9.
31. Jain S. K., Srivastava P. / *Comp. Mater. Sci.* 2011. Vol. 50. P. 3038–3042.

32. Allard C., Nascimento R., Fossard F., Schu'e L., Flahaut E., Loiseau A. et al. / ChemRxiv. 2019. P. 171.
33. Kuzmany H., Shi L., Martinati M., Cambr'e S., Wenseleers W., K'urti J., Koltai J., Kukucska G., Cao K., Kaiser U., Saito T., Pichler T. / Carbon. 2021. Vol. 171. P. 221.
34. Borin B. G., Fairbrother A., Rotach L., Bayle M., Paillet M., Liang L., Meunier V., Hauert R., Dumschlaff T., Narita A., M'ullen K., Sahabudeen H., Berger R., Feng X., Fasel R., Ruffieux F. / ACS Appl. Nano Mater. 2019. Vol. 2. P. 2184.
35. Mutlu Z., Llinas J. P., Jacobse P. H., Piskun I., Blackwell R., Crommie M. F., Fischer F. R., Bokor J. / ACS Nano. 2021. Vol. 15. P. 2635.
36. Kayang K. W., Nyankson E., Efavi J. K., Abavare E. K. K., Garu G., Onwona-Agyeman B., Yaya A. / Results in Materials. 2019. Vol. 2. P. 100029.
37. Allard C., Schu'e L., Fossard F., Recher G., Nascimento R., Flahaut E., Loiseau A., Desjardins P., Martel R., Gaufr'es E. / Adv. Mater. 2020. Vol. 32. P. 202001429.
38. Cadena A., Botka B., Pekker A., Tschannen C. D., Lombardo C., Novotny L., Khlobystov A. N., Kamar'as K. Molecular encapsulation from the liquid phase and 6-armchair graphene nanoribbon growth in carbon nanotubes. June 2022. Vol. 2207. P. 09533.
39. Ciampalini G., Blaga C. V., Tappy N., Pezzini S., Watanabe K., Taniguchi T., Bianco F., Roddaro S., Fontcuberta A., Morral I., Fabbri F. / 2D Mater. 2022. Vol. 9. P. 035018.
40. Jordan J. W., Townsend W. J. V., Johnson L. R., Walsh D. A., Newton G. N., Khlobystov A. N. / Chem. Soc. Rev. 2021. Vol. 50. P. 10895.1.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Comparative analysis of the refractive and spectral properties of the potassium bromide with boron-nitride nanotubes interface

P. V. Kuzhakov^{1,2} and N. V. Kamanina^{1,2,3,*}

¹ AO "Scientific and Production Corporation S. I. Vavilov State Optical Institute",
St. Petersburg, 192171 Russia

* E-mail: nvkamanina@mail.ru

² B. P. Konstantinov Peterburg Institute of Nuclear Physics – National Research Center
"Kurchatov Institute", Gatchina, 188300 Russia

³ St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022 Russia

Received 16.04.2024; revised 31.05.2024; accepted 20.02.2026

The analysis of the refractive and spectral properties of the potassium bromide with the boron-nitride nanotubes interface is carried out. The most optimal type of the chirality of the boron-nitride nanotubes in the entire spectral range studied was revealed, which is established from the calculations performed for the dispersion dependences of the refractive index of the boron-nitride nanotubes with different chirality, as well as from the evaluation of the dispersion dependences of the reflection coefficient at the KBr-BNNT interface with different chirality.

Keywords: spectral range, refractive index, interface, reflection spectra.

REFERENCES

- Blaze X., Rubio A., Louis S. G., and Cohen M. L., Europhys. Lett. **28**, 335 (1994).
- Bai X. D., Wang E. G., and Yu J., Appl. Phys. Lett. **77**, 67 (2000).
- Rubio A., Corkill J. L., and Cohen M. L., Phys. Rev. B **49**, 5081 (1994).
- Erdinands E., Goze K., Bernier P., and Rubio A., Phys. Lett. **80**, 4502 (1998).
- Chopra N. G., Luyken R. J., Cherry K., Crespi V. X., Cohen M., Louis C. G., and Zettl A., Science **269**, 966 (1995).
- Loiseau A., Willaime F., Demoncy N., Hug G., and Pascard H., Phys. Rev. Lett. **76**, 4737 (1996).
- Terrones M., Hsu W., Terrones H., Zhang J., Ramos S., Hare J., Castollo R., Prassides K., Cheetham A., Kroto H., and Walton D., Chem. Phys. Lett. **259**, 568 (1996).
- Chen Y., Fitz Gerald J., Williams J., and Bulcock S., Chem. Phys. Lett. **299**, 260 (1999).
- Lee R., Gaville J., Lamy M., Chapelle D., and Loiseau A., Phys. Ed. B **64**, 121405 (2001).
- Ma R., Bando Y., and Sato T., Letters on Chemistry and Physics **337**, 61 (2001).

11. Golberg D., Bando Y., Kurashima K., and Sato T., *Chem. Phys. Lett.* **323**, 185 (2000).
12. Golberg D., Bando Y., Bourgeois L., Kurashima K., and Sato T., *Carbon* **38**, 2017 (2000).
13. Han W., Bando Y., Kurashima K., and Sato T., *Chem. Phys. Lett.* **299**, 368 (1999).
14. Han W., Bando Y., Kurashima K., and Sato T., *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3085 (1998).
15. Rubio A., Corkill J., and Cohen M., *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* **49**, 5081 (1994).
16. Radosavljevi M., Appenzeller J., Derycke V., Martel R., Avouris Ph., Loiseau A., Cochon J.-L., and Pigache D., *Appl. Phys. Lett.* **82**, 4131 (2003).
17. Cumings J. and Zettl A., *Solid State Commun.* **129**, 661 (2004).
18. Han W., Mickelson W., Cumings J., and Zettl A., *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1110 (2002).
19. Tang C. and Bando Y., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 659 (2003).
20. Xiao Y., Yan X., Xiang J., Mao Y., Zhang Y., Cao J., and Ding J., *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4626 (2004).
21. Chopra N. and Zettl A., *Solid State Commun.* **105**, 297 (1998).
22. Bettinger H., Dumitrica T., Scuseria G., and Yakobson B., *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* **65**, 41406 (2002).
23. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., and Eklund P. C., *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*. Academic Press. New York, 1996.
24. Jacoby M., *Chem., Eng. News.* **82** (35), 34 (2004).
25. Zhong B., Huang X., Wen G., Yu H., Zhang X., Zhang T., and Bai H. Large, *Nanoscale Res Lett.* **26.6** (1), 36 (2010).
26. Xie S. et al., *Chem. Commun.* 3670–3672 (2005).
27. Li H. H., *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **5** (329), 436–448 (1976).
28. Jain S. K. and Srivastava P., *Journal of Applied Physics* **114** (073514), 1–9 (2013).
29. Sotudeh M., Boochani A., Parhizgar S. S., and Masharian S. R., *International Nano Letters* **10**, 293–301 (2020).
30. Badehian H. A. and Vatankhah C., *Journal of Molecular Structure* **1262** (133069), 1–9 (2022).
31. Jain S. K. and Srivastava P., *Comp. Mater. Sci.* **50**, 3038–3042 (2011).
32. Allard C., Nascimento R., Fossard F., Schu e L., Flahaut E., Loiseau A. et al., *ChemRxiv*, 171 (2019).
33. Kuzmany H., Shi L., Martinati M., Cambr e S., Wenseleers W., K urti J., Koltai J., Kukucska G., Cao K., Kaiser U., Saito T., and Pichler T., *Carbon* **171**, 221 (2021).
34. Borin B. G., Fairbrother A., Rotach L., Bayle M., Paillet M., Liang L., Meunier V., Hauert R., Dumschlaff T., Narita A., M ullen K., Sahabudeen H., Berger R., Feng X., Fasel R., and Ruffieux F., *ACS Appl. Nano Mater.* **2**, 2184 (2019).
35. Mutlu Z., Llinas J. P., Jacobse P. H., Piskun I., Blackwell R., Crommie M. F., Fischer F. R., and Bokor J., *ACS Nano* **15**, 2635 (2021).
36. Kayang K. W., Nyankson E., Efavi J. K., Abavare E. K. K., Garu G., Onwona-Agyeman B., and Yaya A., *Results in Materials* **2**, 100029 (2019).
37. Allard C., Schu e L., Fossard F., Recher G., Nascimento R., Flahaut E., Loiseau A., Desjardins P., Martel R., and Gaufr es E., *Adv. Mater.* **322**, 202001429 (2020).
38. Cadena A., Botka B., Pekker A., Tschannen C. D., Lombardo C., Novotny L., Khlobystov A. N., and Kamar as K., *Molecular encapsulation from the liquid phase and 6-armchair graphene nanoribbon growth in carbon nanotubes.* **2207**, 09533 (June 2022).
39. Ciampalini G., Blaga C. V., Tappy N., Pezzini S., Watanabe K., Taniguchi T., Bianco F., Roddaro S., Fontcuberta A., Morral I., and Fabbri F., *2D Mater.* **9**, 035018 (2022).
40. Jordan J. W., Townsend W. J. V., Johnson L. R., Walsh D. A., Newton G. N., and Khlobystov A. N., *Chem. Soc. Rev.* **50**, 10895.1 (2021).

Об авторах

Кужаков Павел Викторович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (192171, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 36, корп. 1); Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (188300, Россия, Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1). E-mail: kpv_2002@mail.ru SPIN-код: 7178-5273, AuthorID: 977752

Каманина Наталия Владимировна, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, начальник отдела, АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (192171, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 36, корп. 1); Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (188300, Россия, Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1); Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (197022, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф). E-mail: nvkamanina@mail.ru SPIN-код: 1231-5045, AuthorID: 40388

УДК 53.096+ 541.64+544.77+537.226.
 EDN: RTYYGX

PACS: 182.45.Hk

Влияние стехиометрии и условий синтеза на фазовый состав, структуру и электрофизические свойства тонких пленок халькопиритов $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$ – перспективных электродов для фотоэлектрохимического разложения воды

© В. В. Ракитин^{1,*}, И. Д. Кулеметьев^{1,2}, У. Р. Бакланова^{1,2}, Д. С. Луценко¹,
 А. В. Станчик³, Е. В. Рабенюк¹, М. В. Гапанович^{1,2,4}

¹ *ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, 142432 Россия*
 * E-mail: domi-tyan@yandex.ru

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФФФХИ, Москва, 119991 Россия*

³ *ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»,
 г. Минск, 220072 Республика Беларусь*

⁴ *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
 Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия*

Статья поступила в редакцию 29.10.2025; после доработки 12.11.2025; принята к публикации 20.02.2026
 Шифр научной специальности: 1.3.11

Изучено влияние стехиометрии и условий синтеза на фазовый состав, структуру и электрофизические свойства тонких пленок халькопиритов $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$ на подложках Mo/MoO_x. Установлено, что для получения однофазных пленок наиболее оптимальны отжиг в парах селена при $T = 650$ °C в течение времени от 15 мин до 30 мин. Для фотокатодов со структурой Mo/MoO_x/Ag_{0.9}Cu_{0.1}GaSe₂ получено рекордное значение плотности фототока 1.763 мА/см² (при $E = -0.517$ В относительно 3М хлорсеребряного электрода) в условиях освещения, близких к AM1.5, по сравнению с устройствами на основе подобных халькопиритов, описанных в мировой литературе.

Ключевые слова: тонкие пленки, электроды, халькопириты CuGaSe₂ и AgGaSe₂, фазовый состав, электрофизические свойства.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-72-80

Введение

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений развития фотовольтаики является получение водорода методом фотоэлектрохимического разложения воды. Для этой цели применяется большое количество различных соединений – таких, как Na-TiO₃:La, TiO₂, WO₃@BiVO₄, соединения группы A^{III}-B^{IV}, халькопириты A^I-B^{III}-C^{VI}₂ и другие. Все они могут выступать в качестве фотокатодов или фотоанодов и иметь как определенные достоинства, так и характерные недостатки.

Так фотокатоды на основе NaTaO₃:La имеют одну из самых высоких скоростей разложения воды (9,7 ммоль/ч) и высокий квантовый выход (около 57 % при освещении 270–300 нм). Однако для этого необходимо использовать УФ-излучение, а поверхность фотокатода должна быть неравномерной и позволяющей адсорбировать выделяющийся водород [1]. Применение широкозонного полупроводника *n*-типа TiO₂ с $E_g = 3$ эВ также требует освещения в УФ-области. Кроме того, для данной системы необходимо наличие Pt или любого полупроводника *p*-типа в качестве вспомогательного электрода для целевой ре-

акции выделения водорода [1, 2]. По сравнению с TiO_2 соединение BiVO_4 имеет меньшую ширину запрещенной зоны ($E_g = 2,4$ эВ) и затрагивает видимую часть солнечного спектра [3]. В работе [4] показано, что фотоаноды на основе тонких плёнок BiVO_4 обладают эффективностью $\eta = 5,2\%$ (освещение AM1.5), а с применением наноструктур типа ядро-оболочка $\text{WO}_3@\text{BiVO}_4$ КПД таких устройств может составлять до $8,2\%$ [5, 6]. Однако для достижения таких значений и высоких плотностей фототока ($6,56$ мА/см²) требуется тандемная структура в виде $\text{WO}_3@\text{BiVO}_4$ (фотоэлектрохимическая ячейка) – GaAs/InGaAsP (гетеропереход), что очень сильно усложняет конструкцию и цену производства. Фотокатоды на основе тонких плёнок соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{-B}^{\text{IV}}$ обладают эффективностью до 14% , однако они остаются достаточно сложными в производстве и дорогостоящими в цене. Кроме того, продолжительный срок эксплуатации таких фотокатодов в водных растворах небольшой [7]. Еще одним из видов полупроводников, которые потенциально могут быть использованы для получения водорода – порошки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ($0,2 \leq x \leq 0,35$), обладающие различной шириной запрещенной зоны $E_g = 2,49\text{--}2,68$ в зависимости от содержания цинка в пленках. Такие системы могут работать в видимом диапазоне солнечного света и генерировать водород со скоростью $0,35$ ммоль/ч·г_{кат}. Однако для эффективного процесса фоторазложения воды необходимо использовать постоянно расходуемый компонент $\text{SO}_3^{2-}/\text{S}^{2-}$, который выступает в качестве донора электронов и способствует процессу восстановления ионов водорода из раствора [8]. На сегодняшний момент более перспективный подход – создание гетероперехода с полупроводниками p -типа для увеличения плотности фототока и более простого переноса электронов к активным центрам на поверхности.

Для достижения данной цели можно использовать альтернативу дорогим фотокатодам на основе полупроводников III–V групп соединения типа $\text{A}^{\text{I}}\text{-B}^{\text{III}}\text{-C}^{\text{VI}}_2$ с кристаллической структурой халькопирита, в частности CuGaSe_2 (CGS) и AgGaSe_2 (AGS), а также твердые растворы на их основе. Главным преимуществом данных соединений является разнообразная ширина запрещенной зоны

($E_g \sim 1,6\text{--}1,8$ эВ), близкая к оптимальному значению для эффективного поглощения солнечного излучения и преодоления термодинамического порога разложения воды ($1,23$ В), а также низкая цена по сравнению с соединениями группы $\text{A}^{\text{III}}\text{-B}^{\text{IV}}$ [9, 10, 11]. При учете высоких потенциалов реакций выделения водорода и кислорода, вызванных низкой поверхностной активностью полупроводника в качестве фотоэлектрода и рядом других потерь, оптимальным значением для разложения молекулы воды считается $E_g \sim 1,7$ эВ [12]. Наибольшее распространение для получения высокоэффективных фотокатодов на основе CuGaSe_2 получил метод термического испарения элементов в вакууме. Пленки CGS, полученные этим методом, демонстрируют высокую кристалличность и крупные зерна ($1\text{--}2$ мкм), а эффективность фотоэлектрохимического разложения воды достигает $\eta \sim 10\%$ [13]. Известно, что важной особенностью этого метода является контроль состава, так как соотношение Cu/Ga значительно влияет на свойства фотокатодов. В работе [14] устройства на основе пленок с разным соотношением Cu/Ga обладали высокими значениями плотности фототока: $-19,0$ мА/см² для $\text{Cu/Ga} = 0,85$ и $-12,1$ мА/см² для $\text{Cu/Ga} = 0,33$ (при потенциале $E = -0,4$ В относительно обратимого водородного электрода, ОБЭ) и 0 мА/см² для $\text{Cu/Ga} = 0,85$ и $-8,2$ мА/см² для $\text{Cu/Ga} = 0,33$ (при потенциале $E = 0$ В отн. ОБЭ) в $0,5$ М H_2SO_4 ($\text{pH} = 0,4$). Для чистого монокристалла CuGaSe_2 в работе [15] были достигнуты значения $j_{ph} = 0,3$ мА/см² (при потенциале $E = 0$ В отн. ОБЭ, что соответствует $-0,517$ В отн. 3M XCS).

Кроме того, авторы многих работ утверждают, что термический отжиг, особенно в атмосфере селена, является мощным инструментом для управления дефектной структурой и, как следствие, фотоэлектрофизическими свойствами. Основная цель такого типа отжига – компенсация потерь селена и устранение селен-дефицитных дефектов (вакансии V_{Se}), которые являются глубокими рекомбинационными центрами. Отжиг способствует пассивации акцепторных уровней, связанных с вакансиями меди V_{Cu} и галлия V_{Ga} [16]. Так, например, отжиг в атмосфере Se резко снижает удельное сопротивление пленок CGS p -типа до $1\text{--}10$ Ом·см [17]. В некоторых случаях при-

менение быстрого термического отжига уже к готовым солнечным элементам на основе CGS позволило повысить их КПД с 10 % до 11,46 % за счет пассивации границ зерен и улучшения качества гетероперехода [18]. Для высокой эффективности фотокатодов на основе AGS обычно требуется отжиг в атмосфере селена при 600 °C [19], так как при низких температурах отжига образцы представляют собой смесь фаз Ag, Ga₂Se₃, GaSe и целевого AgGaSe₂. В [20] описывается получение фотокатодов на основе AGS без гетероперехода, значение плотности фототока было 0,2 мА/см² (при потенциале $E = -0,1$ В отн. ОБЭ) при освещении светом с длиной волны 420–800 нм (Xe лампа, мощность 300 Вт). Особый интерес представляют твердые растворы Ag_xCu_{1-x}GaSe₂, так как фотокатоды на их основе показывают большие значения фототока. В работе [20] описывают получение пленок смешанного состава, в котором ~6 % меди замещено атомами серебра. Полученный фотокатод со структурой FTO/Ag_{0,06}Cu_{0,94}GaSe₂/CdS/Pt обладал плотностью фототока 8,1 мА/см² (при потенциале $E = 0$ В отн. ОБЭ). В свою очередь фотокатод без гетероперехода FTO/Ag_{0,06}Cu_{0,94}GaSe₂ имел значения плотности фототока $j_{ph} \sim 1,4$ мА/см² (при потенциале $E = 0$ В отн. ОБЭ).

В наших предыдущих работах [21, 22] было установлено, что в системе порошков твердых растворов Ag_xCu_{1-x}GaSe₂ увеличение доли серебра приводит к росту времени жизни фотогенерированных носителей и лучшие значения фототока были характерны для порошков с большим содержанием серебра. Это явление объясняется замещением глубоких ловушек на более мелкие. Однако такие составы не исследовались в качестве фотокатодов для прямого разложения воды в фотоэлектрохимических ячейках.

Поэтому в данной работе изучалось влияние условий синтеза тонких пленок Ag_xCu_{1-x}GaSe₂ на их фазовый состав, структуру и их применимость в качестве фотокатодов для прямого разложения воды в фотоэлектрохимических ячейках.

Экспериментальная часть

Синтез тонких пленок Ag_xCu_{1-x}GaSe₂ проводился в несколько стадий. На первой

стадии методом высокотемпературного твердотельного синтеза были получены интерметаллиды различного состава CuGa₂, Ag₂Ga₃. На следующей стадии синтеза металлы и интерметаллиды необходимой массы термически испарялись в вакууме на предварительно нагретую подложку Mo/MoO_x. Заключительной стадией синтеза являлся отжиг полученных пленок в активной атмосфере селена. Такой способ синтеза халькопиритных пленок иных составов был разработан нами ранее [23] и хорошо себя зарекомендовал. Полученные пленки представляли собой следующую структуру Mo (500 мкм)/MoO_x (0,05 мкм)/Ag_xCu_{1-x}GaSe₂ (1,50 мкм).

Исследование фазового состава пленок проводилось методом РФА (PANalitical Aeria, излучение Cu-K_α). Исследование применимости полученных пленок в качестве фотокатодов проводилось в трехэлектродной электрохимической ячейке с рабочим электродом стекло/Mo/MoO_{3-x}/пленка Ag_xCu_{1-x}GaSe₂, графитовым противоэлектродом и электродом сравнения 3 М хлорсеребряным электродом (ХСЭ) в условиях импульсного освещения, близких к АМ1.5 (металлогалогенная лампа, $P = 0,1$ Вт/см²). Для увеличения шунтирующего сопротивления осуществлялась изоляция краев образца. В качестве электролита использовался раствор, содержащий CH₃COOH (0,1 М) + CH₃COOK (0,175 М) + K₂SO₄ (0,1 М) (ацетатный буфер с pH = 5), позволяющий уменьшить коррозию подложек Mo/MoO_x. Скорость развертки потенциала 5 мВ/с.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а представлены дифрактограммы плёнок AgGaSe₂, полученные при различных условиях. Для плёнок AgGaSe₂, полученных при температуре 550 °C, было характерно уменьшение количества примесных фаз с увеличением длительности отжига. В пленках присутствуют примесная кубическая фаза халькопирита Ag₉GaSe₆ (*P231*), обогащенного серебром, гексагональная фаза GaSe (*P63mc*) и некоторые фазы, которые не удалось идентифицировать. Интенсивность линий основной фазы AgGaSe₂ с ростом времени отжига уменьшалась. Такое изменение интенсивностей можно связать с термическим разложением

ем AgGaSe_2 до Ag_9GaSe_6 и легколетучей фазы Ga_2Se_3 при увеличении времени термической обработки. Плёнки AgGaSe_2 , полученные при 650°C , содержали наименьшее количество примесных фаз, чем при 550°C . С увеличени-

ем длительности термической обработки увеличивается интенсивность линий основной халькопиритной фазы и уменьшается количество примесной фазы GaSe гексагональной модификации (*P63mc*).

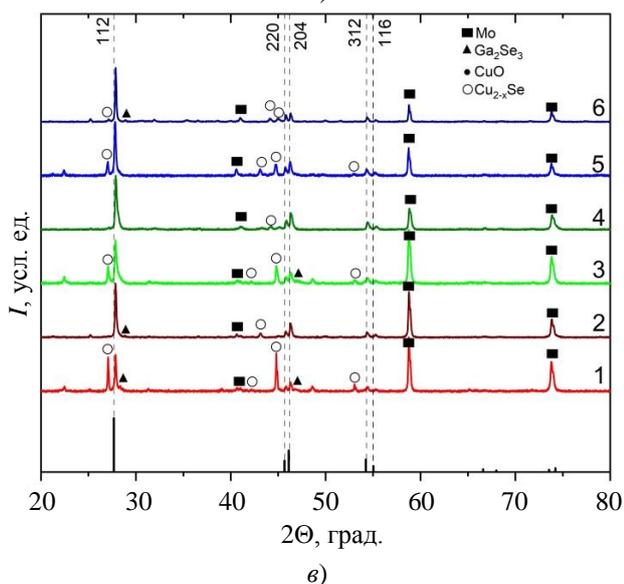
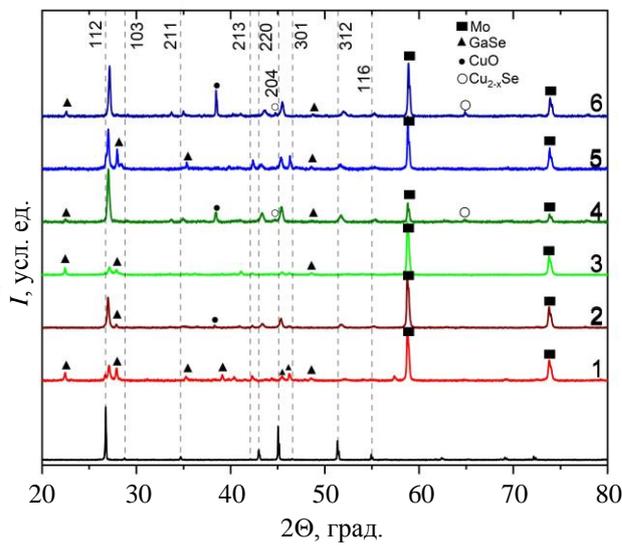
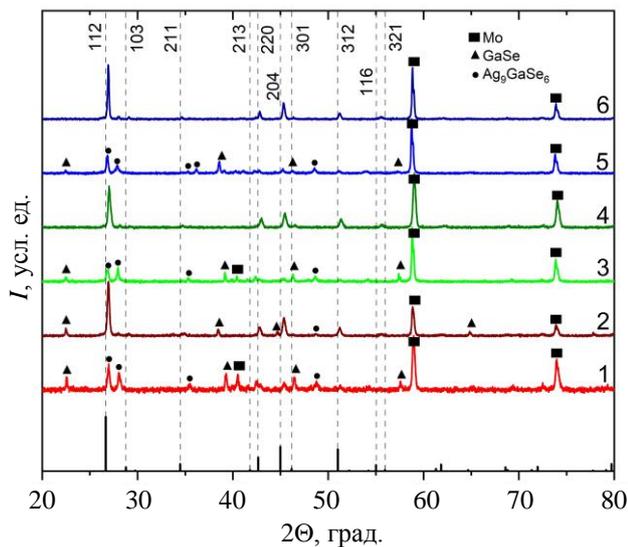


Рис. 1. Дифрактограммы плёнок AgGaSe_2 (а), $\text{Ag}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{GaSe}_2$ (б) и CuGaSe_2 (в), полученных при условиях: 1) 550°C , 10 мин; 2) 650°C , 10 мин; 3) 550°C , 15 мин; 4) 650°C , 15 мин; 5) 550°C , 30 мин; 6) 650°C , 30 мин. Пунктирными линиями указаны рефлексы эталона AgGaSe_2 и CuGaSe_2 , а также порошка $\text{Ag}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{GaSe}_2$ [21]

Для плёнок $\text{Ag}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{GaSe}_2$ (рис 1б), отожженных при 550°C , наблюдается увеличение интенсивности основной фазы и уменьшение интенсивности примесной фазы GaSe . Для плёнок, полученных при 650°C , с увеличением времени отжига хоть и наблюдается увеличение интенсивности линий основной халькопиритной фазы, все же присутствуют примесные фазы Cu_{2-x}Se кубической модификации (*F-43m*) и GaSe гексагональной модификации (*P63mc*). Это может быть связано с тем, что, хотя при повышенной тем-

пературе и образуется целевая фаза $\text{Ag}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{GaSe}_2$, но при слишком длительном времени отжига начинает распадаться.

Для плёнок CuGaSe_2 (рис. 1в), отожженных при 550°C , было характерно наличие примесных фаз кубической модификации (*F-43m*) Cu_{2-x}Se и Ga_2Se_3 при различной длительности отжига. Вероятно, этого времени при данной температуре недостаточно для формирования однофазной пленки, так как медь с селеном образуют большое количество промежуточных селенидов и равновесия в си-

стеме не успевает установиться. Для пленок AgGaSe_2 , например, такого не наблюдается, так как существует только фаза Ag_2Se и требуется меньше времени для достижения равновесия в системе. Более высокая температура отжига 650°C , как и увеличение длительности термической обработки также не особо влияет на состав получаемых пленок CuGaSe_2 .

Параметры кристаллической решетки a , c и объема элементарной ячейки V для пленок $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$, полученных при различных условиях, менялись нелинейно. При этом для образцов CuGaSe_2 только пленки, полученные при 650°C со временем отжига 30 мин, имеют

самые близкие значения параметров кристаллической решетки $a = 5,611(6) \text{ \AA}$, $c = 10,989(25) \text{ \AA}$ и $V = 346,0(6) \text{ \AA}^3$ по сравнению с порошками того же состава [21, 22]. Среди образцов, содержащих серебро, только пленки $\text{Ag}_{0,9}\text{Cu}_{0,1}\text{GaSe}_2$, полученные при 650°C со временем отжига 15 мин, и пленки AgGaSe_2 , полученные при 650°C со временем отжига 30 мин, имели схожие значения параметров кристаллической решетки $a = 5,937(9) \text{ \AA}$, $c = 10,87(7) \text{ \AA}$ и $V = 380,0(21) \text{ \AA}^3$ и $a = 5,976(4) \text{ \AA}$, $c = 10,702(23) \text{ \AA}$ и $V = 382,3(5) \text{ \AA}^3$, соответственно, по сравнению с порошками того же состава [21, 22].

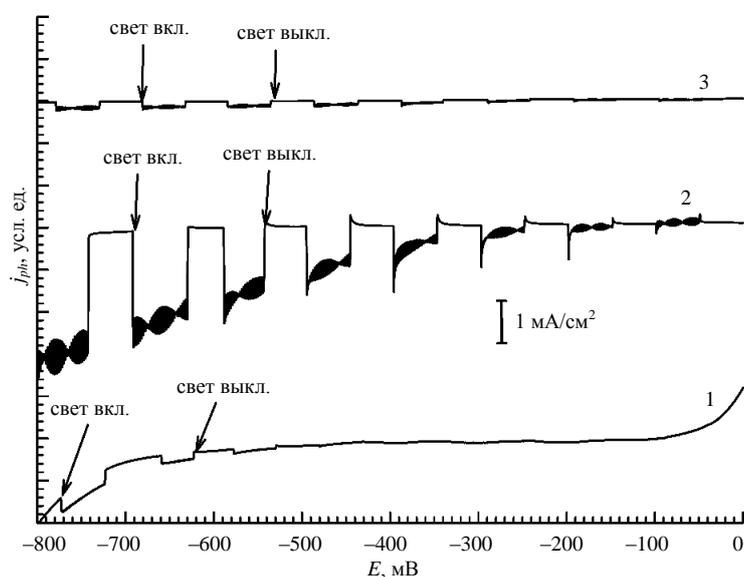


Рис. 2. Вольтамперные зависимости (отн. 3М ХСЭ) в условиях прерывистого освещения светом пленок $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$, полученных при разных условиях:
(1) – CuGaSe_2 (550°C , 30 мин);
(2) – $\text{Ag}_{0,9}\text{Cu}_{0,1}\text{GaSe}_2$ (550°C , 15 мин);
(3) – AgGaSe_2 (650°C , 10 мин)

На рис. 2 представлены вольтамперные зависимости в условиях прерывистого освещения, наилучшим образом отображающие электрофизические свойства пленок $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$, полученных при разных условиях. Как видно из рисунка пленки различного состава имеют p -тип темновой проводимости, о чем свидетельствует увеличение амплитуды фототока при смещении в отрицательную область потенциала. При этом возрастание плотности фототока коррелируется с увеличением времени жизни фотогенерированных носителей тока для порошков аналогичного состава, описанных нами в [21, 22].

На основе изученных вольтамперных кривых были получены значения плотности фототока j_{ph} для пленок с наилучшими фотоэлектрическими характеристиками. Кро-

ме того, на основе изученных вольтамперных кривых были рассчитаны последовательное (R_s) и шунтирующее (R_{sh}) сопротивления исходя из соотношений: $\frac{1}{R_{sh}} \sim \left[\frac{dI}{dE} \right]$ при $E \rightarrow 0$,

$\frac{1}{R_{sh}} \sim \left[\frac{dI}{dE} \right]$ при $I \rightarrow 0$, где I – ток, E – потенциал [24]. Исходя из известной толщины и площади синтезированных пленок рассчитывались значения удельного сопротивления (ρ). В таблице представлены сводные данные с этими значениями для пленок $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$, полученных при разных условиях. Для сравнения с данными, имеющимися в литературе [14, 20], также приведены значения плотностей фототока, пересчитанные относительно 3М ХСЭ.

Таблица

Значения плотности фототока j_{ph} , последовательного R_s и шунтирующего R_{sh} сопротивлений для пленок $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$, полученных при разных условиях

Состав пленки	Условия синтеза	j_{ph} , мА/см ² (при $E = -0,517$ В отн. 3М ХСЭ)	R_s , кОм	R_{sh} , кОм	ρ , МОм·см
CuGaSe ₂	550 °С 10 мин	0,017	2,8	6,6	0,9
	550 °С 15 мин	0,026	71,3	92,2	23,8
	550 °С 30 мин	0,015	39,1	53,5	13,0
	650 °С 10 мин	0,066	5,0	0,5	1,7
	650 °С 15 мин	0,026	4,4	7,3	1,5
	650 °С 30 мин	0,011	5,4	4,9	1,8
Ag _{0,9} Cu _{0,1} GaSe ₂	550 °С 10 мин	0,049	147,5	37,8	49,2
	550 °С 15 мин	1,763	0,5	2,2	0,2
	550 °С 30 мин	0,16	7,9	4,8	2,6
	650 °С 10 мин	0,029	6,0	17,3	2,0
	650 °С 15 мин	0,075	65,3	2,9	21,8
	650 °С 30 мин	0,0074	8,2	5,8	2,7
AgGaSe ₂	550 °С 10 мин	0,014	1,2	12,3	0,4
	550 °С 15 мин	0,029	0,7	16,2	0,2
	550 °С 30 мин	0,132	0,5	7,4	0,2
	650 °С 10 мин	0,012	26,2	59,7	8,7
	650 °С 15 мин	0,035	0,5	2,6	0,2
	650 °С 30 мин	0	–	–	–

Как видно из таблицы, для состава CuGaSe₂ наилучшими значениями плотности фототока $j_{ph} = 0,066$ мА/см² (при $E = -0,517$ В отн. 3М ХСЭ) обладают образцы CuGaSe₂, отожженные при 650 °С в течение 10 мин, что хорошо согласуется с литературными данными для данного типа полупроводниковых материалов [14, 15]. Для образцов на основе AgGaSe₂ лучший фототок $j_{ph} = 0,132$ мА/см² (при $E = -0,517$ В отн. 3М ХСЭ) был получен для пленок, которые отжигались при 550 °С в течение 30 мин. При этом значения шунтирующего и последовательного сопротивлений имеют довольно низкие значения. Полученные данные по плотности фототока хорошо согласуются с [20]. Для фотокатодов со структурой Мо/МоО_х/Ag_{0,9}Cu_{0,1}GaSe₂, отожженных при 550 °С в течение 15 мин, получено рекордное значение плотности фототока 1,763 мА/см² (при $E = -0,517$ В относительно 3М ХСЭ) в условиях освещения, близких к АМ1.5, по сравнению с устройствами на основе подобных халькопиритов, описанных в мировой литературе [14, 15, 20]. При этом материалы об-

разца обладают низкими значениями последовательного $R_s = 0,5$ кОм и удельного $\rho = 0,2$ МОм·см сопротивлений. Таким образом, на основе совокупности полученных нами и литературных [20] данных, можно заключить, что эффективность в твердых растворах $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$ меняется нелинейно. В диапазоне $0 \leq x \leq 0,06$ наблюдается значительное увеличение плотности фототока, далее при $0,06 \leq x \leq 0,2$ наблюдается сильное уменьшение j_{ph} , а затем – снова рост до $x = 0,9$. Полученные электрофизические характеристики пленок хорошо коррелируются с данными по временам жизни для порошков схожего смешенного состава $Ag_xCu_{1-x}GaSe_2$, в которых лучшие значения были получены для образцов с большими концентрациями серебра [21, 22]. Наблюдаемое явление может быть обусловлено изменением дефектной структуры образцов, а именно – уменьшением глубины и количества ловушек для носителей заряда. При увеличении содержания серебра в образцах происходит последовательное замещение глубоких акцепторных уровней мелкими донорными.

Заключение

Проведено исследование влияния стехиометрии и условий синтеза на фазовый состав, структуру и электрофизические свойства тонких пленок халькопиритов $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ на подложках Mo/MoO_x . Установлено, что для синтеза пленок состава $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ ($x = 0, 0,9$ и 1) на подложках Mo/MoO_x наиболее оптимален отжиг в парах селена при $T = 650$ °С в течение времени от 15 мин до 30 мин. При данных условиях образуются пленки со структурой халькопирита пространственной группы $I-42d$ с параметрами кристаллической решетки наиболее близкими к таковой для порошков аналогичного состава. При этом наилучшими электрофизическими свойствами и наибольшей эффективностью обладают электроды на основе халькопиритов состава $\text{Ag}_{0,9}\text{Cu}_{0,1}\text{GaSe}_2$, полученные при $T = 550$ °С и $t = 15$ мин. При этом наличие в пленках малых количеств данных примесных фаз, по нашему мнению, не влияют существенно образом на фототок, более значительный вклад при этом вносит стехиометрия фотоактивной фазы. На таких образцах в условиях импульсного освещения, близких к АМ1.5, удалось достигнуть рекордной плотности фототока $j_{ph} = 1,763$ мА/см² (при $E = -0,517$ В относительно 3М ХСЭ). При этом эффективность электродов на основе твердых растворов $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ на всем диапазоне x меняется нелинейно. Возрастание j_{ph} коррелирует с увеличением времен жизни фотогенерированных носителей тока для порошков аналогичного состава, что может быть обусловлено изменением дефектной структуры образцов, а именно – уменьшением глубины и количества ловушек для носителей заряда.

Работа выполнена при финансовой поддержки РНФ (Соглашение № 24-43-10003) и БРФФИ (грант № T23РНФМ-029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kudo A., Miseki Y. / Chemical Society Reviews. 2009. Vol. 38. P. 253.
2. Eidsvåg H., Bentouba S., Vajeeston P., Yohi S., Velauthapillai D. / Molecules. 2021. Vol. 26. P. 1687.
3. Shafiq I., Hussain M., Shehzad N., Maafa I. M., Akhter P., Shafique S., Razaq A., Yang W., Tahir M., Russo N. / J. Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol. 7. № 4. P. 103265.
4. Abdi F. F., Han L., Smets A. H., Zeman M., Dam B., Van De Krol R. / Nat. Commun. 2013. Vol. 4. № 1. P. 2195.
5. Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K., Uemura J., Kazoe Y., Kosar S., Makita K., Sugaya T., Matsui T., Fujita D., Tosa M. / Scientific reports. 2015. Vol. 5. № 1. P. 11141.
6. Kosar S., Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K., Uemura J., Kazoe Y., Makita K., Sugaya T., Matsui T., Fujita D., Tosa M. / Japanese journal of applied physics. 2016. Vol. 55. № 4S. P. 04ES01.
7. May M. M., Lewerenz H. J., Lackner D., Dimroth F., Hannappel T. / Nature Communications. 2015. Vol. 6. № 1. P. 8286.
8. Del Valle F., Ishikawa A., Domen K., De La Mano J. V., Sánchez-Sánchez M. C., González I. D., Herreras S., Mota N., Rivas M. E., Galván M. Á., Fierro J. L. G. / Catalysis Today. 2009. Vol. 143. № 1-2. P. 51–56.
9. Turner J. A. / Science. 2004. Vol. 305. P. 972.
10. Barreto L., Makihira A., Riahi K. / Int. J. Hydrogen Energy. 2003. Vol. 28. P. 267.
11. Leijtens T., Bush K. A., Prasanna R., McGehee M. D. / Nat. Energy. 2018. Vol. 3. P. 828.
12. Jacobsson J., Fjällström V., Edoff M., Edvinsson T. / Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2015. Vol. 138. P. 87.
13. Ishizuka Sh., Okamoto R., Ikeda Sh. / Adv. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 9. № 25. P. 2201266.
14. Mahmoudi B., Caddeo F., Lindenberg T., Schneider T., Hölscher T., Scheer R., Maijenburg A. W. / Electrochim. Acta. 2021. Vol. 367. P. 137183.
15. Ikeda S., Fujita W., Katsube R., Nose Y., Suzuki H., Abe R., Yoshino K. / Electrochimica Acta. 2023. Vol. 454. P. 142384.
16. Пономарева И. П., Серов А. Ю., Боднарь И. В. / Физика твердого тела. 2007. Т. 49. № 1. С. 23–27.
17. Ramakrishna Reddy K. T., Jayarama Reddy P. / Thin Solid Films. 1994. Vol. 253. P. 238–242.
18. Karthikeyan S., Hwang S., Sibakoti M., Bontrager T., Liptak R. W., Campbell S. A. / Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 493. P. 105–111.
19. Jung S., Kim J. / J. Nanosci. Nanotechnol. 2016. Vol. 16. № 5. P. 5279–5284.
20. Zhang L., Minegishi T., Kubota J., Domen K. / Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. Vol. 16. P. 6167.
21. Rakitin V. V., Gapanovich M. V., Lutsenko D. S., Nazarov V. B., Stanichik A. V., Gremenok V. F., Kabyliatski A. V. / High Energ. Chem. 2024. Vol. 58. № 5. P. 492–498.
22. Ракитин В. В., Гапанович М. В., Рабенко Е. В., Калимуллина Д. Р., Луценко Д. С., Кулеметьев И. Д., Кольцов Е. Н., Станчик А. В., Гременок В. Ф. / Конденсированные среды и межфазные границы. 2025. Т. 27. № 3. С. 441.
23. Алдошин С. М., Бочарова С. И., Новиков Г. Ф., Гапанович М. В. Способ изготовления фоточувствительных халькопиритных пленок. Патент на изобретение № RU 2567191 С1 (РФ). 2015.
24. Das D., Damodare L. / Mater. Chem. Phys. 1998. Vol. 56. Iss. 2. P. 116–124.

Effect of stoichiometry and synthesis conditions on the phase composition, structure, and electrophysical properties of thin films of $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ – chalcopyrites, promising electrodes for photoelectrochemical decomposition of water

V. V. Rakitin^{1,*}, I. D. Kulemetyev^{1,2}, U. R. Baklanova^{1,2}, D. S. Lutsenko¹, A. V. Stanchik³, E. V. Rabenok¹, and M. V. Gapanovich^{1,2,4}

¹ Federal Research Center on Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Region, Chernogolovka, 142432 Russia

* E-mail: domi-tyan@yandex.ru

² Faculty of Fundamental Physical and Chemical Engineering, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

³ Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk 220072 Republic of Belarus

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

Received 29.10.2025; revised 12.11.2025; accepted 20.02.2026

The effect of stoichiometry and synthesis conditions on the phase composition, structure, and electrophysical properties of $\text{Ag}_x\text{Cu}_{1-x}\text{GaSe}_2$ chalcopyrite thin films on Mo/MoO_x substrates, promising electrodes for photoelectrochemical decomposition of water, is studied. It has been found that annealing in selenium vapor at $T = 650$ °C for a period of 15 minutes to 30 minutes is most optimal for obtaining single-phase films. For the first time, for samples of the $\text{Ag}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{GaSe}_2$ composition synthesized at 550 °C for 15 minutes, a record photocurrent density of 1.763 mA/cm² (at $E = -0.517$ V relative to 3M SSCE) was obtained under lighting conditions close to AM1.5.

Keywords: thin films, electrodes, chalcopyrites CuGaSe_2 and AgGaSe_2 , phase composition, electrophysical properties.

REFERENCES

1. Kudo A. and Miseki Y., Chemical Society Reviews **38**, 253 (2009).
2. Eidsvåg H., Bentouba S., Vajeeston P., Yohi S., and Velauthapillai D., Molecules **26**, 1687 (2021).
3. Shafiq I., Hussain M., Shehzad N., Maafa I. M., Akhter P., Shafique S., Razzaq A., Yang W., Tahir M., and Russo N., J. Environmental Chemical Engineering **7** (4), 103265 (2019).
4. Abdi F. F., Han L., Smets A. H., Zeman M., Dam B., and Van De Krol R., Nature Communications **4** (1) 2195 (2013).
5. Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K., Uemura J., Kazoe Y., Kosar S., Makita K., Sugaya T., Matsui T., Fujita D., and Tosa M., Scientific reports **5** (1), 11141 (2015).
6. Kosar S., Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K., Uemura J., Kazoe Y., Makita K., Sugaya T., Matsui T., Fujita D., and Tosa M., Japanese journal of applied physics **55** (4S), 04ES01 (2016).
7. May M. M., Lewerenz H. J., Lackner D., Dimroth F., and Hannappel T., Nature Communications **6** (1) 8286 (2015).
8. Del Valle F., Ishikawa A., Domen K., De La Mano J. V., Sánchez-Sánchez M. C., González I. D., Herreras S., Mota N., Rivas M. E., Galván M. Á., and Fierro J. L. G., Catalysis Today **143** (1-2), 51–56 (2009).
9. Turner J. A., Science **305**, 972 (2004).
10. Barreto L., Makihira A., and Riahi K., Int. J. Hydrogen Energy **28**, 267 (2003).
11. Leijtens T., Bush K. A., Prasanna R., and McGehee M. D., Nat. Energy **3**, 828 (2018).
12. Jacobsson J., Fjällström V., Edoff M., and Edvinssona T., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **138**, 87 (2015).
13. Ishizuka Sh., Okamoto R., and Ikeda Sh., Adv. Mater. Interfaces **9** (25), 2201266 (2022).

14. Mahmoudi B., Caddeo F., Lindenberg T., Schneider T., Hölscher T., Scheer R., and Maijenburg A. W., *Electrochim. Acta* **367**, 137183 (2021).
15. Ikeda S., Fujita W., Katsube R., Nose Y., Suzuki H., Abe R., and Yoshino K., *Electrochimica Acta* **454**, 142384 (2023).
16. Ponomareva I. P., Serov A. Yu., and Bodnar I. V., *Physics of the Solid State* **49** (1), 23–27 (2007) [in Russian].
17. Ramakrishna Reddy K. T. and Jayarama Reddy P., *Thin Solid Films* **253**, 238–242 (1994).
18. Karthikeyan S., Hwang S., Sibakoti M., Bontrager T., Liptak R. W., and Campbell S. A., *Appl. Surf. Sci.* **493**, 105–111 (2019).
19. Jung S. and Kim J., *J. Nanosci. Nanotechnol* **16** (5), 5279–5284 (2016).
20. Zhang L., Minegishi T., Kubota J., and Domen K., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 6167 (2014).
21. Rakitin V. V., Gapanovich M. V., Lutsenko D. S., Nazarov V. B., Stanchik A. V., Gremenok V. F., and Kabyliatski A. V., *High Energ. Chem.* **58** (5), 492–498 (2024).
22. Rakitin V. V., Gapanovich M. V., Rabenok E. V., Kalimullina D. R., Lutsenko D. S., Kulemetev I. D., Koltsov E. N., Stanchik A. V., and Gremenok V. F., *Condensed Matter and Interphases* **27** (3), 441 (2025) [in Russian].
23. Aldoshin S. M., Bocharova S. I., Novikov G. F., and Gapanovich M. V. Method of manufacturing photosensitive chalcopyrite films. Patent for invention № RU 2567191 C1 (RF). 2015 [in Russian].
24. Das D. and Damodare L., *Mater. Chem. Phys.* **56** (2), 116–124 (1998).

Об авторах

Ракитин Владимир Валерьевич, к.х.н., старший научный сотрудник, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, 1). E-mail: domi-tyan@yandex.ru SPIN-код: 2273-0113, Author ID https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=897817, Orcid ID 0000-0001-6582-5212

Кулеметьев Иван Денисович, студент, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, 1); Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФФХИ (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1). E-mail: ivan-2002@bk.ru

Бакланова Ульяна Руслановна, студент, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, 1); Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФФХИ (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1). E-mail: ulyana.baklanova@mail.ru

Луценко Денис Сергеевич, младший научный сотрудник, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, 1). E-mail: rylah161den@mail.ru Orcid ID 0009-0000-5788-7763

Станчик Алёна Викторовна, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» (220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19). E-mail: alena.stanchik@bk.ru Orcid ID 0000-0001-8222-8030, Scopus Author ID www.scopus.com/authorid/detail.uri?authorid=57200500542

Рабенок Евгения Витальевна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19). E-mail: jane.rabenok@yandex.ru SPIN-код: 6923-7417, Author ID 123644, Orcid ID 0000-0002-3500-6918

Гапанович Михаил Вячеславович, к.х.н., руководитель группы ППИКМ, ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432, Россия, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, 1); Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФФХИ (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1); Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: gmw1@mail.ru Orcid ID 0000-0002-9109-6532, Scopus Author ID www.scopus.com/authorid/detail.uri?authorid=6506377278

УДК 53
EDN: SBRJNR

PACS: 33.20.-t

**Сравнительный анализ спектров поглощения света в пленках
фталоцианина цинка на разных подложках**

© С. И. Расмагин*, В. И. Красовский

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия***E-mail: rasmus123@yandex.ru**Статья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 8.12.2025; принята к публикации 20.02.2026**Шифр научной специальности: 1.3.11*

Созданы пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на различных подложках методом вакуумного напыления. Проведены оптические исследования полученных пленок, в ходе которых измерены их электронные спектры поглощения. Анализ характеристик электронных спектров поглощения показал зависимость свойств пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка от природы подложек. Установлено, что кристаллическая форма пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на поверхностях органического и неорганического материала имеет, соответственно, метастабильную α -фазу и стабильную β -фазу. Выявлено значительное влияние взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек на свойства пленок. Для возможного применения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка в качестве активного элемента в газовых сенсорах необходимо учитывать природу взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек.

Ключевые слова: фталоцианин цинка, пленки, стекло, поливинилхлорид, спектр поглощения, молекулярные орбитали.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-81-86

Введение

Оптические и электрофизические свойства неорганических полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия и др.) исследованы достаточно хорошо. Большая часть приборов микроэлектроники базируется именно на перечисленных выше неорганических полупроводниках. Для анализа свойств неорганических полупроводников разработана зонная теория, которая вполне приемлемо описывает электронный спектр электронов в периодическом потенциале кристалла [1]. Наряду с неорганическими полупроводниками широко используются органические полупроводники в таких областях, как солнечные элементы, газовые сенсоры, дисплеи, биосенсоры

и т. д. Для анализа оптических и электрофизических свойств органических полупроводников разработана теория молекулярных орбиталей, которая в той или иной степени приближения описывает энергетические состояния (пространственное распределение и энергию электрона), типы молекулярных орбиталей, форму органических молекул и т. д.

К органическим полупроводникам, в частности, относятся фталоцианины металлов с сопряженными углерод-углеродными и азот-углеродными связями. Фталоцианины металлов, как в растворах, так и в виде пленок, в настоящее время находят незначительное применение в солнечных элементах [2, 3, 4] и газовых сенсорах [5, 6, 7]. В молекулах фталоцианинов металлов вместо атомов водорода

в бензольных кольцах могут использоваться атомы фтора, хлора, бутильные группы и другие заместители. Например, были исследованы характеристики фталоцианинов цинка с различными заместителями атомов водорода в бензольных кольцах [8, 9]. Оптические свойства пленок фталоцианинов металлов также сильно зависят от природы подложек, на которых они создаются [10]. В частности, пленки фталоцианина цинка способны проявлять полупроводниковые свойства [11].

В данной работе были созданы и исследованы образцы органического полупроводника бутилзамещенного фталоцианина цинка. Все образцы были получены методом вакуумного напыления на разные подложки. В качестве подложек были использованы неорганический материал (силикатное стекло) и органическое вещество (термообработанный поливинилхлорид). Целью данной работы являлось исследование влияния органической и неорганической подложек на характеристики спектров поглощения в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка и их полиморфические свойства.

Экспериментальная часть

Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка были получены методом термического вакуумного напыления. Порошок в форме игольчатых кристаллитов бутилзамещенного фталоцианина цинка был исходным материалом, а в качестве мишени (подложки) использовали силикатное стекло и термообработанный поливинилхлорид (сополимер поливинилхлорид-полиацетилен). Химическую формулу бутилзамещенного фталоцианина цинка с 8 бутильными группами вместо атомов водорода в бензольных кольцах можно записать в виде $ZnPcBu_8$, здесь символ Pс обозначает комплекс $C_{32}H_8N_8$, Bu – обозначения бутила C_4H_9 . Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на стекле и на пленке поливинилхлорид-полиацетилен (ПВХ-ПАЦ) обозначили, соответственно, как $ZnPcBu_8 - SG$ и $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$. Пленки бутилзамещенного фталоцианина цинка на пленке ПВХ-ПАЦ и на силикатном стекле были получены в процессе сублимации порошка $ZnPcBu_8$ при температуре нагрева $380\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 мин.

Кристаллические структуры пленок $ZnPcBu_8$ существуют в основном в двух формах: в метастабильной α -форме и стабильной β -форме. На кристаллическую структуру пленок металлфталоцианинов оказывают влияние несколько параметров осаждения, в том числе материал подложки. В данной работе исследовалось влияние материала подложки на кристаллическую структуру пленок $ZnPcBu_8$.

Создание пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на подложках выполнялось в вакуумной установке ВУП-5. Спектры поглощения света в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка получены на спектрометре Option Optics 2000 с динамическим диапазоном 300–1100 нм. В качестве источника излучения использовали вольфрамовую лампу мощностью 10 МВт.

Результаты и их обсуждение

Для пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на силикатном стекле и на поверхности ПВХ-ПАЦ были измерены спектры поглощения излучения при температуре измерения $T = 22\text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок).

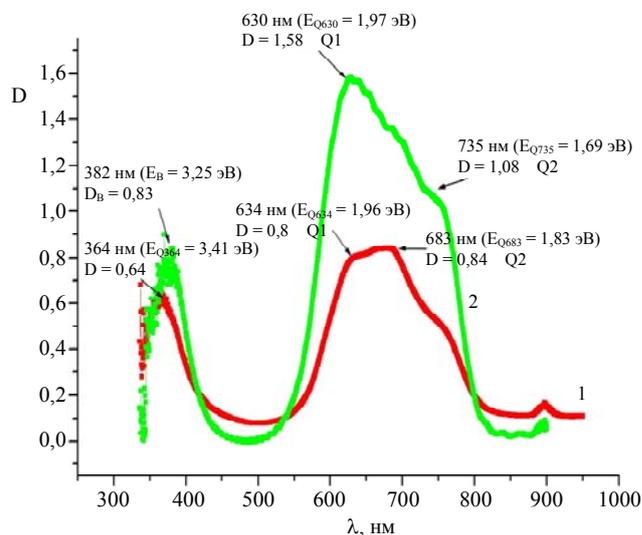


Рис. Спектры поглощения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка: 1 – пленка $ZnPcBu_8$ на стекле, 2 – пленка $ZnPcBu_8$ на ПВХ-ПАЦ

Спектр поглощения пленки $ZnPcBu_8 - SG$ имеет две характерные полосы в видимом диапазоне излучения: Q-полоса в диапазоне 550–800 нм и В-полоса в диапазоне 350–500 нм. На спектре поглощения В-полоса имеет один

пик поглощения, а Q-полоса имеет два пика поглощения. Первый пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q1} = 634$ нм ($E_{Q1} = 1,96$ эВ), второй пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q2} = 683$ нм ($E_{Q2} = 1,83$ эВ). Полуширина Q-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{Q1/2} = 170$ нм. Пик В-полосы соответствует длине волны $\lambda_B = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ). Полуширина В-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{B1/2} = 64$ нм.

Спектр поглощения пленки $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ имеет две характерные полосы поглощения: Q-полоса в диапазоне 500–850 нм и В-полоса в диапазоне 350–500 нм. На спектре поглощения В-полоса имеет один пик поглощения, а Q-полоса имеет два крайних пика поглощения (см. рисунок). Первый пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q1} = 630$ нм ($E_{Q1} = 1,97$ эВ), второй пик Q-полосы соответствует длине волны $\lambda_{Q2} = 735$ нм ($E_{Q2} = 1,69$ эВ). Полуширина Q-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{Q1/2} = 188$ нм. Пик В-полосы соответствует длине волны $\lambda_B = 382$ нм ($E_B = 3,25$ эВ). Полуширина В-полосы составляет порядка $\Delta\lambda_{B1/2} = 57$ нм или в единицах энергии $\Delta E_{B1/2} = 0,51$ эВ.

Молекулы бутилзамещенного фталоцианина цинка в пленках $ZnPcBu_8 - SG$ и $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ создают молекулярные кристаллиты благодаря Ван-дер-Ваальсовым силам притяжения и отталкивания на близком расстоянии. Между ионами Zn^{2+} разных молекул $ZnPcBu_8$ действуют силы Кулона на более дальнем расстоянии. Взаимодействие молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка в пленках $ZnPcBu_8 - SG$ и $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ происходит благодаря Ван-дер-Ваальсовым силам на ближнем расстоянии порядка 0,35 нм и Кулоновским силам на дальнем расстоянии порядка 0,38 нм для α -фазы и, соответственно, на ближнем расстоянии 0,32 нм и на дальнем расстоянии 0,49 нм для β -модификации $ZnPcBu_8$.

Молекула бутилзамещенного фталоцианина цинка имеет 38 делокализованных π -электронов. В макрокольце $ZnPcBu_8$ находятся 18 делокализованных π -электронов и 20 делокализованных π -электронов находятся в 4-х изоиндольных группах. Делокализованные π -электроны молекулы $ZnPcBu_8$ при поглощении света переходят из основного в возбужденные электронные состояния. Для спектров поглощения

в пленках $ZnPcBu_8 - SG$ и $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ полосе Q соответствует синглет-синглетный электронный переход $S_0 \rightarrow S_1$, для полосы В соответствует синглет-синглетный электронный переход $S_0 \rightarrow S_2$. Для молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка характерна точечная группа симметрии D_{4h} , которой соответствует плоская квадратная пространственная структура. Молекулярные орбитали молекулы бутилзамещенного фталоцианина цинка с точечной группой симметрии D_{4h} характеризуются симметрией молекулярных орбиталей $a_{1u}, a_{2u}, b_{1u}, b_{2u}, e_g$. Поглощение излучения света в Q-полосе пленках $ZnPcBu_8 - SG$ и $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ происходит на сопряженных двойных углерод-углеродных связях бензольных колец ($n = 13$) и сопряженных двойных азот-углеродных связях ($m = 6$) в макрокольце. Здесь обозначили n как число сопряженных двойных углерод-углеродных связей $C=C$ и m как число сопряженных двойных углерод-азотных связей $C=N$. Согласно теории Давидова в кристаллических структурах фталоцианинов металлов (MPc) расщепление Q-полосы на два пика вызвано взаимодействием молекул MPc между собой (диполь-дипольное взаимодействие соседних молекул). Степень расщепления Q-полосы на два пика характеризует энергию взаимодействия между молекулами MPc, которые находятся в положениях с различной группой симметрии [12]. В пленке $ZnPcBu_8 - SG$ на спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два пика: пик поглощения Q1 $\lambda_m = 634$ нм ($E = 1,96$ эВ) и пик поглощения Q2 $\lambda_m = 683$ нм ($E = 1,82$ эВ) (см. рисунок). При этом дважды вырожденная молекулярная орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$ расщепляется на две молекулярные орбитали LUMO+1 и LUMO-1. Пик поглощения Q1 ($E = 1,96$ эВ) соответствует электронному переходу с HOMO $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO+1, а пик поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ) соответствует электронному переходу с HOMO $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO-1. Из рисунка видно, что оптическая плотность D высокоэнергетического пика Q1 ($E = 1,96$ эВ) меньше, чем D низкоэнергетического пика поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ). Такое соотношение оптических плотностей в спектре поглощения показывает, что расположение молекул фталоцианина цинка в пленке $ZnPcBu_8 - SG$ находится в стабильной β -фазе

[13, 14, 15]. Отметим, что пики Q1 ($\lambda_m = 634$ нм) и Q2 ($\lambda_m = 683$ нм) спектров поглощения пленки $ZnPcBu_8$ практически совпадают с пиками 632 и 689 нм пленки $ZnPc$ в статье [15]. Это может свидетельствовать о том, что в пленке $ZnPcBu_8$ в β -фазе замена атомов водорода в бензольных кольцах на бутильную группу практически не изменяет энергию электронных переходов в Q-полосе. Пик поглощения В-полосы с длиной волны $\lambda_m = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ) вызван электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО-1 $1a_{2u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$. Стоит отметить, что пик поглощения В-полосы $\lambda_m = 364$ нм ($E_B = 3,41$ эВ) пленки $ZnPcBu_8$ отличается от пика поглощения В-полосы $\lambda_m = 340$ нм ($E_B = 3,65$ эВ) пленки $ZnPc$ в статье [15] на 24 нм (или на 0,24 эВ). Это свидетельствует о том, что замена атомов водорода в бензольных кольцах на бутильные группы увеличивает энергию электронных переходов в В-полосе на 0,24 эВ. Можно предположить, что электронный переход НОМО-1 $1a_{2u}(\pi) \rightarrow$ LUMO $1e_g(\pi^*)$ в пленке $ZnPcBu_8$ в сравнении с пленкой $ZnPc$ происходит на более низкий колебательный уровень молекулярной орбитали $1e_g(\pi^*)$.

В пленке $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ на спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два крайних пика: пик поглощения Q1 $\lambda_m = 630$ нм ($E = 1,97$ эВ) и пик поглощения Q2 $\lambda_m = 738$ нм ($E = 1,68$ эВ) (см. рисунок). Следовательно, дважды вырожденная молекулярная орбиталь LUMO $1e_g(\pi^*)$ при взаимодействии между собой молекул $ZnPcBu_8$ расщепляется на две молекулярные орбитали LUMO+1 и LUMO-1. Пик поглощения Q1 ($E = 1,97$ эВ) соответствует электронному переходу с НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO+1, а пик поглощения Q2 ($E = 1,82$ эВ) соответствует электронному переходу с НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на LUMO-1. Из рисунка видно, величина оптической плотности D высокоэнергетического пика Q1 ($E = 1,97$ эВ) больше, чем D низкоэнергетического пика поглощения Q2 ($E = 1,69$ эВ). Такое соотношение оптических плотностей показывает, что молекулы фталоцианина цинка в пленке $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ находится в метастабильной α -фазе [13, 14, 15].

Таким образом, кристаллическая форма бутилзамещенного фталоцианина цинка на

поверхностях ПВХ-ПАЦ и силикатного стекла имеет, соответственно, метастабильную α -фазу и стабильную β -фазу. Разный полиморфизм кристаллических пленок $ZnPcBu_8$ оказывает заметное влияние на характеристики спектров поглощения пленок. Отметим, что для создания газовых сенсоров на основе бутилзамещенного фталоцианина цинка, напыленного на неорганические и органические подложки, необходимо учитывать природу взаимодействия между молекулами бутилзамещенного фталоцианина цинка и молекулами подложек.

Заключение

Было проведено исследование влияния органической (поливинилхлорид-полиацетилен) и неорганической (силикатное стекло) подложек на полиморфизм пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка. Было выявлено влияние полиморфизма бутилзамещенного фталоцианина цинка на характеристики спектров поглощения света. Было установлено влияние полиморфизма на электронные переходы в пленках бутилзамещенного фталоцианина цинка.

В результате проведенного анализа спектров поглощения пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на органических и неорганических подложках пришли к следующим заключениям:

1. В кристаллических пленках $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе и $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе в спектрах поглощения Q-полоса расщепляется на два основных пика. Высокоэнергетический пик Q1 обуславливается электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO+1 с энергией $E_{Q1} = 1,97$ эВ. Низкоэнергетический пик Q2 обусловлен электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO-1 с энергией $E_{Q2} = 1,69$ эВ.

2. В кристаллической пленке $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе в спектре поглощения Q-полоса расщепляется на два основных пика. Высокоэнергетический пик Q1 обуславливается электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь

LUMO+1 с энергией $E_{Q1} = 1,96$ эВ. Низкоэнергетический пик Q2 обусловлен электронным переходом с молекулярной орбитали НОМО $1a_{1u}(\pi)$ на молекулярную орбиталь LUMO-1 с энергией $E_{Q2} = 1,83$ эВ.

3. Для пленки $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе энергия $E_{Q2-\beta}$ электронного перехода НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow LUMO-1$ больше, чем энергия $E_{Q2-\alpha}$ в пленке $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе на $0,14$ эВ. Вероятней всего, электронный переход в пленке $ZnPcBu_8$ в α -фазе происходит на более низкоэнергетический колебательный уровень в сравнении с пленкой $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе. Можно также предположить, что энергетический уровень LUMO-1 зависит от кристаллической формы пленок и, следовательно, от природы подложки.

4. Энергия электронных переходов для пиков спектров поглощения В-полосы молекул бутилзамещенного фталоцианина цинка отличается для разных подложек. Для пленки $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе энергия электронного перехода $1a_{2u}(\pi) \rightarrow 1e_g(\pi^*)$ В-полосы составляет $E_{B-\alpha} = 3,25$ эВ. Для пленки $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе энергия электронного перехода $1a_{2u}(\pi) \rightarrow 1e_g(\pi^*)$ В-полосы составляет $E_{B-\beta} = 3,41$ эВ. Для пленки $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе энергия электронного перехода $E_{B-\beta} = 3,41$ эВ превышает энергию $E_{B-\alpha}$ для пленки $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе на $0,07$ эВ.

Таким образом, подведем общие результаты исследований оптических пленок бутилзамещенного фталоцианина цинка на разных подложках.

1. Для пленок $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе и $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе энергии электронных переходов НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow LUMO+1$, характерные для высокоэнергетического пика спектров поглощения Q-полосы, практически не зависят от кристаллической формы пленок и, следовательно, опосредованно через полиморфизм пленок не зависят от природы подложки.

2. Для пленок $ZnPcBu_8 - PVC-PAC$ в α -фазе и $ZnPcBu_8 - SG$ в β -фазе энергии электронных переходов НОМО $1a_{1u}(\pi) \rightarrow LUMO-1$ характерные для низкоэнергетического пика спектров поглощения Q-полосы зависят от кристаллической формы пленок и, следовательно, опосредованно через кристаллическую форму пленок зависят от природы подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977.
2. Sekar N., Ghelot V. / Resonance. 2010. Vol. 15. P. 819–831. <https://doi.org/10.12691/pmc-3-1-1>
3. Расмагин С. И. / Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 12. С. 1893–1898. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54097.3602-22>
4. Walter M. G., Rudine A. B., Wamser C. C. / JPP. 2010. Vol. 14. P. 759–792.
5. Debliquy M., Lahem D., Bueno-Martinez A., Caucheteur C. / Sensors. 2018. Vol. 18. № 3. P. 740. <https://doi.org/10.3390/s18030740>
6. Bohrer F. I., Colesniuc C. N., Park J., Ruidiaz M. E., Schuller I. K., Kummel W. C., Trogler W. C. / Am. Chem. Soc. 2009. Vol. 131. P. 478–485.
7. Расмагин С. И. / Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 6. С. 591–596. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.06.58635.6787-24>
8. Мозилева Т. Н., Ангелов И. П., Мантарева В. Н., Енева И. З., Михеев Г. М. / Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18. № 2. С. 281–287.
9. Chaidogiannos G., Petraki F., Glezos N., Kennou S., Nešpůrek S. / Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 2009. Vol. 96. P. 763–767.
10. Sindu Louis J., Lehmann D., Friedrich M., Zahn D. R. T. / J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 013503. <https://doi.org/10.1063/1.2403845>
11. Guillaud G., Simon J. P. / Coordination Chemistry Reviews. 1998. Vol. 178. P. 1433–1484.
12. Davydov A. S. Theory of molecular excitons. – New York: McGraw-Hill, 1962.
13. Roy D., Das N. M., Shakti N. M., Gupta P. S. / RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 42514–42522. <https://doi.org/10.1039/C4RA05417B>
14. Shahiduzzaman M., Horikawa T., Hirayama T., Nakano M., Karakawa M., Takahashi K., Nunzi J.-M., Taima T. / J. Phys. Chem. C. 2020. Vol. 124. P. 21338–21345. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c07010>
15. Zanfolim A. A., Volpati D., Olivati C. A., Job A. E., Constantino C. J. L. / J. Phys. chem. 2010. Vol. 114. P. 12290–12299.

Comparative analysis of absorption spectra in zinc phthalocyanine films on different substrates

S. I. Rasmagin* and V. I. Krasovskii

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

* E-mail: rasmus123@yandex.ru

Received 27.10.2025; revised 8.12.2025; accepted 20.02.2026

Films of butyl-substituted zinc phthalocyanine were fabricated on various substrates using vacuum deposition. Optical studies of the resulting films were conducted, during which their electronic absorption spectra were measured. Analysis of the characteristics of the electronic absorption spectra revealed a dependence of the properties of the butyl-substituted zinc phthalocyanine films on the nature of the substrates. It was established that the crystalline form of butyl-substituted zinc phthalocyanine films on the surfaces of organic and inorganic materials exhibits a metastable α -phase and a stable β -phase, respectively. Further research revealed a significant influence of the interaction between butyl-substituted zinc phthalocyanine molecules and substrate molecules on the film properties. For the potential use of butyl-substituted zinc phthalocyanine films as an active element in gas sensors, it is necessary to consider the nature of the interaction between butyl-substituted zinc phthalocyanine molecules and substrate molecules.

Keyword: zinc phthalocyanine, films, glass, polyvinyl chloride, absorption spectrum, molecular orbitals.

REFERENCES

1. Bonch-Bruевич V. L. and Kalashnikov S. G. Semiconductor Physics. Moscow, Nauka, 1977 [in Russian].
2. Sekar N. and Ghelot V., Resonance **15**, 819–831 (2010). <https://doi.org/10.12691/pmc-3-1-1>
3. Rasmagin S. I., Optics and Spectroscopy **130** (12), 1893–1898 (2022). <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54097.3602-22>
4. Walter M. G., Rudine A. B., and Wamser C. C., JPP **14**, 759–792 (2010).
5. Debliquy M., Lahem D., Bueno-Martinez A., and Caucheteur C., Sensors **18** (3), 740 (2018). <https://doi.org/10.3390/s18030740>
6. Bohrer F. I., Colesniuc C. N., Park J., Ruidiaz M. E., Schuller I. K., Kummel W. C., and Trogler W. C., Am. Chem. Soc. **131**, 478–485 (2009).
7. Rasmagin S. I., Optics and Spectroscopy **132** (6), 591–596 (2024). <https://doi.org/10.61011/OS.2024.06.58635.6787-24>
8. Mogileva T. N., Angelov I. P., Mantareva V. N., Eneva I. Z., and Mikheev G. M., Chemical Physics and Mesoscopy **18** (2), 281–287 (2016).
9. Chaidogiannos G., Petraki F., Glezos N., Kennou S., and Nešpůrek S., Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. **96**, 763–767 (2009).
10. Sindu Louis J., Lehmann D., Friedrich M., and Zahn D. R. T., J. Appl. Phys. **101**, 013503 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2403845>
11. Guillaud G. and Simon J. P., Coordination Chemistry Reviews **178**, 1433–1484 (1998).
12. Davydov A. S. Theory of molecular excitons. New York, McGraw-Hill, 1962.
13. Roy D., Das N. M., Shakti N. M., and Gupta P. S., RSC Adv. **4**, 42514–42522 (2014). <https://doi.org/10.1039/C4RA05417B>
14. Shahiduzzaman M., Horikawa T., Hirayama T., Nakano M., Karakawa M., Takahashi K., Nunzi J.-M., and Taima T., J. Phys. Chem. C **124**, 21338–21345 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c07010>
15. Zanolini A. A., Volpati D., Olivati C. A., Job A. E., and Constantino C. J. L., J. Phys. Chem. **114**, 12290–12299 (2010).

Об авторах

Расмагин Сергей Иосифович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: rasmus123@yandex.ru SPIN-код: 8350-5100, AuthorID: 41958

Красовский Виталий Иванович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, 38). E-mail: krasovskii@nsc.gpi.ru SPIN-код: 8116-4994, AuthorID: 41957

УДК 53.083.8
EDN: SXCBPW

PACS: 81.70.-q

Сравнение различных методов для измерения модуля упругости Юнга наноструктурированных материалов на примере титана

© А. С. Усеинов^{1,2}, Г. Х. Султанова^{1,3}, И. В. Лактионов^{1,*}, А. П. Федоткин¹

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия

* E-mail: laktionov@mipt.ru

² Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук,
Москва, г. Троицк, 108840 Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, г. Троицк, 108840 Россия

Статья поступила в редакцию 9.09.2025; после доработки 4.12.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.2

Представлены результаты сравнительного исследования различных методов определения модуля упругости Юнга наноструктурированного титана, полученного методом равноканального углового прессования с последующим волочением. Рассмотрены подходы, основанные на модели Герца, методе инструментального индентирования по Оливеру–Фарру, а также на динамическом механическом анализе (ДМА). Показано, что все методы позволяют получить согласующиеся между собой значения модуля упругости, близкие к табличным данным, при этом различия связаны с фазой процесса нагружения, учитываемой в конкретной модели. Проанализированы особенности применения сферического индентора, позволяющего восстановить диаграмму истинных напряжений–деформаций. Показано, что при малых нагрузках определяющим фактором точности являются шероховатости индентора и исследуемой поверхности, а также уровень шумов. Сделан вывод о целесообразности измерения модуля Юнга методом инструментального индентирования с последующим использованием этой величины при восстановлении полной диаграммы напряжение–деформация по данным индентирования сферическим наконечником.

Ключевые слова: диаграмма напряжение–деформация, модуль упругости Юнга, инструментальное индентирование, наноструктурированный титан.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-87-93

Введение

Оценка упругих характеристик материала, в первую очередь модуля Юнга, играет ключевую роль в инженерном материаловедении, механике контактных взаимодействий, микро- и наноэлектронике, а также в технологиях функциональных покрытий. Модуль упругости определяет не только начальный отклик материала на внешние нагрузки, но также напрямую участвует в расчетах долго-

вечности, вибрационной стойкости и прочностных характеристик в конструкциях различного масштаба.

Классические механические испытания на одноосное растяжение или сжатие, безусловно, являются эталоном для построения диаграммы «напряжение–деформация», поскольку позволяют получить полную картину механического поведения материала – от упругой до разрушительной стадии. Однако реализация таких испытаний требует образцов

определённой формы и размеров, соответствующих стандартам (например, ГОСТ 1497–84, ASTM E8/E8M) [1], что практически исключает возможность прямого тестирования объектов с характерным размером менее 1 мм, тонких покрытий, градиентных структур или отдельных компонентов микроэлектромеханических систем (MEMS/NEMS). Для таких объектов наиболее приемлемыми оказываются методы локального механического зондирования, в частности – инструментальное индентирование [2].

Одной из актуальных задач в данной области является не просто извлечение отдельных механических параметров (таких, как твердость или модуль упругости), но и восстановление полной кривой «напряжение–деформация» из данных индентирования. Сегодня существует ряд методик перехода от диаграммы внедрения к кривой упрочнения при растяжении. В частности, в работе [3] показано, что установлена пригодность некоторых упрощенных аналитических моделей, описывающих сложное напряженное состояние тел несогласованной формы при контакте. Другой подход, реализуемый в рамках метода АВИ или при многошаговых нагрузочно-разгрузочных циклах, позволяют экстраполировать макромеханические характеристики на микроуровень. Однако достоверность таких реконструкций зависит от множества факторов: калибровки площади контакта, точности измерения силы и глубины, выбора модели контактного взаимодействия (Герца, Оливера–Фарра и др.), а также корректности предположений о распределении напряжений в окрестности отпечатка.

Сравнение восстановленных по данным индентирования диаграмм с эталонными диаграммами, полученными при макро-испытаниях, представляет собой критически важный шаг валидации контактных методов и моделей, лежащих в основе обработки экспериментальных данных. Без такой проверки невозможно достоверно утверждать об эквивалентности получаемых механических характеристик, особенно в условиях, когда градиенты напряжений и деформаций в локальной области существенно превышают аналогичные значения при макроскопических испытаниях.

Особенную важность подобные систематические исследования имеют с точки зрения дальнейшего исследования градиентных структур, слоистых и топокомпозитных материалов [4], характеризующихся анизотропией механических свойств.

Таким образом, разработка и апробация методик измерения модуля упругости Юнга на основе пространственно-локализованных измерений представляет собой важное направление в экспериментальной механике твёрдых тел.

Методы

Распространённым способом восстановления диаграммы напряжение–деформация по результатам индентирования является методика автоматизированного индентирования шаром (automated ball indentation, АВИ) [5]. В рамках данного подхода производится серия последовательных циклов нагружения–разгрузки с увеличением максимального прикладываемого нормального усилия. По восстановленной диаграмме «напряжение–деформация», полученной из анализа накопленного отпечатка, определяются упругие и пластические характеристики материала. Особенностью данного метода является возможность прямого восстановления эквивалентных напряжений и деформаций без предварительного знания площади поперечного сечения, что делает его особенно ценным для микрообъёмов и неоднородных структур [6].

При переходе к субмикрометровым глубинам вдавливания наконечника корректное построение упругого участка диаграммы «напряжение–деформация» по методу АВИ становится крайне затруднительным, так как из-за малых глубин и прикладываемых нагрузок погрешность измерений оказывается слишком большой. Поэтому для построения этого участка может быть выбрана стратегия, при которой модуль Юнга, характеризующий наклон диаграммы σ – ε в области упругой деформации, определяется одним из альтернативных методов, основанных на квазистатическом или динамическом инструментальном индентировании.

Индентирование сферическим наконечником с использованием модели Герца

Первый подход к оценке модуля упругости основан на анализе кривой нагружения при вдавливании индентора в форме сферы. Согласно классической теории Герца контакт между упругим полупространством и жёсткой сферой описывается аналитическим выражением:

$$P = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}},$$

где P — нагрузка, h — глубина вдавливания, R — радиус кривизны индентора, E^* — приведённый модуль упругости.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2},$$

где E_1 и E_2 — это модули упругости, а ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона контактирующих тел (индентора и образца).

Аппроксимация экспериментальных кривых нагружения функцией Герца позволяет определить E^* , а далее, с учётом упругих свойств материала индентора — модуль Юнга исследуемого материала.

Метод инструментального индентирования

Стандарт ГОСТ Р 8.748-2011 [7] регламентирует процедуру определения модуля упругости на основе анализа участка разгрузки при цикле индентирования. При этом используется модель, предложенная в работах Оливера–Фарра [8, 9] и связывающая жёсткость контакта $S = dP/dh$ с величиной приведённого модуля упругости:

$$E^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \cdot \frac{S}{\sqrt{A}},$$

где A — площадь контакта, β — коэффициент, зависящий от геометрии индентора. После учета свойств индентора рассчитывается модуль Юнга исследуемого материала. Для индентора сферической геометрии $\beta = 1$.

Динамический механический анализ (DMA)

Динамический режим индентирования базируется на наложении гармонического возбуждения малой амплитуды на основное квазистатическое внедрение индентора в исследуемый материал. Динамический режим работы индентора позволяет регистрировать зависимость твердости, модуля упругости и величины потерь от глубины проникновения в режиме одного цикла.

Модель такого взаимодействия в первом приближении может быть описана как система с вынужденными гармоническими колебаниями, аналогичная демпфированному осциллятору. Сигнал внешней силы имеет вид:

$$F(t) = F_{dc}(t) + F_{ac} \cdot \sin(\omega t),$$

где F_{dc} — квазистатическая составляющая нагрузки, F_{ac} — амплитуда гармонической составляющей, ω — угловая частота возбуждения.

Перемещение индентора:

$$h(t) = h_{dc}(t) + h_{ac} \cdot \sin(\omega t + \delta),$$

где δ — фазовый сдвиг между возбуждением и откликом, определяющий наличие вязкого отклика материала.

Различные материалы могут сопротивляться прикладываемой нагрузке как упругие или вязкие субстанции. Первые запасают энергию при деформации и возвращаются в исходное состояние при снятии нагрузки. Вторые, остающиеся сжатыми после снятия нагрузки, всю работу по их деформации рассеивают в виде тепла.

При использовании динамического метода деформация тела ε зависит от частоты ω прикладываемой силы следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(t\omega).$$

Для чисто упругого тела справедлив закон Гука и напряжение σ пропорционально (с коэффициентом E — модулем Юнга) деформации:

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Следовательно, нагрузка и деформация синфазны. В вязком материале, где нет упру-

гой деформации, напряжение задается законом Ньютона: $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$, и напряжение, возникающее в ответ на нагрузку, отличается от нее по фазе на $\delta = 90^\circ$ [10]:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(t\omega + \delta).$$

Однако в природе не существует абсолютно упругих и абсолютно неупругих тел. Мнимая и действительная компоненты модуля Юнга $E^* = E' + iE''$ имеют вид:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta, \quad E'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta.$$

Из анализа фазы и амплитуды реакции измеряется комплексный модуль упругости, включающий вещественную часть (модуль упругости) E' и мнимую часть (модуль потерь) E'' . При этом модуль упругости E' приближенно соответствует модулю Юнга для линейно-упругих материалов.

Проведение эксперимента

В качестве материала для сравнительного исследования использован технически чистый титан Grade 4, подвергнутый интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования по схеме Конформ (РКУП-К) с последующим волочением. Данный метод обеспечивает получение ультрамелкозернистой структуры за счёт накопления больших пластических деформаций без изменения внешней геометрии образца. РКУП-К осуществляли на установке «КВ-048.ИФПМ.043911001» (НИИ ФПМ «УУНиТ» и ООО «НаноМет»): температура деформации – 250 °С, угол пересечения каналов – 120°, маршрут деформации Вс, количество проходов – 4 прохода. Для равномерной деформации перед каждым проходом заготовку поворачивали на 90° вокруг своей оси. Волочение заготовок после РКУП-К проводили до диаметра прутков 6 мм за 17 проходов с шагом изменения диаметра фильеры 0,5 мм. Температура волочения составляла 250 °С, скорость деформирования 0,3 м/с.

По результатам рентгеноструктурного анализа методом широких линий (анализ по

методу Вильямсона–Холла) [12] установлен средний эквивалентный размер зерна порядка 41 ± 2 нм, что подтверждает формирование наноструктурированного состояния. Поверхность образцов была механически отполирована, что обеспечило уровень шероховатости $Ra < 5$ нм, достаточный для высокоточных испытаний методом индентирования.

Измерения проводились на нанотвердомере «НаноСкан-4D» [13]. В качестве индентора использовался наконечник из монокристаллического алмаза сфероконической геометрии. Радиус сферической части наконечника – 2,5 мкм, высота рабочей части – 1 мкм. Функция формы наконечника получена по данным со сканирующего зондового микроскопа Ntegra Prima.

Измерения методом статического вдавливания проводились со скоростью 50 нм/с до достижения максимальной нагрузки – 30 мН. Испытания методом ДМА проводились до такой же максимальной нагрузки и с такой же скоростью нагружения, с частотой и амплитудой колебаний 10 Гц и 20 нм, соответственно.

Обсуждение результатов

В таблице представлены усредненные результаты измерений, полученные различными методами. Данные инструментального индентирования получены с максимальной нагрузкой от 1 мН (рис. 1).

Таблица

Значения модуля упругости

Метод измерения	Значение модуля упругости Юнга, ГПа
Модель Герца	107 ± 5
Инструментальное индентирование	104 ± 4
Динамический механический анализ	97 ± 3
Табличное значение [11]	110 ± 10

Ключевое различие в подходах по модели Герца и методике Оливера-Фарра состоит в том, что упругие свойства поверхности определяют в разной фазе нагружения. Модель Герца описывает упругий отклик исходной, недеформированной поверхности в малой ло-

кальной области пятна контакта под индентором. Модель Оливера-Фарра описывает упругий отклик контура поверхности при снятии нагрузки в конце процедуры индентирования.

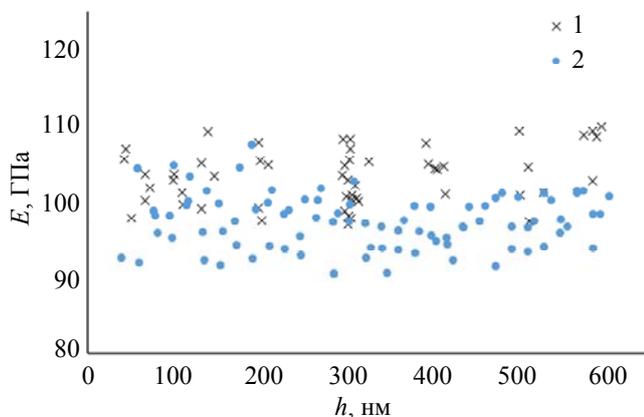


Рис. 1. Зависимость модуля упругости от глубины в испытаниях инструментальным индентированием (1) и ДМА (2)

Для расчета модуля упругости согласно формуле Герца начальный участок кривой нагружения при статическом нагружении аппроксимировался степенной функцией (рис. 2). При этом диапазон нагрузок в области упругой деформации составил менее 1 мН, что согласуется с экспериментально полученной зависимостью, а также с рассчитанным значением по формуле, приведенной в [5].

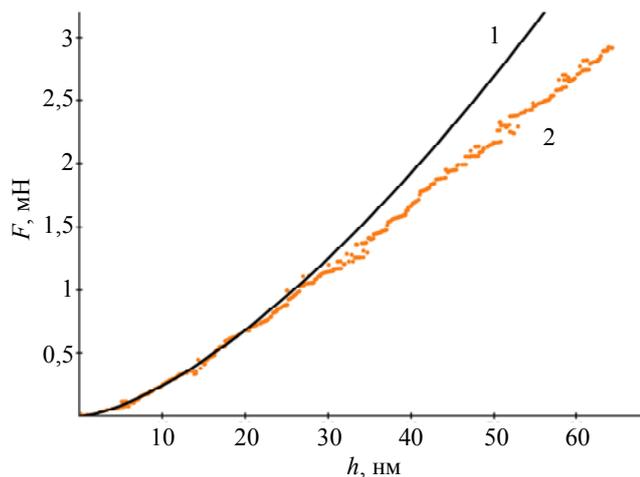


Рис. 2. Зависимость силы от глубины индентирования: 1 – аппроксимация участка упругой деформации по модели Герца, 2 – экспериментальные данные

Теория Герца применена для описания внедрения идеальной сферы в упругое полупространство. Данная модель не учитывает

шероховатость поверхностей. При этом рассматриваемая область упругой деформации сравнима с шероховатостью индентора. Согласно теории Гринвуда и Вильямсона для упругого характера деформации микрошероховатостей (индекс пластичности $< 2/3$) средняя арифметическая шероховатость поверхностей должна составлять 1,1 нм. Превышение фактической шероховатости поверхности этого значения приводит к завышенному измеряемому значению и увеличенной ошибке измерения.

Метод ДМА демонстрирует более низкие значения модуля упругости. В процессе испытания методом ДМА действует осциллирующая нагрузка при заданной скорости нагружения. Поэтому скорость деформации оказывается выше скорости нарастания средней нагрузки и составляет ~ 200 нм/с. Для исключения влияния скорости деформации для данного материала в данном диапазоне значений были проведены сравнительные испытания методом инструментального индентирования с максимальной нагрузкой 15 мН и скоростями нагружения 10, 50, 100, 200 нм/с. Зависимость свойств от скоростей нагружения в данном диапазоне не обнаружена. Увеличение скорости деформации при динамических испытаниях титана приводит к увеличению прочностных характеристик, однако не влияет на модуль упругости.

Заключение

При построении диаграммы «напряжение-деформация» в области упругой деформации с использованием сферического индентора малого диаметра возникают большие погрешности, связанные с шероховатостью индентора и исследуемой поверхности, а также с шумами сейсмического характера.

В данной работе исследованы различные способы определения модуля упругости: с помощью модели Герца, методом инструментального индентирования и динамического механического анализа. Данные методы демонстрируют близкие в пределах погрешности значения. Для устранения неточностей при построении диаграммы σ - ϵ в области упругой деформации предлагается использовать значение модуля упругости, определен-

ное на больших глубинах индентирования в области пластической деформации материала, для чего наиболее надежным методом представляется инструментальное индентирование.

Преимуществом использования сферического наконечника является построение диаграммы истинных напряжений. Результаты испытаний материалов на разрыв позволяют построить диаграмму условных напряжений, которая не учитывает изменение площади сечения при растяжении.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РНФ № 25-29-00291.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытания на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

2. Головин Ю. И. / Физика твердого тела. 2021. Т. 63. № 1. С. 3–42.

3. Johnson K. L. / Proc. R. Soc. Lond. A. 1971. Vol. 324. № 1558. P. 301–313.

4. Voronin N. / Materials Physics and Mechanics. 2015. Vol. 22. № 1. P. 20–29.

5. Haggag F. M. / ASTM Special Technical Publication. 1993. Vol. 1204. P. 27–27.

6. Кушнерева А. С. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2025. Т. 91. № 4. С. 78–84.

7. ГОСТ Р 8.748–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений давления. – М.: Стандартинформ, 2012.

8. Oliver W. C. / Journal of materials research. 1992. Vol. 7. № 6. P. 1564–1583.

9. Oliver W. C. / Journal of materials research. 2004. Vol. 19. № 1. P. 3–20.

10. Xiaodong L. / Materials Characterization. 2002. Vol. 48. P. 11–36.

11. Справочник по физическим величинам / под ред. Кикоина И. К. – М.: Наука, 1976.

12. Himabindu B. / Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 47. P. 4891–4896.

13. Реуцетов В. Н. / Наноиндустрия. 2022. Т. 15. № 7-8. С. 466–476.

PACS: 81.70.-q

Application of different methods for measuring modulus of elasticity of nanostructured materials on the example of titanium

A. S. Useinov^{1,2}, G. Kh. Sultanova^{1,3}, I. V. Laktionov^{1,*}, and A. P. Fedotkin¹

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia*

* *E-mail: laktionov@mipt.ru*

² *Vereshchagin Institute for High Pressure Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, 108840 Russia*

³ *National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Troitsk, 108840 Russia*

Received 9.09.2025; revised 4.12.2025; accepted 20.02.2026

The article presents the results of a comparative study of various methods for determining the Young's modulus of nanostructured titanium obtained by equal-channel angular pressing followed by drawing. The approaches based on the Hertz model, the Oliver-Farr method of instrumental indentation, and dynamic mechanical analysis (DMA) are considered. It is shown that all methods allow to obtain the values of elastic modulus, which are in agreement with each other and close to the tabular data, while the differences are related to the phase of the loading process, which is taken into account in a particular model. The peculiarities of the spherical indenter application, which allows to restore the true stress-strain diagram, are analyzed. It is shown that at low loads the roughness of the indenter and the investigated surface, as well as the noise level, is the determining factor of accuracy. It is concluded that it is reasonable to measure Young's modulus by the method of instrumental indentation with subse-

quent use of this value in reconstructing the full stress-strain diagram from the data of indentation with a spherical tip.

Keywords: stress-strain diagram, modulus of elasticity, tool indentation, nanostructured titanium.

REFERENCES

1. GOST 1497–84. Metals. Tensile testing methods. Moscow, Publishing House of Standards, 1985.
2. Golovin Y. I., *Physics of the Solid State* **63** (1), 3–42 (2021).
3. Johnson K. L., *Proc. R. Soc. Lond. A* **324** (1558), 301–313 (1971).
4. Voronin N., *Materials Physics and Mechanics* **22** (1), 20–29 (2015).
5. Haggag F. M., *ASTM Special Technical Publication* **1204**, 27–27 (1993).
6. Kushnereva A. S. *Industrial Laboratory* **91** (4), 78–84 (2025).
7. GOST R 8.748–2011. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. State Verification Scheme for Pressure Measuring Instruments. Moscow, Standartinform, 2012.
8. Oliver W. C., *Journal of materials research* **7** (6), 1564–1583 (1992).
9. Oliver W. C., *Journal of materials research* **19** (1), 3–20 (2004).
10. Xiaodong L., *Materials Characterization* **48**, 11–36. (2002).
11. *Handbook of Physical Quantities* / Ed. Kikoin I. K. Moscow, Nauka, 1976.
12. Himabindu B., *Materials Today: Proceedings* **47**, 4891–4896 (2021).
13. Reshetov V.N., *Nanoindustry* **15** (7-8), 466–476 (2022).

Об авторах

Усеинов Алексей Серверович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник центра испытаний функциональных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9); заместитель директора, Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук (108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 14). E-mail: useinov@mail.ru SPIN-код: 2318-4230, AuthorID: 41532, ORCID: 0000-0002-9937-0954

Султанова Гульназ Хаккимовна, инженер центра испытаний функциональных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9); младший научный сотрудник лаборатории наномеханических испытаний, НИЦ «Курчатовский институт» (108840, Россия, Москва, г. Троицк, ул. Центральная, 7а). E-mail: sultanova.gkh@phystech.edu SPIN-код: 7358-9564, AuthorID: 1189457, ORCID: 0000-0002-4770-5724

Лактионов Иван Валерьевич, инженер центра испытаний функциональных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: laktionov@mipt.ru, SPIN-код: 8452-3715, AuthorID: 1111093, ORCID: 0000-0002-8576-3669

Федоткин Александр Павлович, инженер центра испытаний функциональных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: aleksandr.fedotkin@phystech.edu SPIN-код: 8957-9170, AuthorID: 1232517, ORCID: 0000-0003-3822-4811

УДК 614.485; 614.487
EDN: UOKSIL

PACS: 87.50; 92.60.Sz

Защитная решётка от УФ-излучения для проточных УФ-реакторов с низким аэродинамическим сопротивлением

© Д. Е. Науменко^{1,2,*}, Н. А. Колесник¹, Л. М. Василяк³¹ НПО «ЛИТ», Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия² Московский физико-технический институт, Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия

* E-mail: ddannaum@yandex.ru

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; после доработки 12.12.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.21

Анализ светозащитных решёток (Π-образных, сотовых и жалюзийных) для проточных УФ-реакторов выявил противоречие между достижением высокого уровня экранирования УФ-излучения и низкого аэродинамического сопротивления. Для решения этой проблемы предложена жалюзийная решётка с уголковыми ламелями, дополненными прямолинейными входными и выходными участками. Численное моделирование и экспериментальные исследования показали, что уровень ослабления УФ-излучения у новой конструкции сопоставим с лучшим аналогом, которым является Π-образная решётка, при снижении аэродинамического сопротивления в 9 раз. Достигнуто выравнивание потока в УФ-реакторе, снижение уровня шума ниже 40 дБ и уменьшение габаритов реактора без потери производительности.

Ключевые слова: УФ-излучение, УФ-реактор, УФ-обеззараживание, рециркулятор.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-94-100

Введение

Проточные газовые УФ-реакторы находят широкое применение в различных областях, включая обеззараживание воздуха в рециркуляционных системах, удаление газообразных примесей и запахов, а также проведение фотохимических реакций. Рециркуляторы с обеззараживанием воздуха УФ-излучением широко применяются в медицинских учреждениях, на объектах пищевой промышленности, в общественных и жилых помещениях, а также в других местах массового скопления людей. Среди методов обеззараживания воздуха УФ-облучение занимает лидирующие позиции [1] благодаря своей эффективности против широкого спектра микроорганизмов и отсутствию образования вредных побочных продуктов. Практическая эксплуатация выяв-

ляет ряд технических трудностей, связанных с обеспечением надежности и эффективности УФ-рециркуляторов. Одной из них является необходимость экранирования УФ-излучения, исходящего из камеры обеззараживания, для защиты людей от его воздействия. Для этого на входе и выходе реактора с УФ-облучением применяются светозащитные решетки, к материалу и конструкции которых предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, решётка должна обеспечивать безопасность, блокируя выход УФ-излучения за пределы корпуса установки. С другой стороны, её конструкция не должна ухудшать аэродинамические и акустические (шумовые) показатели работы системы, при этом материал решеток должен быть устойчивым к воздействию УФ-излучения. Неудачно спроектированная решётка создает значительное аэроди-

намическое сопротивление, может являться причиной низкой бактерицидной эффективности и причиной повышенного уровня шума работы всей системы. Защитные решетки, используемые в настоящее время в конструкциях рециркуляторов, имеют большое аэродинамическое сопротивление и создают дополнительный шум или недостаточно экранируют УФ-излучение.

Задачей данного исследования являлась разработка конструкции светозащитной решетки УФ-реактора с высокой степенью экранирования УФ-излучения, с низкими потерями напора воздушного потока, сохранением равномерного потока в камере обеззараживания и низким уровнем шума.

Геометрия защитной решетки

В рециркуляторах применяются несколько типов светозащитных решеток: решетки на основе вложенных П-образных профилей [2] (рис. 1а); жалюзийные решетки с ламелями волнообразной формы (рис. 1б); сотовые фильтры из тонколистового металла (рис. 1в).

Решетки П-образного типа демонстрируют максимальную эффективность экранирования УФ-излучения в сравнении с жалюзийными и сотовыми. Однако, траектории потоков воздуха в таких решетках включают два последовательных разворота на 180° , что в сочетании с локальным увеличением скорости

в каналах приводит к значительным потерям напора.

Сотовые металлические фильтры обладают более низким аэродинамическим сопротивлением, чем П-образные решетки. Потери напора в сотовом фильтре связаны с взаимодействием и трением друг о друга разнонаправленных струй на выходе из решетки, а также с диссипацией энергии турбулентных вихрей в результате их контакта со стенками реактора и соседними струями. Геометрия сот в большинстве случаев исключает прямолинейное прохождение УФ-излучения, однако для них существует критический угол падения лучей, при котором количество внутренних отражений оказывается недостаточным для эффективного ослабления УФ-излучения.

Жалюзийные решетки обладают низким аэродинамическим сопротивлением, однако не всегда обеспечивают необходимый уровень экранирования УФ-излучения. Для повышения уровня поглощения УФ-излучения на ламели решеток наносят поглощающие покрытия (краски), однако под длительным воздействием УФ-излучения происходит их деструкция с эмиссией образующихся продуктов в воздушный поток [3]. Используемая в настоящее время форма ламелей задает направление потока, отличное от нормали к плоскости решетки, что приводит к отрыву потока от одной из стенок камеры УФ-реактора, вызывает образование турбулентных зон и неравномерное распределение скоростей в рабочем объеме реактора.

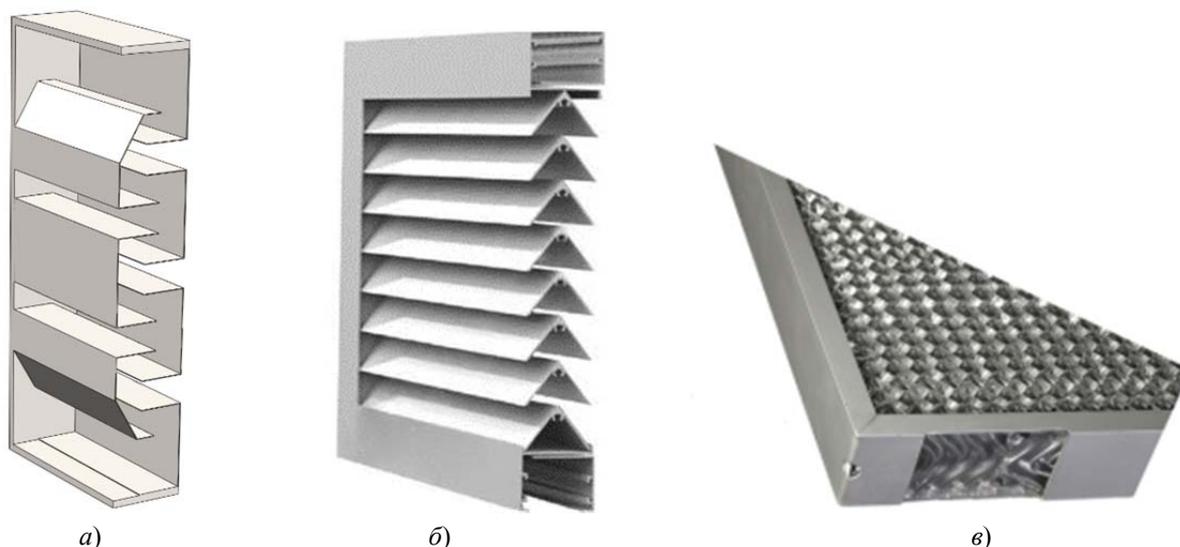


Рис. 1. Типы решёток. а) – П-образная, б) – жалюзийная, в) – сотовая

Неравномерность поля скоростей в рабочей камере реактора приводит к значительному разбросу времени пребывания в ней различных частей воздушного потока. Часть микроорганизмов проходят зону облучения за время, отличающиеся от расчетного, и получают дозу облучения ниже требуемого порога, что не обеспечивает их инактивацию. В результате снижается общая эффективность обеззараживания всего рециркулятора. Для компенсации снижения эффективности обеззараживания требуется либо увеличение мощности УФ-ламп, либо снижение скорости потока для повышения времени экспозиции, что снижает производительность установки. Конструкция решёток и реактора должна обеспечивать не только блокировку УФ-излучения, но и выравнивания потока воздуха за решёткой.

В рамках проведенного анализа существующих конструкций для дальнейшей разработки была выбрана схема решёток жалюзийного типа. Для достижения поставленных целей был разработан новый профиль ламели, представляющий собой угловую V-образную конструкцию с добавленными прямолинейными входным и выходным участками, направленными вдоль воздушного канала системы. Функциональное назначение данных участков заключается в следующем:

1. Входной участок предназначен для сегментации и стабилизации входящего потока перед его продвижением в лабиринтную часть профиля, что способствует снижению генерации турбулентности внутри решётки.

2. Выходной участок обеспечивает ориентацию воздушного потока вдоль оси камеры обеззараживания после прохождения лабиринта, минимизируя отклонение струй на стенки камеры.

3. Дополнительные прямолинейные участки повышают светозащитные характеристики за счет увеличения количества переотражений в межламельном пространстве решёток и создания дополнительных экранированных зон для траекторий УФ-излучения.

Численное моделирование

На первом этапе было проведено численное моделирование гидродинамических и оптических характеристик двух типов свето-

защитных решёток: традиционной конструкции на основе П-образных профилей и разработанной решётки, состоящей из угловых ламелей с дополнительными прямолинейными участками.

Гидродинамическое моделирование было выполнено методом конечных объёмов (CFD-моделирование по методу FVM с моделью турбулентности RANS [4]). Граничные условия для CFD-модели были заданы следующим образом: размеры вентиляционного канала 250 мм × 300 мм; на выходе задана равномерная скорость потока 1 м/с; на входе — статическое давление, равное атмосферному; стенки канала считались гладкими и непроницаемыми, а для поверхности решёток учитывали их шероховатость 1 мкм; линейный размер расчётной ячейки составлял 1 мм. Обе решётки моделировались в одних и тех же габаритных размерах. Геометрические параметры светозащитной решётки с П-образным профилем показаны в левой части на рис. 2а, жалюзийной решётки — на рис. 2б.

Программа численного моделирования предусматривала:

1. Визуализацию картин течения и векторных полей скорости;

2. Расчёт распределения скоростей в поперечном сечении на расстоянии 100 мм за решёткой;

3. Определение величины перепада полного давления на решётке;

4. Расчёт коэффициентов ослабления УФ-излучения решётками.

Результаты CFD-моделирования траекторий потоков в решётке и реакторе представлены на рис. 2. На рис. 2а показано распределение потоков с решёткой с П-образным профилем ламелей, на рис. 2б — с решёткой с ламелями разработанной конструкции в плоскости симметрии задачи. Для решётки с П-образными ламелями характерен большой разброс скоростей, возникновение вихрей и развитие турбулентности на выходе из решётки, что привело к локальному повышению скорости потока в камере обеззараживания, как и предполагалось на основе уравнения сохранения потока. Живое сечение на выходе для решётки с П-образными профилями составляет 20 % от сечения канала, что и является причиной локального повышения скорости потока на выходе из решётки в 5 раз по отно-

шению к скорости до решётки. Живое сечение на выходе из решётки с уголковыми ламелями составляет 90 % от сечения канала, поэтому скорость потока воздуха на выходе из каналов решётки увеличена всего на 10 % в сравнении со скоростью в канале. За решеткой нет вихрей, профиль скоростей течения достаточно

однороден. Среднее квадратичное отклонение скорости на расстоянии 100 мм от выхода из решёток составило 1,03 для решётки с П-образными ламелями и 0,27 с уголковыми ламелями. Перепад давления для решётки с П-образными ламелями составил 81,1 Па, а для решётки с уголковыми всего 12 Па.

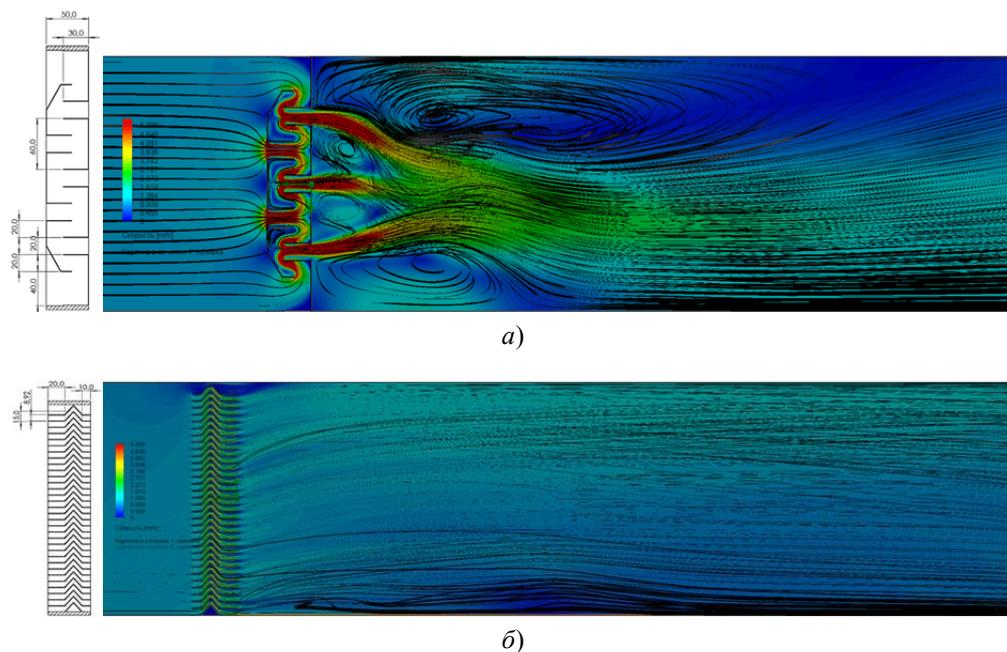


Рис. 2. Траектории потоков в решетке и реакторе: а) – П-образная решётка; б) – жалюзийная. Течение воздуха слева направо. Слева показана геометрия решеток

Расчеты светозащитных свойств решеток были выполнены методом трассировки лучей. Для проведения трассировки лучей использовались модели, учитывающие коэффициент отражения УФ-излучения с длиной волны 254 нм и комбинированный диффузно-зеркальный характер отражения от поверхностей. Результаты моделирования распространения УФ-излучения демонстрируют, что решётка из уголковых ламелей обеспечивает среднее по выходной плоскости экранирование сопоставимое с таковым в случае использования решётки с П-образными ламелями. При этом пиковые значения облучённости за обеими решётками находятся также на сопоставимом уровне. Расчётное среднее ослабление УФ-излучения (усреднение по площади сечения вентиляционного канала), определяемое как $\lg(E_0/E)$, где E_0 и E – облучённости без решётки и с решёткой, соответственно, для П-образной решётки составило 3,50, для решётки с уголковыми ламелями – 3,44, что достаточно для обеспечения безопасности.

Сравнение с экспериментом

На втором этапе исследования проведена экспериментальная верификация результатов численного моделирования. Перепады давления были измерены в вентиляционном канале с сечением, идентичным расчётной модели, с установленными металлическими светозащитными решётками. Для создания воздушного потока использовался центробежный вентилятор, расположенный на выходе из канала. Регулирование скорости потока в диапазоне 0,3–1,8 м/с осуществлялось ШИМ-контроллером независимо от типа устанавливаемой решётки, измерение скорости проводилось анемометром Testo 417. Измерение перепада давления на решётке выполнялось цифровым дифференциальным манометром. Измеренные величины перепада давления в зависимости от скорости воздуха в канале представлены на рис. 3.

Как следует из рис. 3, до скорости потока воздуха $v = 0,6$ м/с перепады давления на

обеих решётках отличаются незначительно. Начиная со скорости 0,8 м/с, П-образная решётка имела кратно большее сопротивление, чем уголковая решётка. При скорости потока 1 м/с перепад давлений на уголковой решётке равен 5 Па, а на П-образной решётке интерполированное значение составляет 48 Па. Таким образом, применяя для реактора с потоком газа защитную решётку с уголковыми ламелями, можно на порядок уменьшить перепад давлений при скоростях потока более 1 м/с.

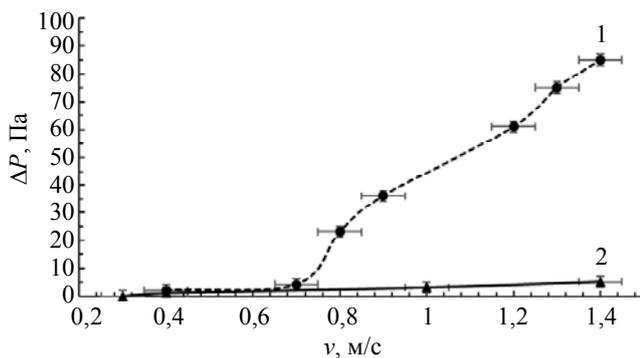


Рис. 3. Зависимость перепада давления ΔP , Па, до и после решётки от скорости воздуха. 1 – решётка с П-образными профилями, 2 – уголковая решётка

Срыв потока на лопастях вентилятора является одним из основных источников аэродинамического шума в вентиляционных системах, так как появляющиеся в этом процессе турбулентные вихри вызывают колебания давления, и как следствие – звуковые волны [5]. Уменьшенное сопротивление решётки позволило уменьшить и общий перепад давления в рециркуляторе, в результате чего уменьшился шум от устройства, т. к. вентилятор создавал меньший перепад давления в камере, что привело к уменьшению количества срывов потока на его лопастях. Эффект снижения уровня шума был измерен согласно методике, рекомендованной ГОСТ Р ИСО 3744-2013 [6], для двух тестовых реакторов, имеющих одинаковые размеры и вентиляторы, но различные светозащитные решётки. Система с двумя П-образными решётками имела уровень шума 42 дБ, а система с предложенными уголковыми решётками – 36 дБ. Следует отметить, что уровень шума от устройств в различных учреждениях жёстко регулируется, например, в больничных палатах и операционных уровень шума должен быть ниже 40 дБ [7].

Для измерения светозащитной эффективности решёток в вентиляционном канале, в котором на расстоянии 100 мм до открытого конца размещалась U-образная ультрафиолетовая лампа с мощностью УФ-излучения 33 Вт на длине волны 254 нм, а на выходе из канала помещалась исследуемая решётка. Измерения исходной облучённости без решетки выполнялись цифровым радиометром ИЛТ2400 в плоскости, расположенной на расстоянии 100 мм от края канала перпендикулярно его оси, по сетке 5×9 точек. После установки тестируемой решётки на открытый торец трубы измерения повторялись в тех же точках. Светозащитная эффективность определялась по коэффициенту ослабления, как логарифм отношения значений облучённости в точках до и после установки решётки. Для П-образной решётки среднее ослабление составило 3,88, а для уголковой решётки – 2,97, что согласуется с расчётами по модели трассировки лучей. Таким образом, уголковая решётка с таким ослаблением обеспечивает снижение УФ-интенсивности до значений, не превышающих предельно допустимых уровней, определённых СанПиН 2.2.4.3359-16 [8].

Заключение

Предложенная конструкция светозащитной решётки с ламелями в виде уголков с дополнительными направляющими плоскостями, которая значительно превосходит существующие аналоги для УФ-реакторов с протоком газа. Измеренная степень экранирования УФ-излучения с длиной волны 254 нм составляет 2,97, что сопоставимо со степенью ослабления у лучших образцов светозащитных решёток, а аэродинамическое сопротивление при скоростях потока более 1 м/с снижено на порядок по сравнению с широко распространённой решёткой с П-образными профилями. Кроме этого уголковая решётка с дополнительными прямолинейными направляющими участками стабилизирует поток в камере УФ-реактора, минимизируют его отрыв и уменьшает разброс скоростей до среднеквадратичного отклонения 0,27. Используемая в настоящее время решётка с П-образным профилем создает сильные пространственные отклонения потока за решёткой, образование вихрей и большие неоднородности скоростей в камере

реактора со среднеквадратичным отклонением скорости на расстоянии 100 мм от выхода из решёток 1,03. Такие различия объясняются четырёхкратным увеличением живого сечения угловой решётки по сравнению с П-образной и наличием прямолинейных направляющих. Получено снижение уровня шума до 36 дБ, что ниже предельного уровня 40 дБ по СанПиН [6] без потери производительности, что ранее было невозможно при использовании П-образных светозащитных решёток с уровнем шума 42 дБ. В камере облучения УФ-реактора получен более стабильный поток газа, что увеличивает эффективность обеззараживания воздуха. Применение усовершенствованных светозащитных решеток позволило увеличить скорость воздуха в реакторе, что позволило вдвое уменьшить габариты рециркулятора. Предложенная конструкция применяется в серийных устройствах УФ-рециркуляторов НПО «ЛИТ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М. / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 5–17.
2. Сизиков В. П. Устройство для обеззараживания воздуха. Патент на изобретение № 2462269С1 (РФ). 2011.
3. Savenkov D., Donskoy D., Limarenko N., Gladckih D. / E3S Web of Conferences. – Сасак, 2024. P. 05010-05018.
4. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., Kolmogorov D. / J. Appl. Sci. 2021. Vol. 11. № 6. P. 2459.
5. Roger M., Moreau S. / J. AIAA. 2004. Vol. 42. № 3. P. 536–544.
6. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 «Определение уровня звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению».
7. САНПИН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
8. САНПИН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

PACS: 87.50; 92.60.Sz

UV protection grating for UV reactors with gas flow

D. E. Naumenko^{1,2,*}, N. A. Kolesnik¹, and L. M. Vasilyak³¹ LIT, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia

* E-mail: ddannaum@yandex.ru

³ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

Received 20.11.2025; revised 12.12.2025; accepted 20.02.2026

An analysis of light-shielding protection grating designs (U-shaped, honeycomb, and louvered) for flow-through UV reactors revealed a contradiction between achieving a high level of UV radiation shielding and low aerodynamic drag. A louvered grating with angled lamellas complemented by straight inlet and outlet sections was proposed. Numerical modeling and experimental studies showed that the new design provides a level of UV radiation attenuation comparable to the best analogs, such as a U-shaped grating, while reducing aerodynamic drag by a factor of 9. Flow alignment in the UV reactor was achieved, noise levels were reduced to below 40 dB, and the reactor's dimensions were reduced without any loss of performance.

Keywords: UV radiation, UV reactor, UV disinfection, recirculator.

REFERENCES

1. Vasilyak L. M., Plasma Phys Rep. **47**, 318 (2021).
2. Sizikov V. P., Device for Air Disinfection. Patent for invention № 2462269C1 (RF). 2011 [in Russian].

3. Savenkov D., Donskoy D., Limarenko N., and Gladckih D., E3S Web of Conferences, 05010–05018 (2024).
4. Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., and Kolmogorov D. J., Appl. Sci., **11** (6), 2459 (2021).
5. Roger M. and Moreau S. J., AIAA, **42** (3), 536–544 (2004).
6. GOST R ISO 3744-2013. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane [in Russian].
7. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Environmental Factors for Humans [in Russian].
8. SanPiN 2.2.4.3359-16. Sanitary and Epidemiological Requirements for Physical Factors at Workplaces [in Russian].

Об авторах

Науменко Данила Евгеньевич, начальник технологического отдела воздушного оборудования, ООО НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25); студент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: ddannaum@yandex.ru SPIN-код: 3670-9247, AuthorID: 1318520

Колесник Никита Александрович, ведущий конструктор группы разработки УФ-приборов, ООО НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25). E-mail: kolesnik@lit-uv.ru

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Ижорская ул. 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID 19599. ORCID 0000-0001-6982-3038. Scopus 7004886755

УДК 53.096
EDN: VLELMQ

PACS: 51.50.+v

Водородный генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP

© В. А. Шутаев*, Е. А. Гребенщикова, Ю. П. Яковлев

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021 Россия

* E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 10.10.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.11

Создан новый генератор тока на основе диода Шоттки Pd/InP площадью 1 мм², работающий в атмосфере 100 % водорода в условиях полной темноты. Установлено, что в режиме короткого замыкания «водородный ток» диода Шоттки увеличивается почти на три порядка при увеличении температуры от 90 до 300 К. Показано, что увеличение «водородного тока» с ростом температуры связано с уменьшением высоты потенциального барьера диода в интервале температур 90–300 К. Предложен механизм управления величиной генерации «водородного тока» посредством изменения температуры диода Шоттки Pd/InP.

Ключевые слова: водород, палладий, Pd/InP, ионизация, гидрид палладия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-101-105

Введение

Электрические свойства диодов Шоттки Pd/InP в газовой среде с водородом исследуются с целью создания датчиков водорода [1–5]. При этом изучаются изменения вольт-амперных и емкостных характеристик таких диодов в водороде по сравнению с воздушной средой, причём все измерения, как правило, выполняются при приложении внешнего напряжения. В водороде изменяется работа выхода палладия [6, 7] и, как следствие, изменяется высота потенциального барьера в диодах Pd/InP, изменяются при этом и электрические характеристики диодов, а по изменению характеристик можно судить о концентрации водорода в газовой среде.

Ранее исследовали механизмы токопрохождения [1, 2] в структурах Pd/InP в водородной среде с освещением структуры светодио-дом и без него при комнатной температуре без приложения внешнего напряжения. В работе [3] была обнаружена генерация тока в диодах Шоттки Pd/InP при помещении их в

водородную среду без приложения внешнего смещения. Данная работа является продолжением выше названных работ и посвящена исследованию генерации тока и ЭДС в структурах Pd/n-InP в интервале температур 90–300 К в атмосфере водорода.

Эксперимент

Технология изготовления исследуемых структур Pd/InP подробно изложена в работах [1–3]. Слой палладия площадью 1×1 мм² и толщиной 25 нм создавался термическим напылением в вакууме Pd чистотой 99,96 % на монокристаллических пластинах InP с концентрацией электронов 10¹⁶ см⁻³. К палладию и InP были созданы омические контакты на основе золота. Изучены электрические свойства структур Pd/InP в интервале температур 90–300 К в вакууме и в среде водорода. Исследование структур проводилось в условиях коротко замкнутой электрической цепи и в режиме холостого хода. Для оценки температурной зависимости высоты потенциального

барьера в исследуемых диодах Шоттки были измерены вольт-амперные характеристики в условиях полной темноты в вакууме и в среде 100 % водорода.

При исследовании электрических характеристик структур Pd/InP использовался источник-измеритель KEITLEY-6517B (Keithley Instruments, Inc.) с выводом данных на компьютер.

Результаты эксперимента

Рассмотрим поведение тока в атмосфере водорода в интервале температур 90–300 К (рис. 1). «Водородный ток», т. е. ток, который появляется только в среде водорода в режиме короткого замыкания в условиях полной темноты и увеличивается почти на 3 порядка

с увеличением температуры от 90 до 300 К. При $T \sim 270$ К ток достигает максимального значения $10 \mu\text{A}$ при площади структуры 1 мм^2 . На зависимости ЭДС (E) от температуры в атмосфере водорода (рис. 2) можно выделить флуктуации в рассматриваемом диапазоне температур, однако прослеживается тенденция к увеличению ЭДС по абсолютному значению при уменьшении температуры. ЭДС достигает максимального значения $|E| = 170 \text{ мкВ}$ при температуре 90 К.

На рисунке 3 приведена зависимость высоты потенциального барьера диода Шоттки Pd/InP от температуры в атмосфере 100 % водорода. Высота потенциального барьера определялась по величине напряжения отсечки вольт-амперной характеристики экстраполяцией к $I = 0$.

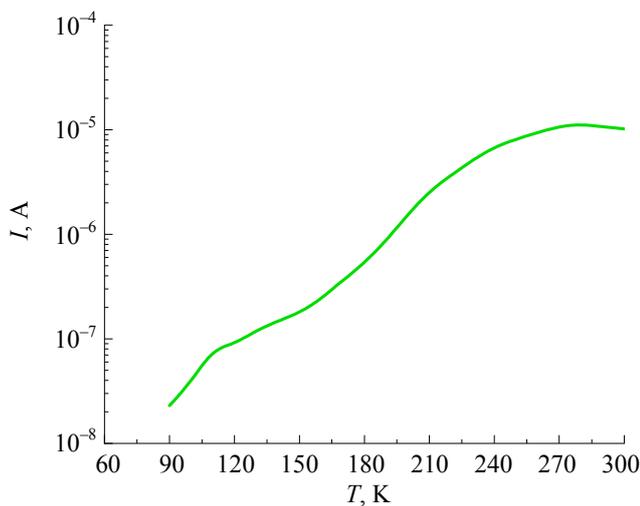


Рис. 1. Температурная зависимость генерации тока в атмосфере водорода

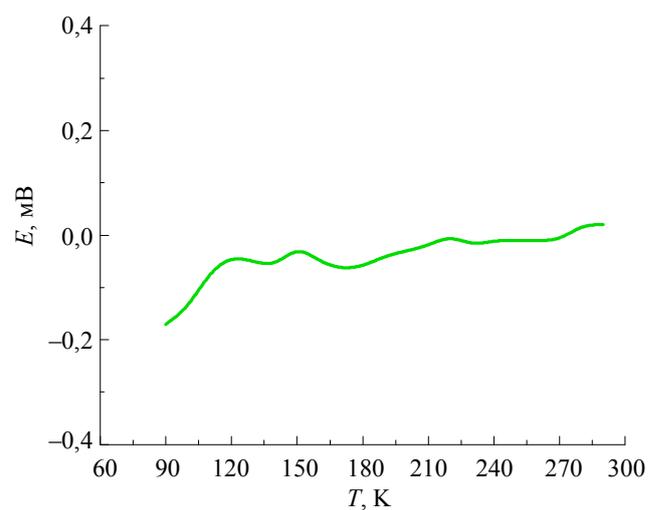


Рис. 2. Температурная зависимость генерации ЭДС в атмосфере водорода

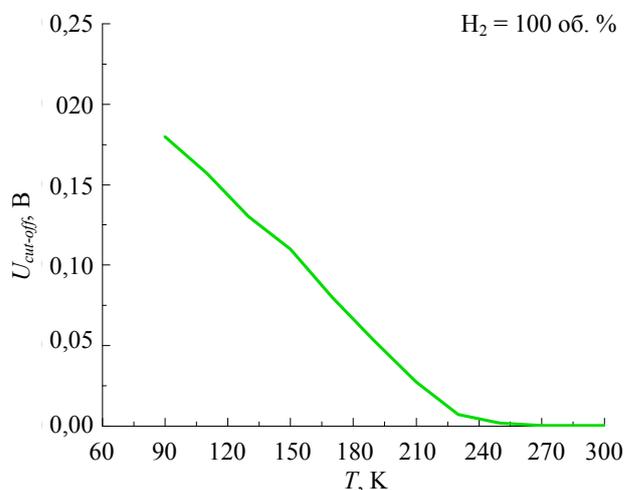


Рис. 3. Температурная зависимость высоты потенциального барьера от температуры

Из представленного графика видно, что высота барьера диода Шоттки в водороде монотонно уменьшается от 0,18 до 0 эВ при увеличении температуры от 90 до 270 К.

Анализ результатов

Появление «водородного тока» в диодах Шоттки Pd/InP в атмосфере водорода может быть связано, по мнению авторов, с образованием дополнительного количества электронов в Pd-слое. Образование дополнительного количества электронов, в свою очередь, может быть следствием двух факторов. Во-первых при контакте водорода с Pd-слоем возможна ионизация атомов водорода. Как было показано в работе [8] при сближении атомов водорода с атомами Pd на расстояние меньше боровского радиуса энергия ионизации атомов водорода может быть уменьшена до 0 эВ. Во-вторых, при взаимодействии Pd-слоя с водородом происходит образование гидроксида палладия PdH_x [9, 10]. Процесс образования PdH_x является экзотермическим и происходит с выделением тепловой энергии [11]. Совокупное воздействие этих двух факторов, возможно, и приводит к появлению дополнительного количества электронов в палладиевом слое.

После образования дополнительных электронов происходит их дрейф из палладиевого слоя в InP. Потенциальный барьер диода Шоттки существенно ограничивает поток электронов, образовавшихся в результате ионизации. В среде водорода (100 об. %) высота барьера в диодах Шоттки Pd/InP линейно уменьшается от 0,18 до 0 эВ при повышении температуры с 90 К до 270 К. При высоте барьера близкой к 0 эВ появляются условия для свободного протекания электронов по электрической цепи. Генерируемый в результате этого эффекта ток максимален при температуре 275–280 К. При дальнейшем повышении температуры до 300 К начинается плавное уменьшение генерируемого «водородного тока». Сопротивление потенциального барьера, определенное по наклону вольт-амперных характеристик при значении напряжения 10 мВ, уменьшается с 10⁵ до 1–2 Ом при повышении температуры от 90 до 300 К.

На рис. 4 представлены зонные диаграммы, поясняющие полученный экспери-

ментальный результат. Высота барьера диода Шоттки Pd/InP в вакууме определяется разницей между работой выхода Pd и InP и составляет 0,32 эВ при $T = 90$ К. При взаимодействии палладия с водородом в условиях полной темноты при комнатной температуре происходит ионизация атомов водорода с образованием протонов и электронов, а работа выхода палладия W_{Pd} уменьшается на величину 0,3–0,7 эВ [2, 6].

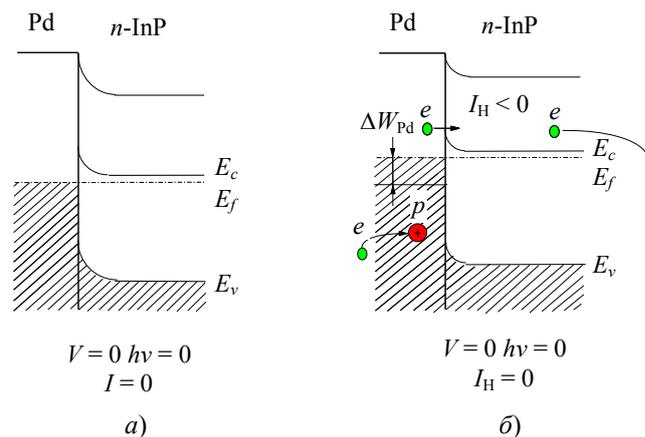


Рис. 4. Зонные диаграммы и токи в структуре Pd/InP, внешнее напряжение на образце равно нулю, электрическая цепь коротко замкнута, $T = 90$ К: а – в вакууме; б – в водороде; I_H – «водородный ток»; ΔW_{Pd} – изменение работы выхода Pd в водороде; e – электроны; p – протоны

Уменьшение W_{Pd} приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки. В результате разделения носителей заряда на потенциальном барьере в структуре появляется ток короткого замыкания, величина которого зависит от высоты барьера. При понижении температуры высота барьера увеличивается, а электроны начинают накапливаться около границы раздела Pd/InP. Это приводит к тому, что ток короткого замыкания начинает уменьшаться, а ЭДС холостого хода нарастать. Длительность протекания тока в структуре при $T = 300$ К сохраняется в течение суток, а затем линейно уменьшается в течение 7 суток до 10 % от исходной величины. При повторном напуске водорода в кювету ток увеличивается до такого же значения, как и при первоначальном напуске водорода (10 мкА). Величина генерируемого тока (10 мкА) пропорциональна площади структуры (1 мм²). Следует отметить, что с увеличением температуры от 90 до 300 К высота барьера в среде водорода будет

уменьшаться и стремиться к 0 эВ за счет уменьшения ширины запрещенной зоны E_g в InP.

Заключение

Исследована генерация тока и ЭДС в диодах Шоттки Pd/InP в вакууме и водородной среде в интервале температур 90–300 К в условиях полной темноты. В среде водорода в диодах Шоттки генерируется ток в интервале температур 90–300 К. Величина генерируемого тока увеличивается почти на три порядка с увеличением температуры от 90 до 300 К. Величина ЭДС увеличивается по абсолютному значению от 0 до 170 мкВ с понижением температуры от 300 до 90 К. Генерация тока может быть обусловлена образованием дополнительных электронов за счет образования гидрида палладия при взаимодействии водорода с Pd-слоем.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутаев В. А., Гребенищикова Е. А., Сидоров В. Г., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2021. Т. 55. № 12. С. 1236–1239.
2. Шутаев В. А., Сидоров В. Г., Гребенищикова Е. А., Власов Л. К., Пивоварова А. А., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2019. Т. 53. № 10. С. 1427–1430.
3. Шутаев В. А., Гребенищикова Е. А., Сидоров В. Г., Яковлев Ю. П. / ФТП. 2024. Т. 58. № 1. С. 37–41.
4. Chou Y.-I., Chen C.-M., Liu W.-Ch., Chen H.-I. / IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26. № 2. P. 62–65.
5. Kumar A. A., Janardhanam V., Reddy V. R. / J Mater Sci: Mater Electron. 2011. № 22. P. 854–861.
6. Yamamoto N., Tonomura S., Matsuoka T., Tsubomura H. / J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. № 10. P. 6227–6230.
7. Skucha K., Fan Zh., Jeon K., Javey A., Boser B. / Sensors Actuators B. 2010. № 145. P. 232–238.
8. Константинов О. В., Дымников В. Д., Мунцев М. А. / ФТП. 2008. Т. 42. № 8. С. 947–949.
9. Ube T., Hasegawa S., Horie T., Ishiguro T. / J. Mater. Sci. 2021. № 56. P. 3336–3345.
10. Ndaya C. C., Javahiraly N., Brioude A. / Sensors. 2019. Vol. 19. № 4478. P. 1–41.
11. Барьюдин Л. Э. / ФТТ. 1995. Т. 37. № 5. С. 1484–1491.

PACS: 51.50.+v

Hydrogen current generator based on Pd/InP Schottky diode

V. A. Shutaev*, E. A. Grebenshchikova, and Yu. P. Yakovlev

Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

*E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Received 18.09.2025; revised 10.10.2025; accepted 20.02.2026

A new current generator based on Pd/InP Schottky diode with an area of 1 mm² operating in hydrogen medium in complete darkness has been created. It is established that in a short-circuit regime a “hydrogen current” of the Schottky diode increases by about three orders of magnitude with increasing the temperature from 90 to 300 K. It is shown that the increase of the “hydrogen current” with increase the temperature is related to the decrease of the potential barrier height of the diode in the temperature range 90–300 K. The mechanism of current generation in Pd/InP Schottky diodes in 100 % hydrogen, consisting in appearance of an additional number of electrons in Pd-layer as a result of palladium hydride formation, is proposed.

Keywords: hydrogen, palladium, Pd/InP, ionization, palladium hydride.

REFERENCES

1. Shutaev V. A., Grebenshchikova E. A., Sidorov V. G., and Yakovlev Yu. P., Semiconductors **56** (14), 2170–2173 (2022).
2. Shutaev V. A., Sidorov V. G., Grebenshchikova E. A., Vlasov L. K., Pivovarov A. A., and Yakovlev Yu. P., Semiconductors **53** (10), 1389–1392 (2019).

3. Shutaev V. A., Sidorov V. G., Grebenshchikova E. A., and Yakovlev Yu. P., *Semiconductors* **58** (1), 34–37 (2024).
4. Chou Y.-I., Chen C.-M., Liu W.-Ch., and Chen H.-I., *IEEE Electron Device Lett.* **26** (2), 62–65 (2005).
5. Kumar A. A., Janardhanam V., and Reddy V. R., *J. Mater Sci: Mater Electron*, № 22, 854–861 (2011).
6. Yamamoto N., Tonomura S., Matsuoka T., and Tsubomura H., *J. Appl. Phys.* **52** (10), 6227–6230 (1981).
7. Skucha K., Fan Zh., Jeon K., Javey A., and Boser B., *Sensors Actuators B*, № 145, 232–238 (2010).
8. Konstantinov O. V., Dymnikov V. D., and Mitsev M. A., *Semiconductors* **42** (8), 931–933 (2008).
9. Ube T., Hasegawa S., Horie T., and Ishiguro T., *J. Mater. Sci.*, № 56, 3336–3345 (2021).
10. Ndaya C. C., Javahiraly N., and Brioude A., *Sensors* **19** (4478), 1–41 (2019).
11. Bar'yudin L. E., *Fiz. Tverd. Tela* **37** (5), 1484–1491 (1995) [in Russian].

Об авторах

Шутаев Вадим Аркадьевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). E-mail: vadimshutaev@mail.ru

Гребенщикова Елена Александровна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). Email: lot160@mail.ru AuthorID: 116448

Яковлев Юрий Павлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26). E-mail: yakovlev.iropto@mail.ioffe.ru SPIN-код: 3394-1498, AuthorID: 20496

Поздравляем с юбилеем!



21 февраля 2026 года исполнилось 70 лет признанному ученому в области твердотельной фотоэлектроники **Игорю Дмитриевичу Бурлакову**, доктору технических наук, профессору, заместителю генерального директора по инновациям и науке Государственного научного центра Российской Федерации АО «НПО «Орион».

В 1979 году И. Д. Бурлаков окончил Московский физико-технический институт по специальности «Инженер-физик», с 1976 года непрерывно работает в АО «НПО «Орион», пройдя путь от младшего научного сотрудника до заместителя

генерального директора по инновациям и науке.

И. Д. Бурлаков известный специалист в области технологий оптоэлектроники и фотоники, физики полупроводников и фотоэлектронных приборов. Впервые в России разработал основы промышленной технологии охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе полупроводникового соединения кадмий-ртуть-теллур. В работе руководителя обладает умением успешно находить оптимальные подходы и принимать оперативные решения для достижения поставленных целей. Созданные под его руководством и при непосредственном участии перспективные МФПУ инфракрасного диапазона и оптико-электронные приборы нашли широкое применение в системах и комплексах оборонного и гражданского назначения. Выполненные разработки конкурентоспособны на мировом рынке и создают основу для перехода инфракрасных оптических информационных технологий к качественно новому поколению.

И. Д. Бурлаков ведёт большую научно-организационную и педагогическую работу в качестве заведующего базовой кафедры «Инфракрасная техника и электронная оптика» Российского технологического университета – МИРЭА, председателя ГЭК Физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики МФТИ, главного редактора журналов «Прикладная физика» и «Успехи прикладной физики», члена редколлегии «Оптического журнала», заместителя председателя диссертационного Совета в АО «НПО «Орион», члена диссертационного Совета в НИУ «МЭИ». Подготовил в качестве научного руководителя 3-х докторов и 6 кандидатов наук. Автор более 340 научных работ, опубликованных в российских и зарубежных журналах, среди которых более 35 авторских свидетельств и патентов, 3 книги и 3 учебных издания.

Высокий профессионализм, большой опыт и глубокие знания перспектив развития отрасли позволяют Бурлакову И. Д. проводить большую экспертную работу в качестве

члена президиума Межведомственного экспертного совета по Федеральному проекту № 3 (Стратегические материалы), члена Экспертного совета по стипендиям за выдающиеся достижения и значительный вклад в создании прорывных технологий и разработке современных образцов техники в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства, эксперта Фонда перспективных исследований.

За многолетнюю научно-техническую и руководящую работу имеет поощрения и награды федеральных органов государственной власти, отмечен знаком «Почетный работник науки и техники Российской Федерации», 2024 году удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Редколлегия и редакция журнала «Прикладная физика» искренне признательны Вам, Игорь Дмитриевич, за неоценимый вклад в развитие журнала, который благодаря Вашему профессионализму, требовательности и умению видеть перспективу является одним из самых известных и авторитетных российских научных изданий.

Мы совместно с Вашими многочисленными коллегами, друзьями и учениками поздравляем Вас со славным юбилеем и желаем Вам крепкого здоровья, плодотворной научной и педагогической деятельности, успехов и удачи в достижении выдающихся результатов.

Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей (в редакции 2026 г.)

1. Журнал «Прикладная физика» ориентирован в основном на срочную публикацию кратких статей о последних достижениях в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения. Журнал входит в новый Перечень ВАК, вступивший в действие 1 декабря 2015 г.

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии, учредителю и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т. ч. «авторское право»). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи _____ предоставляем редколлегии, учредителю и издателю журнала «Прикладная физика» безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций. Подписи авторов: _____ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9, АО «НПО «Орион», Редакция журнала «Прикладная физика» или по электронной почте: advance@orion-ir.ru

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке.

3. Рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке.

4. Объем статьи (вместе с рисунками, библиографией и англоязычной частью) не должен превышать **7 страниц** формата А4 при однократном межстрочном интервале. (Статью большего объема предлагается направлять в аффилированный журнал "**Успехи прикладной физики**", предназначенный для публикации развернутых статей и обзоров). Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word (гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 12), причем текст уже должен содержать в нужном месте рисунки и подписи под ними. Однако следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

- название раздела журнала;
- индекс УДК;
- код классификации PACS (https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf);
- заголовок статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- аннотация статьи (10–15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);
- ключевые слова;
- шифр научной специальности.

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

Внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (полуужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) (**обязательный раздел**): фамилия, имя, отчество (полностью), **e-mail (всех авторов)**, профили и регистрационные номера в наукометрических базах данных (SPIN-код, РИНЦ Author ID, ArXiv Author ID, Orcid ID, Scopus Author ID), ученая степень, звание, должность, почтовый адрес (предприятия).

Также необходимо указать ответственного за переписку с редакцией.

Авторы могут предложить возможных рецензентов (2–3 человека с указанием ФИО (полностью), места работы и адрес электронной почты). При этом предполагаемые кандидаты не должны работать в учреждениях, в которых работают авторы.

После основного текста – список использованных источников под названием «Список литературы». Примеры обозначения в разделе "Список литературы" использованных источников.

Ссылка на **статьи** дается следующим образом: Фамилия И.О., название журнала, год, том, номер, номера страниц.

Иванов И. И. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12–18; <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-12-18>

Lang D. V. / J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023–3034.

Ссылка на **книги**: Фамилия И.О., название книги, город, издательство, год. (При ссылке на определенную главу или страницу в книге после года ставится номер страницы.)

Корн Г., Корн Е. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.

Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. С. 371.

Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. – Долгопрудный: Интеллект, 2012.

Ссылка на **материалы конференции**: Фамилия И.О., название публикации, место и дата проведения, номера страниц.

Романов А. В., Степович М. А., Филиппов М. Н. / Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2007. С. 592–599.

Ссылка на **патенты**: Фамилия И.О., название, вид, номер, год.

Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Якубов Р. Х. Вакуумный искровой разрядник. Патент на изобретение № 2654494 (РФ). 2018.

Ссылка на **диссертации и авторефераты**: Фамилия И.О., название работы (автореферата), дисс. ... канд. (д-ра) физ.-мат. наук, город, организация, год.

Гречихин В. А. Разработка и анализ компьютерных алгоритмов обработки одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1996.

Далее размещается подробная англоязычная информация о статье, необходимая для индексирования всего журнала, данной статьи и её авторов в международных наукометрических базах данных, а именно: PACS, название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, его почтовый адрес, e-mail автора (авторов), аннотация, ключевые слова (Keywords), пристатейная библиография (References); поскольку журнал распространяется и за рубежом, редакция оставляет за собой право корректировать английскую часть текста без изменения его смысла.

Оформление пристатейной библиографии в англоязычной части статьи (References) имеет свои особенности. В частности, если цитируемая книга или монография является русскоязычным переводом с зарубежного издания, то указываются исходные данные этого издания (авторы, название книги, издательство, город или страна, год издания), а также русскоязычное издательство и год издания на русском языке. Ниже приведены основные примеры обозначения использованных источников в разделе References:

Статья из журнала:

Ivanov I. I., Applied Physics, № 1, 12–18 (2022) [in Russian].

Lang D. V., J. Appl. Phys. **45** (7), 3023–3034 (1974).

Примечание: если русскоязычный журнал имеет печатный англоязычный аналог, то используется английское название аналога и номера страниц должны быть указаны из него. Если англоязычного аналога нет, то применяется английская транслитерация русскоязычного названия.

Книга:

Korn G. and Korn E. Mathematical Handbook. New York-London: McGraw-Hill Book Company, 1968; Moscow, Nauka, 1974.

Ultraviolet technologies in the modern world / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N. Dolgoprudny: Intellect, 2012 [in Russian].

Материалы конференции:

Romanov A. V., Stepovich M. A., and Filippov M. N. Proc. XVII Intern. Meeting on Radiation Physics of Solid State. Sevastopol, 2007, pp. 592–599.

Патенты:

Davydov S. G., Dolgov A. N., Yakubov R. H. Vacuum spark gap. Patent for invention № 2654494 (RF). 2018.

Диссертации и авторефераты:

Grechikhin V. A. Development and analysis of computer algorithms for processing single-particle signals of laser Doppler anemometers: Abstract. Diss. Candidate of Technical Sciences. M., MEI, 1996.

6. Список использованных источников («Список литературы») должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Эти ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1–3], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (3), уравнение (1), (рис. 2), (табл. 3). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются.

7. Количество рисунков и фотографий для типовой статьи не должно превышать 4. Если один рисунок содержит два, три или более вариантов графических (или фото) изображений типа «рис. 2а», «рис. 2б» и т. д., то каждый отдельный вариант в этом случае засчитывается как отдельный рисунок. При превышении вышеуказанных лимитов на количество рисунков (фотографий) статья возвращается авторам на переработку. Графика (черно-белая и цветная) представляется непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе. Рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только (**строго!**) в символьной (буквенной) форме, а через запятую – размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только (**строго!**) на белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются.

8. Подписи под соответствующими рисунками представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию. Любой указываемый в подписи физический (технический) символ должен иметь там же свое словесное раскрытие.

9. Простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы – с использованием редактора формул MathType. Стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв – наклонный шрифт (курсив). Векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее) или стрелкой над курсивным символом вектора (менее желательно). Для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п. Размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

10. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка – наименование данных и размерность; следующие строки – сами данные.

11. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

12. Рукописи, а также CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

13. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

14. При публикации в журнале каждая статья сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов). В статье указывается также дата поступления статьи в редакцию.



Государственный научный центр
Российской Федерации
Акционерное общество
«НПО «Орион»

XXVIII Международная научно-техническая конференция по фотозлектронике
27-29 мая 2026, Москва

<https://scinetwork.ru/conferences>



Конференция организована ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
при поддержке:

Минпромторга России
Минобрнауки России
Государственной корпорации «Ростех»
Холдинга АО «Швабе»
Фонда перспективных исследований
Русского оптического общества

Тематика конференции:

- ✓ Материалы фотосенсорики и новые технологии
- ✓ Электроника обработки сигналов
- ✓ Техника тепловидения и ночного видения
- ✓ Метрология приема оптического излучения
- ✓ Микрокриогенная техника

Формат конференции:

- ✓ приглашенные, устные и стендовые доклады о современных тенденциях и направлениях по тематике конференции.
- ✓ выставка научно-технических достижений организаций отрасли

Место проведения конференции: **АО «НПО «Орион», Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9**

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ НА САЙТЕ КОНФЕРЕНЦИИ

<https://scinetwork.ru/conferences>

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Краткое содержание доклада (1,5 – 2 страницы формата А4), включая название и аннотацию на английском языке, вставленные рисунки и список литературы, представляется в редакторе Microsoft Word шрифтом Times New Roman, иллюстрации в формате JPG, BMP, WMF или EMF. **Пример оформления тезисов** опубликован на сайте конференции: <https://scinetwork.ru/conferences>.

Окончание приема тезисов докладов – **27 марта 2026 г.**

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС

Организационный взнос за одного участника, включающий орграсходы, оформление документов, набор участника конференции, сборник тезисов, кофе-брейки, составляет:

- для юридических лиц – **15250** руб.
- для физических лиц – **3050** руб.
- для студентов и аспирантов – бесплатно.

Организации, желающие принять участие в Выставке научно-технических достижений предприятий отрасли, регистрируются и направляют предварительную заявку на сайте: <https://scinetwork.ru/conferences>.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Председатель – Старцев В.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Заместители председателя:

Барбашев А.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Смирнов А.А. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Ответственный секретарь – Кузьмина О.М.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Члены организационного комитета:

Бучинская Н.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Волков И.Ф. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Егоров А.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Еникеев О.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Колбазова Н.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Кунарев Д.Г. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Лаврентьева И.С. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Наумов А.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Полесский А.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Светикова А.О. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Соловьев Д.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Тренина Е.О. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Шафоростова М.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Яковлев А.Ю. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

Председатель – Старцев В.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Россия

Заместители председателя:

Бурлаков И.Д., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва
Пономаренко В.П., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва

Ученый секретарь – Егоров А.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва

Члены программного комитета:

Балоев В.А. – АО «Швабе», Москва
Батурин А.С. – МФТИ (НИУ), Москва
Белоусов Ю.И. – филиал АО «Корпорация «Комета» - «НПЦ ОЭКН», Санкт-Петербург
Быков В.А. – ФГУП «НИИФП им. Ф.В. Лукина», Зеленоград
Войцеховский А.В. – ТГУ (НИУ), Томск
Вылегжанин Г.Н. – АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва
Вязников А.Н. – АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург
Гапонов А.А. – Минпромторг России, Москва
Гапоненко С.В. – Институт физики им. Б.И. Степанова, НАН Беларуси, Минск
Гладышев А.И. – Секция по оборонным проблемам Министерства обороны (при Президиуме РАН), Москва
Грузевич Ю.К. – АО «НПО Геофизика-НВ», Москва
Гуляев Ю.В. – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Захаров А.А. – АО «Корпорация «Комета», Москва
Иванов В.В. – МФТИ (НИУ), Москва
Иванов В.П. – АО «НПО ГИПО», Казань
Иванов С.В. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Калюгин В.С. – АО «Швабе», Москва
Каргин Н.И. – ФГБОУ ВПО «НИЯУ МИФИ», Москва
Клоков А.С. – ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Красногорск
Кузнецов С.А. – АО «МЗ «Сапфир», Москва
Латышев А.В. – ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск
Малашкина О.Ф. – АО «Швабе», Москва
Мирошникова И.Н. – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва
Никитов С.А. – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Попов С.В. – АО «Швабе», Москва
Серов В.В. – АО ОКБ «Астрон», Москва
Сигов А.С. – РТУ МИРЭА, Москва
Средин В.Г. – Академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха
Форш П.А. – ФГБОУ ВПО «МГУ им. М.В. Ломоносова», Москва
Яковлев Ю.П. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Яковлева Н.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва
Якушев М.В. – ИФП СО РАН, Новосибирск

КОНТАКТЫ:

общие орг. вопросы: +7 (499) 374-91-71; e-mail: conf@orion-ir.ru
Овсий Андрей Алексеевич

вопросы получения и публикации материалов: +7 (499) 374-81-51; e-mail: conf@orion-ir.ru
Севалкина Лилия Григорьевна

участие в выставке: +7(499) 373-40-91; e-mail: marketing@orion-ir.ru
Светикова Анастасия Олеговна

Наш адрес:

АО «НПО «Орион», Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9
e-mail: conf@orion-ir.ru; orion@orion-ir.ru