

Редакционная коллегия

Андреев Степан Николаевич	д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., 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), Долгопрудный, Московская обл., 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.), Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian
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, № 2

Основан в 1994 г.

Москва

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Анализ состава и источников поступления осадка на поверхности МКС

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

Обнаружение потенциального электрического поля, индуцированного тороидом с низкочастотным током

Томилин А. К., Мисюченко И., Викулин В. С. 13

ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

Получение чернил из коллоидных нанокристаллов AgInS_2 и микроплоттерная печать фоточувствительных структур на их основе

Шуклов И. А., Лим В. В., Власов И. С., Троянова М. А., Шалагин А. Ю., Вершинина О. В., Яковлев В. О., Попов В. С., Иванов В. В. 19

Зависимость затухания фотосигнала в фоторезисторах на основе массивов коллоидных квантовых точек HgTe от условий их получения

Яковлев В. О., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Сапцова О. А., Короннов А. А., Вершинина О. В., Медведев А. Г., Пономаренко В. П., Попов В. С. 28

Влияние микродефектов на вольт-амперные характеристики и шумы кремниевых фотодиодов

Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Конорев Д. С., Макарова Э. А., Молчанов Д. С., Попов К. А., Полунеев В. В., Жукович-Гордеева А. А. 35

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Конверсия CO_2 в микроволновом разряде в жидком метаноле

Батукаев Т. С., Билера И. В., Крашевская Г. В., Лебедев Ю. А., Шумилов В. К. 43

Воздействие плазмы на резонансное рассеяние магнитного поля диэлектрическим кольцом

Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Василяк Л. М. 47

Динамика межфазной границы в системе «вода–масло» при электрическом пробое

Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. 53

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Возможности планетарной схемы обработки для группового шлифования и полирования пластин InSb и матричных модулей

Улькаров В. А., Трофимов А. А., Саркисов Н. А., Кузин В. О., Арбузов К. Ю., Размахнин И. Д., Кобыш А. Н., Козлов Р. Ю., Нестюркин М. С.

60

Термо-ЭДС наноразмерных пленок $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

Терехова А. С., Зеленский Л. А., Смирнов С. В.

67

ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ

Компрессия импульса тока сильнооточного релятивистского электронного пучка на виртуальном катоде

Донец А. Е., Рогожин В. И., Раваев А. А., Булейко А. Б., Лоза О. Т., Адамянц Д. А., Муфтахов И. Р.

73

ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

Автофокусировка изображения в оптико-электронных системах на основе нечеткого ПИД-регулятора

Берилло А. А.

82

Характеристики компактного гидроакустического преобразователя высокой удельной мощности в режимах излучения и приёма

Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Травин Р. В., Фарфель В. А., Леонов И. И., Костеев Д. А.

86

Наносенсоры для наблюдения за единичными молекулами цитохрома P450 BM3

Шумов И. Д., Зиборов В. С., Аблеев А. Н., Виноградова А. В., Афонин О. Н., Бухарина Н. С., Ваулин Н. В., Лебедев Д. В., Букатин А. С., Мухин И. С., Сараева И. Н., Арчаков А. И., Иванов Ю. Д.

94

ИНФОРМАЦИЯ

Правила для авторов

101

APPLIED PHYSICS [in Russian]

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2026, No. 2

Founded in 1994

Moscow

CONTENTS

GENERAL PHYSICS

- Analysis of the composition and sources of deposition on the ISS surface**
Vasilyak L. M., Peklevskiy A. V., Prokopovich S. P., Chikirev V. N., and Shubralova E. V. 7
- Detection of potential electric field induced by a toroid with low frequency current**
Tomilin A. K., Misyuchenko I., and Vikulin V. S. 13

PHOTOELECTRONICS

- Preparation of inks based on colloidal AgInS₂ nanocrystals and their application in microplotter printing of photosensitive structures**
Shuklov I. A., Lim V. V., Vlasov I. S., Troianova M. A., Shalagin A. Yu., Vershinina O. V., Iakovlev V. O., Popov V. S., and Ivanov V. V. 19
- Influence of the HgTe colloidal quantum dots layers obtaining conditions on the photosignal decay in photoresistors**
Yakovlev V. O., Koroleva T. V., Khakimov K. T., Saptsova O. A., Koronnov A. A., Vershinina O. V., Medvedev A. G., Ponomarenko V. P., and Popov V. S. 28
- The effect of microdefects on the current-voltage characteristics and noise of silicon photodiodes**
Boltar K. O., Vildyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Konorev D. S., Makarova E. A., Molchanov D. S., Popov K. A., Poluneev V. V., and Zhukovich-Gordeeva A. A. 35

PLASMA PHYSICS AND PLASMA METHODS

- Conversion of CO₂ in microwave discharge in liquid methanol**
Batukaev T. S., Biler I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Yu. A., and Shumilov V. K. 43
- The effect of plasma on resonant scattering of a magnetic field by a dielectric ring**
Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., and Vasilyak L. M. 47
- The influence of local conductivity inhomogeneities on the shape of a discharge channel in water**
Panov V. A., Saveliev A. S., and Kulikov Yu. M. 53

PHYSICAL SCIENCE OF MATERIALS

Possibilities of a planetary machining scheme for group grinding and polishing of InSb wafers and matrix modules

Ul'karov V. A., Trofimov A. A., Sarkisov N. A., Kuzin V. O., Arbuzov K. Yu., Razmahnin I. D., Kobysh A. N., Kozlov R. Yu., and Nestyurkin M. S.

60

Thermo-EMF of nanosized $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

Terekhova A. S., Zelensky L. A., and Smirnov S. V.

67

ELECTRON, ION AND LASER BEAMS

Pulse current compression of high-current relativistic electron beam on a virtual cathode

Donets A. E., Rogozhin V. I., Ravaev A. A., Buleyko A. B., Loza O. T., Adamyants D. A., and Muftakhov I. R.

73

PHYSICAL EQUIPMENT AND ITS ELEMENTS

Image autofocusing in optoelectronic systems based on a fuzzy PID controller

Berillo A. A.

82

Characteristics of a compact hydroacoustic transducer with high power density in transmission and reception modes

Britenkov A. K., Bogolyubov B. N., Travin R. V., Farfel V. A., Leonov I. I., and Kosteev D. A.

86

Nanotechnology-based sensors for monitoring single molecules of cytochrome P450 BM3

Shumov I. D., Ziborov V. S., Ableev A. N., Vinogradova A. V., Afonin O. N., Bukharina N. S., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., Saraeva I. N., Archakov A. I., and Ivanov Yu. D.

94

INFORMATION

Rules for authors

101

УДК 621.384.62; 629.7
EDN: IWXHIR

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Анализ состава и источников поступления осадка на поверхности МКС© 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 9.12.2025; после доработки 23.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.1

В составе мелкодисперсного осадка, доставленного с поверхности Международной космической станции (МКС), обнаружены частицы космической пыли, частицы метеороидного, вулканического и морского происхождения, обогащенные органикой. Эти частицы присутствуют в экзосфере Земли и в условиях корпускулярного, рентгеновского и ультрафиолетового облучения являются агрессивным агентом для материалов поверхности орбитальных станций. Анализ элементного состава осадка на поверхности МКС позволил оценить влияние обнаруженных элементов на стойкость конструкционных материалов орбитальных объектов, а также установить источники их поступления на поверхность МКС.

Ключевые слова: международная космическая станция, мелкодисперсный осадок, экзосфера.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-7-12

Введение

Возможными источниками регулярного поступления мелкодисперсного осадка на поверхность орбитальной станции могут быть частицы метеороидов и кометных хвостов, доставляющие из космического пространства адсорбированные ими молекулы межзвёздной среды и частицы космической пыли [1–7]. Данные по 36 регулярным потокам кометных хвостов, пересекающих околоземное пространство, хорошо известны, скорости движения частиц находятся в диапазоне от 18 до 70 км/с. Телескоп «УФ атмосфера» на МКС регистрирует микрометеориты, попадающие в зону надира. В это время МКС находится в зоне потока частиц кометного хвоста и регистрация свечения метеороидов телескопом «УФ атмосфера» является признаком возможной встречи частиц с поверхностью МКС.

Это доказывает, что экзосфера Земли включает непрерывно движущиеся к Земле мельчайшие частицы космического происхождения [3], которые попадают на поверхность орбитального объекта. Кроме этого, в экзосфере могут присутствовать и частицы, из Земли в результате вулканической деятельности и подъема микрочастиц в электрических полях глобальной электрической цепи Земли [1, 7]. Все эти частицы могут присутствовать в осадке на поверхности МКС, а также могут присутствовать продукты деструкции материала станции. С 2010 по 2024 годы по программе «Тест» проводился отбор проб мелкодисперсного осадка с внешней поверхности гермокорпуса российского сегмента МКС и проведение дисперсного, химического и геолого-минералогического анализов доставленных на Землю проб. На основе анализа осадка с разных элементов МКС можно сделать выводы о

составе осадка, а также об его источниках. Кроме того, можно сделать выводы о возможной опасности осадка для материалов станции или для космонавтов.

Анализ состава осадка

Для получения результатов послеполетного физико-химического анализа мелкодисперсного вещества на поверхностях элементов устройства «Тест-экспонат» после длительного нахождения в открытом космосе используются следующие методы: масс-спектрометрия, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, спектрометрия электронного парамагнитного резонанса, электронно-растровая микроскопия. В эксперименте, завершившемся в 2024 году, в ходе выполненных исследований по программе «Тест» был изучен элементный состав загрязнителя на фторопластовом корпусе устройства «Тест-экспонат», находившимся на внешней поверхности модуля «Поиск» 3,5 года. Количественный и элементный состав определялся методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (метод ИСП-ОЭС) как наиболее воспроизводимый и метрологически обеспеченный. Система микроволнового разложения пробы позволяет переводить в раствор все элементы, содержащиеся на различных носителях.

На микрофотографиях поверхности корпуса можно наблюдать характер выпадения осадка (рис. 1). Загрязнение содержится на любых неровностях и шероховатостях, оставляемых фрезой в процессе обработки фторопласта. При этом на поверхности материала не обнаружено каких-либо частиц. Для исследования с помощью электронного сканирующего микроскопа был выполнен срез (рис. 1) загрязнённого поверхностного слоя фторопласта с корпуса проботоотборника № 17А. Следует отметить, что контраст электронно-растрового изображения обусловлен различием в электропроводности материала. Трещины образованы в результате деформации среза (рис. 1) и не содержат загрязнения. Остальная поверхность материала и особенно поры в нём загрязнены осадком, вследствие чего имеют некоторую электропроводность, и как следствие, отразились тёмным цветом.

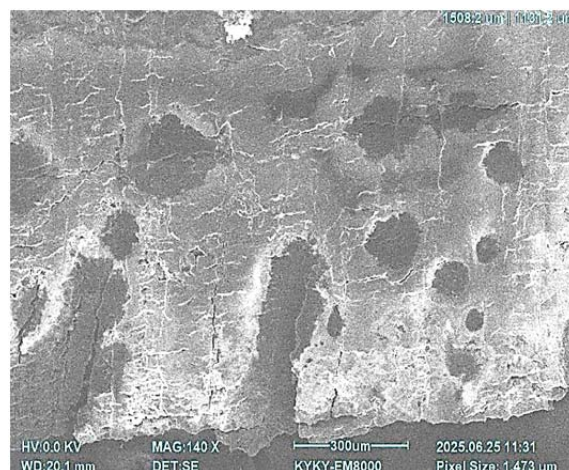


Рис. 1. Микрофотография фторопластового фрагмента, полученная методом ИСП-ОЭС

Исследования элементного состава загрязнителя на фторопластовом корпусе устройства «Тест-экспонат» (рис. 2) обладают рядом преимуществ, поскольку фторопласт не изменяется при последующей подготовке проб и содержат минимальное количество минеральных примесей. Контрольный образец фторопластового соскоба получен из того же самого корпуса. Исходный фторопласт содержит крайне мало посторонних включений, а погрешность метода можно оценить единственным фактором, который сложно учитывать в данном эксперименте – степень контаминации руками и запылённость образца обычной пылью. Данные загрязнения, как правило, вносят в образец кальций, в меньшей степени магний и кремний, что и прослеживается в результатах анализа.

Среди 65 химических элементов, выявленных в составе мелкодисперсного осадка на поверхностях МКС период с 2010 по 2024 годы, наиболее распространенным элементом являлось железо, практически не используемое в конструктивных элементах станции. Причем, железо не было выявлено только в 5 из 46 проб, исследованных по программе «Тест». Анализ содержания относительного количества в пробах железа и никеля позволяет прояснить происхождения железа в осадке. Согласно полученным результатам исследования экспонированных корпусов устройства «Тест-экспонат» [2] железо обнаружено в значительных количествах: 536 мкг/мл. Пик уровня содержания никеля также обнаружен на ОЭС спектре, но его содержание меньше: 1,6 мкг/мл. Таким образом, соотношение железо/никель в исследованном образце составляет 335, а в об-

разцах метеоритного происхождения, как хорошо известно, соотношение железо/никель практически постоянное и составляет от 11,5

до 14, а в среднем 12. Это позволяет сделать вывод, что частицы железа имеют не только метеоритное происхождение.

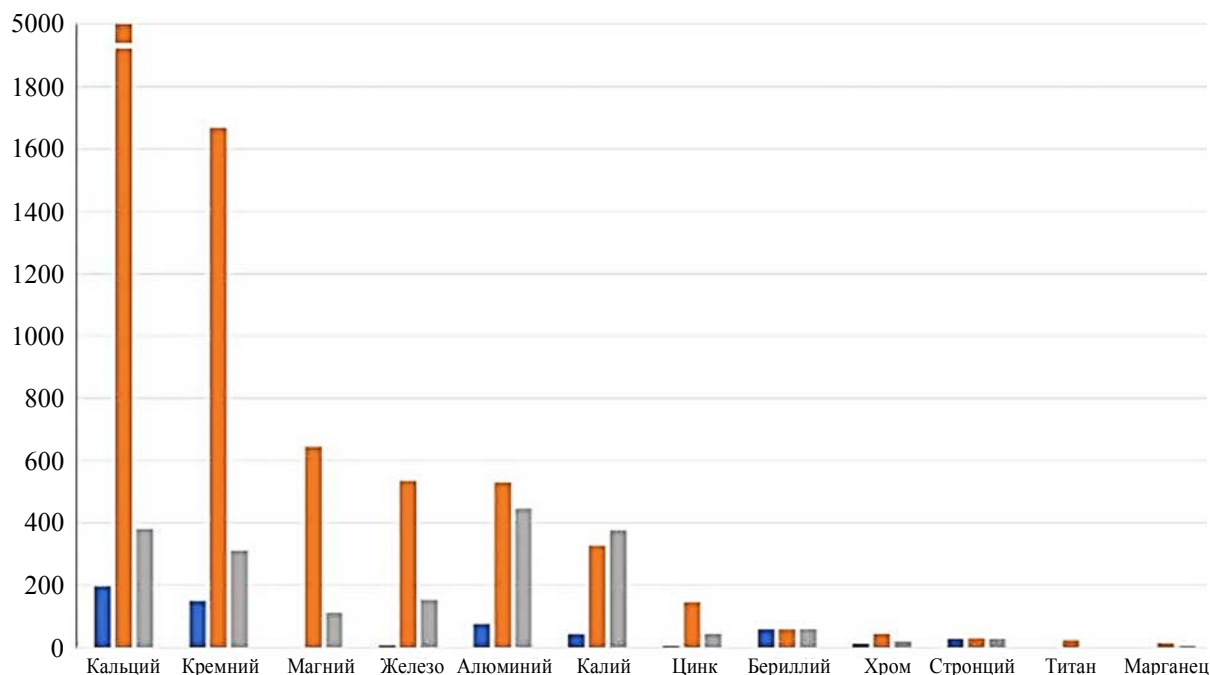


Рис. 2. Элементный состав соскоба с фторопластовых корпусов.

Левый синий столбик – чистый фторопласт, средний рыжий – пробник 17А, правый серый – пробник 18А

Элементный состав космической пыли, собранной с поверхности МКС ранее, позволяет предположить значительный вклад смешанного тропосферного аэрозоля терригенного и морского происхождения [6, 7]. В вулканических газах, поднимающихся за пределы атмосферы, может присутствовать хлорид железа, выделяющийся при высоких температурах из магматического расплава. Присутствие хлоридов железа в вулканических газах связано с реакцией магмы с хлорсодержащими соединениями, которые также могут выделяться при извержении. Летучим становится безводный хлорид железа (III) (FeCl_3), который при сильном нагревании переходит в газообразное состояние, образуя мономеры (FeCl_3) и димеры (Fe_2Cl_6).

Исследования физико-химических свойств мелкодисперсного осадка на поверхности МКС подтвердили возможность его активного участия в развитии микродеструкции элементов конструкции МКС. При взаимодействии хлорида железа с компактным алюминием корпуса МКС происходит накопление ионов железа, завершающееся выделением железа в свободном состоянии и появление ферромагнитных частиц, что было обнаружено на

поверхности фторопласта. Хлорид ионы мигрируют через оксидную пленку к металлу, прежде всего по дефектным местам, увеличивая скорость коррозии и микродеструкцию элементов МКС.

В 27 из 46 проб мелкодисперсного осадка выявлены элементы высокого сродства к электрону, в том числе Cl, F, S. Эти элементы не являются постоянными элементами космической пыли, но в газовых выбросах вулканов они всегда присутствуют, составляя до 5 % их общего объема. Установлено, что химические процессы с участием элементов высокого сродства к электрону негативно влияют на герметичность паронитовых уплотнений в конструкциях иллюминаторов.

Количество выявленного магния превышает содержание железа и алюминия не только в пробах фторопластового устройства, которое экспонировалось в течение 3,5 лет, но и в других пробах с поверхности МКС. В результате отбора пробы на гермокорпусе МКС в 2012 году под экранно-вакуумной теплоизоляцией был получен следующий результат уровня содержания элементов (мкг/мл) Mg – 181,55; Al – 39,85; Mn – 2,18. Эти данные свидетельствуют о значительном (в 4,5 раза) пре-

вышении содержания магния в пробе по сравнению с алюминием, например, в составе сплава АМг6: Mg – 6,8 %; Al – 93,68 %; Mn – 0,8 % [7].

Известно, что концентрация магния в морских и океанских аэрозолях может варьироваться от нескольких единиц до нескольких десятков или даже сотен микрограммов на кубический метр воздуха, и магний является одним из основных компонентов аэрозолей морского происхождения, достигающих высоты орбиты по глобальной электрической цепи [1]. Динамическое равновесие экзосферы Земли достигается непрерывным потоком аэрозолей по глобальной электрической цепи с Земли и непрерывно движущимися в околоземном пространстве потоками частиц кометных хвостов и космической пыли, возникающей в результате столкновений комет, астероидов и других тел в Солнечной системе.

Космическая пыль состоит из мелких частиц твёрдого вещества, состоящих из двухатомных окислов MgO, SiO, CaO, FeO. Магний почти полностью находится в твердой фазе (в составе пылевых частиц), а не в газовой. Соотношение изотопов магния-26 (Mg) и обычного магния-24 (Mg) в метеоритах позволяет датировать их формирование [4, 5, 6]. Изотоп ^{26}Mg является продуктом распада радиоактивного алюминия- ^{26}Al , который присутствовал в ранней Солнечной системе. Его период полураспада составляет 717 тысяч лет. В железных метеоритах этого изотопа по сравнению с обычным магнием много, а в хондритах его практически нет. Это говорит о том, что хондриты возникли несколько позже, когда алюминия-26 в породах уже было совсем мало. По оценкам, это произошло примерно через два-три миллиона лет после возникновения Солнечной системы. Таким образом, хондриты — метеориты второго поколения. Содержание в частицах метеорного происхождения типа хондритов составляет в среднем: O (33,24 %), Fe (27,24), Si (17,19), Mg (14,29), S (1,93), Ni (1,64), Ca (1,27), Al (1,22), Na (0,64), Cr (0,29), Mn (0,25), P (0,11), K (0,08 %).

Железо является одним из самых распространенных элементов во Вселенной после легких элементов, таких как водород, углерод и кислород. Железо чаще всего находится в газообразной форме в звездах, таких как

Солнце, и в конденсированной форме на планетах, в составе микрометеоритов. Астрофизики обнаруживают только низкие уровни железа газообразного типа [4, 5, 6]. Это подразумевает, что оно существует и в твердой форме или молекулярном состоянии, однако идентификация остается пока неразрешенной и изучаемой в течение десятилетий задач. Рабочая гипотеза предполагает, что межзвездное железо соединилось с молекулами углерода и образовало молекулярные цепи, называемые псевдокарбинами железа. Спектры этих цепочек идентичны гораздо более распространенным цепочкам углеродных молекул, пребывание которых в межзвездном пространстве давно известно [6].

В эксперименте «Тест» выявлены частицы железа на поверхности МКС в составе мелкодисперсного осадка из космического пространства, который предположительно попал на поверхность в результате взаимодействия с электрическими полями станции:

1. Электрические поля на поверхностях космических аппаратов (КА) образуются из-за накопления на них заряженных частиц, таких как электроны и ионы из окружающей плазмы. Если поверхности КА покрыты диэлектрическими материалами (например, терморегулирующими красками, фторопластом), они могут накапливать заряд, образуя электрическую емкость с металлическим корпусом КА. Электроны и ионы из околоземной плазмы могут попадать на поверхность КА и накапливаться на ней, особенно на непроводящих материалах (рис. 3).



Рис. 3. Хлопчатобумажный сверток ткани, закреплённый на окрашенной внешней поверхности служебного модуля РС МКС

2. Источники питания, солнечные батареи, приборы и двигатели создают электрические поля.

3. Изменения в околоземной плазме, например, при прохождении через области с разной плотностью частиц, могут вызывать заметные колебания электрического потенциала поверхности и, как следствие, изменение электрических полей [4].

4. Механизмы создания электрических полей и токов на поверхности космического аппарата при столкновении с микрочастицами:

4.1. Микрочастица под воздействием УФ-излучения Солнца заряжается положительно вследствие фотоэффекта, т. е. эмиссии электронов в результате поглощения УФ квантов. Заряд частицы может достигать порядка тысячи зарядов электрона. По металлической поверхности протекают токи, индуцированные отрицательным электрическим зарядом. При контакте частицы с поверхностью заряд частицы переходит в металл и далее происходит размывание этого пространственного заряда.

4.2. При столкновении микрочастицы с поверхностью космического аппарата происходит сжатие среды, что вызывает появление электрического тока и сопутствующей ЭДС. Плотность возникающего тока может достигать $10\text{--}1000\text{ мА/см}^2$. Эти токи возникают в объеме металла и диэлектрика, могут протекать и по противоположной стороне металла. Таким образом, удары частиц по поверхности КА приводят к созданию поверхностных токов и электрических полей.

В результате проведенных на МКС экспериментов по программе «Тест» и анализа осадка сформировано представление о среде функционирования орбитальных объектов, в том числе, наличие в среде околообъектового пространства элементов агрессивных элементов: атомарного кислорода, элементов высокого сродства к электрону (сера, фтор, хлор) и других элементов вулканических газов, достигающих орбиты, и космических источников поступления. Данные о составе непрерывно поступающего мелкодисперсного осадка на поверхность орбитальных объектов позволит уточнить требования к качеству поверхности КА по материалам, покрытиям и защитным элементам.

Заключение

Результаты исследования состава мелкодисперсного осадка на поверхности МКС продемонстрировали реальные пути получе-

ния новых данных об экзосфере Земли и космического пространства. Поверхность МКС является уникальным накопителем кометного вещества в естественном виде и единственным легко доступным для его регулярного сбора. Частицы кометного вещества, выброшенные в межпланетное пространство из ядра кометы (хвост кометы), сгорают на высоте $80\text{--}100\text{ км}$ над Землей. С помощью МКС ученые могут регулярно получать фактический материал для исследования кометного вещества, адсорбированного поверхностью МКС, и, как показано в КЭ «Тест», доставляемого в естественном состоянии на Землю. Анализ мелкодисперсного осадка с поверхности орбитальных станций является источником информации о состоянии молекул железа в космическом пространстве, а также магния в экзосфере Земли, и по результатам изотопного анализа установить источники осадка на поверхности орбитального объекта. Космический мусор и многотысячные орбитальные группировки являются сборщиками и носителями на своей поверхности биообъектов, агрессивных химических элементов и радиоактивных частиц, которые могут вызывать деstrukцию материалов станции, а также могут быть новыми потенциально опасными факторами, сопровождающие возвращение орбитальных объектов на Землю.

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. Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E., Tsygankov O. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 189. P. 278–282.
3. Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 14–19.
4. Баранов Д. Г., Гагарин Ю. Ф., Дергачев В. А., Ныммик Р. А., Якубовский Е. А. / Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 6. С. 832–834.
5. Баранов Д. Г., Гагарин Ю. Ф., Дергачев В. А., Ныммик Р. А., Панасюк М. И. / Космические исследования. 2011. Т. 49. № 6. С. 1–8.
6. Печерский Д. М., Кандинов М. Н., Марков Г. П., Пляшкевич А. А., Цельмович В. А., Шаронова З. В. / Геомагнетизм и аэронавигация. 1975. Т. 15. № 2. С. 166–185.
7. Цыганков О. С., Гребенникова Т. В., Дешевая Е. А., Морозова М. А., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А., Сыроешкин А. В., Шубралова Е. В., Шувалов В. А. / Космическая техника и технологии. 2015. № 1 (8). С. 31–41.

Analysis of the composition and sources of deposition on the ISS surface

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 9.12.2025; revised 23.01.2026; accepted 27.04.2026

The fine deposition delivered from the surface of the International Space Station (ISS), particles of cosmic dust, particles of meteoroid, volcanic and marine origin, enriched with organic matter. These particles are present in the Earth's exosphere and, under conditions of corpuscular, X-ray and ultraviolet irradiation, are an aggressive agent for the surface materials of orbital stations. An analysis of the elemental composition of deposition on the ISS surface made it possible to assess the effect of the detected elements on the stability of the structural materials of the orbiting objects, as well as to identify the sources of their entry onto the ISS surface.

Keywords: international space station, fine deposition, exosphere.

REFERENCES

1. 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].
2. Zinicoscaia 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).
3. Vasilyak L. M., Shubralova E. V., and Chikirev V. N., Applied Physics, № 6, 14–19 (2024) [in Russian].
4. Baranov D. G., Gagarin Yu. F., Dergachev V. A., Nymnik R. A., and Yakubovsky E. A., News of the Russian Academy of Sciences. Physical series **69** (6), 832–834 (2005).
5. Baranov D. G., Gagarin Yu. F., Dergachev V. A., Nymnik R. A., and Panasyuk M. I., Space research **49** (6), 1–8 (2011).
6. Pechersky D. M., Kandinov M. N., Markov G. P., Plyashkevich A. A., Tseltovich V. A., and Sharonova Z. V., Geomagnetism and aeronomy **15** (2), 166–185 (1975).
7. Tsygankov O. S., Grebennikova T. V., Deshevaya E. A., Morozova M. A., Novikova N. D., Polikarpov N. A., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., and Shuvalov V. A., Space equipment and technology, № 1 (8), 31–41 (2015) [in Russian].

Об авторах

Васильяк 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 0000-0001-6982-3038, 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 537.862
EDN: LCKRFO

PACS: 41.20.Gz

**Обнаружение потенциального электрического поля,
индуцированного тороидом с низкочастотным током**© А. К. Томили^{1*}, И. Мисюченко², В. С. Викулин³¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),
г. Томск, 634050 Россия

* E-mail: aktomilin@gmail.com

² АО «Русский алюминий менеджмент», Москва, 121096 Россия³ Компания «Макрогрупп», Санкт-Петербург, 196105 РоссияСтатья поступила в редакцию 1.09.2025; после доработки 23.09.2025; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13

Представлены результаты экспериментов по прямому измерению электрического поля в отверстии тороида с переменным током частотой 50 Гц. В первом эксперименте использован экранированный зарядочувствительный датчик в виде металлического стержня. При этом обнаружено, что в случае традиционного одноточечного заземления экран не является эквипотенциальным и полностью блокирует работу датчика. Принудительная эквипотенциальность экрана выполнена с помощью двухточечного заземления, при этом датчик внутри экрана успешно регистрирует переменное электрическое поле. Результат эксперимента объясняется присутствием на оси тороида нестационарного безвихревого вектор-потенциала, который оказывает силовое воздействие на свободные электроны в металлическом зонде. Во втором эксперименте использован ползунковый реостат. Такая схема позволяет отказаться от заземленного экрана и эксперимент максимально упрощается. Выводы, полученные в результате экспериментов, дополняют представление о векторном потенциале и его свойствах и могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: обобщенная электродинамика, векторный потенциал, магнитное поле тороида, эффект Ааронова-Бома, электромагнитная совместимость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-13-18

Введение

Тороидальные трансформаторы часто применяются в электротехнических и радиоэлектронных приборах. При этом возникает проблема электромагнитной совместимости приборов и аппаратуры, требующая детального исследования генерируемых электрических и магнитных полей.

В статье [1] описан эксперимент с тороидальным соленоидом (тороидом), по которому попускается ток частотой 50 Гц. Обмотка тороида заключена в сплошной заземленный экран. В результате электрометрическим ме-

тодом на оси внутреннего отверстия тороида (за пределами экранированной области) обнаружено и измерено потенциальное электрическое поле. Показано, что этот эффект не связан с электромагнитными полями рассеяния. Его происхождение объясняется полем нестационарного вектор-потенциала $\mathbf{A}(t)$. Обсуждается вопрос соответствия поля вектора $\mathbf{A}$ теореме Гельмгольца о разложении на соленоидальную $\mathbf{A}_s$ и потенциальную $\mathbf{A}_p$ компоненты:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_p. \quad (1)$$

Компонента A_p обычно исключается калибровками Кулона или Лоренца. Однако, как оказалось, она обладает определенным физическим содержанием и парадоксальными свойствами. Это совпадает с заключением, сделанным в статье [2]: «...векторный потенциал важнее электрических и магнитных полей. Поля векторного потенциала могут бесконтактным образом генерировать электрические поля через проводящие вещества». Аналогичный вывод сделан в статье [3]. Свойства поля вектора A_p исследованы также в работах, сведения о которых систематизированы в монографиях [4, 5].

Цель настоящего исследования заключается в прямом экспериментальном измерении двумя способами потенциального электрического поля в отверстии тороида с переменным током и вне его, а также в теоретическом объяснении результатов эксперимента.

Заметим, что способы измерения электрического поля в настоящей работе отличаются от способа, использованного в статье [1]. Сравнение результатов, полученных различными методами, позволяет сделать заключение об их достоверности.

Эксперимент по измерению потенциального электрического поля зарядочувствительным датчиком

На рис. 1 представлена схема эксперимента по измерению электрического поля во внутреннем отверстии тороидального соленоида, по которому пропускается переменный ток частотой 50 Гц. Основой соленоида служит полый цилиндр, представляющий собой наборный стальной сердечник с относительной магнитной проницаемостью 11000. Датчик квазистатического электрического поля представляет собой проводящий стальной стержень сопротивлением 0,1 Ом, соединённый с усилителем заряда. Сигнал такого датчика не зависит от емкости соединительных кабелей, а только от его собственной емкости и величины действующего на него поля.

Схема данного эксперимента принципиально отличается от описанного в [1]: здесь тороид не экранирован, а экранируется датчик. Экран изготовлен из поливинилхлорид-

ной трубки с внутренним диаметром 50 мм, на наружную поверхность которой нанесен электропроводный слой графитовым лаком толщиной 20 мкм. Между датчиком и экранирующей поверхностью имеется воздушная прослойка толщиной 20 мм. Если поле вектора A_p способно проникать через электропроводную поверхность, то результаты экспериментов с различными типами экранов не должны различаться.

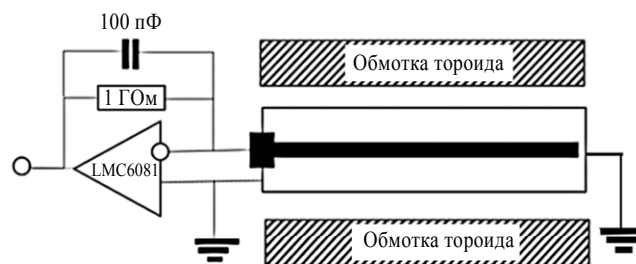


Рис. 1. Схема эксперимента с зарядочувствительным датчиком

Вначале был проведен эксперимент с заземлением экрана в одной точке. Он показал полное отсутствие сигнала датчика. При анализе причин такого результата были проведены замеры разности потенциалов между дистальным и проксимальным торцами электростатического экрана. Обнаружено, что она составляет 780 мВ. Следовательно, такой экран не является эквипотенциальным. Требуется «привести его к эквипотенциальности». Для этого необходимо заземлить экран с двух торцов, как показано на рис. 1. Однако при двух точках заземления неэквипотенциальной металлической оболочки в ней будут течь переменные токи. Чтобы они не создавали помех измерениям, необходимо их минимизировать. Для этого необходимо сделать экран достаточно высокоомным (например, десятки килоом), тогда протекающие в нем токи будут ничтожно малы, что позволит не учитывать их индукцию на датчик.

В использованной установке высота тороида составляла $h = 0,085$ м, действующее (измеренное) значение ЭДС на оси тороида $\bar{\varepsilon} = 780$ мВ, что соответствует ожидаемому действующему значению напряжённости электрического поля:

$$\bar{E} = \frac{\bar{\varepsilon}}{h} = 9,17 \text{ В/м}.$$

Произведена калибровка зонда вместе с усилителем заряда (УЗ) путем включения вольтметра в цепь заземления. Определен коэффициент передачи как отношение фактически измеренного напряжения на выходе УЗ к напряжению, поданному на торцы экрана: $K = 0,03$. При подаче на обмотку тороида напряжения 220 В с частотой 50 Гц датчик с эквипотенциальным экраном и УЗ регистрирует действующее напряжение $\bar{U} = \bar{\varepsilon} = 0,235$ В. С учётом коэффициента передачи это соответствует напряжённости электрического поля $\bar{E}_x = 9,17$ В/м. При изменении напряжения, подаваемого на тороид с помощью ЛАТР, была установлена линейная зависимость между входным напряжением и выходным сигналом.

Датчик, расположенный снаружи тороида, электрического поля не регистрирует, что согласуется с многочисленными измерениями с использованием замкнутых контуров, целиком расположенных вне отверстия.

Эксперимент с использованием ползункового реостата

Весьма желательно измерить электрическое поле максимально простыми техническими средствами, избегая различного рода помех и шумов. Для достижения этой цели был использован ползунковый реостат с сопротивлением 10 кОм и длиной, почти точно совпадающей с высотой тороида. В этом эксперименте использовался тот же тороид, что и в первом эксперименте. Точка контакта В с резистивным слоем изменяется по мере перемещения ползунка (рис. 2).

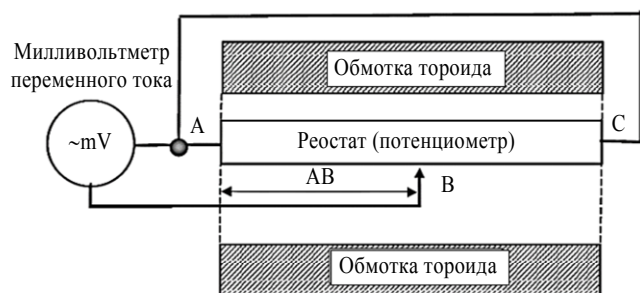


Рис. 2. Схема эксперимента с реостатом

Если обеспечить эквипотенциальность реостата путём замыкания его контактов А и С низкоомным проводником, то даже в условиях

действия индукции на резистивный слой реостата потенциал во всём слое от А до С будет одинаковым. Назовём такое техническое решение «эквипотенциальным реостатом». Ползунок В замкнут на точку А через милливольтметр переменного тока. Часть проводника, идущего от точки В к вольтметру, расположена внутри тороида. Она играет роль зарядочувствительного зонда, как и в первом эксперименте. В этой части проводника длиной $AB = x$ индуцируется ЭДС, которую тестирует прибор. По мере перемещения ползунка реостата изменяется x и, соответственно, изменяется измеряемое действующее напряжение (ЭДС индукции), возникающее на этом участке. В эксперименте использовался реостат с известной нелинейной характеристикой сопротивления $R(x)$. Напряженность электрического поля E на оси тороида, рассчитанная по формуле

$$E(x) = \frac{U(x)}{l_0} \frac{R_0}{R(x)}$$

оказалась практически постоянной и равной 13 В/м. Здесь l_0 и R_0 – соответственно, длина и максимальное сопротивление реостата, $U(x)$ – измеряемое напряжение. В результате получен линейный график зависимости ЭДС индукции от положения ползунка реостата (рис. 3).

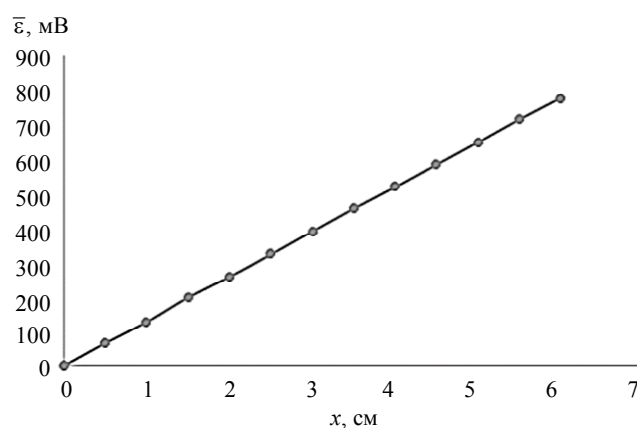


Рис. 3. Зависимость измеряемого ЭДС от длины участка $AB = x$

Таким образом, оба эксперимента фиксируют присутствие потенциального электрического поля на оси тороида, по обмотке которого течет переменный ток.

Теория

Прежде всего следует ответить на вопрос о происхождении потенциального электрического поля на оси тороида. Это явление невозможно объяснить полями рассеяния вокруг тороида: при частоте 50 Гц длина излучаемых электромагнитных волн более 6000 километров, следовательно, в пределах тороида не может возникнуть заметная разность потенциалов. Очевидно, что причина связана с нестационарным полем векторного потенциала, так как:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (3)$$

ЭДС индукции на оси x тороида «от торца до торца» определяется по формуле:

$$\varepsilon = \int_0^h E_x dx = - \int_0^h \frac{\partial A_x}{\partial t} dx = - \frac{\partial A_x}{\partial t} h. \quad (4)$$

Заметим, что здесь используется проекция A_x потенциального вектора $\mathbf{A}_p$ на ось тороида и учтено, что нестационарное поле $E_x(t)$, как следует из экспериментов, является однородным. При этом свободные электроны с зарядом q движутся в металлическом зонде под действием силы:

$$F_x = qE_x.$$

Поскольку выходное напряжение УЗ пропорционально силе F_x , то эксперимент доказывает силовое действие нестационарного векторного потенциала $\mathbf{A}_p$ на заряды. Этот вывод позволяет объяснить известный эффект Ааронова-Бома [6–11], но без квантовых представлений, которые часто для этого используются.

При синусоидальном законе переменного тока в тороиде с частотой f векторный потенциал изменяется по закону:

$$A_x = A_{x(\max)} \cos(2\pi ft). \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$A_x = \frac{\varepsilon}{2\pi fh} \sin(2\pi ft),$$

затем можно вычислить амплитуду потенциальной компоненты вектора $\mathbf{A}$ на оси тороида:

$$A_{x(\max)} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\sqrt{2}\pi fh} = 0,0106 \text{ Тл} \cdot \text{м}.$$

Здесь учтено, что $\varepsilon = \bar{\varepsilon}\sqrt{2}$.

В монографии [4] изложена концепция обобщенной электродинамики, базирующаяся на представлении о четырехмерном векторе (кватернионе) магнитного поля $(\mathbf{B}, B^*)$. Такое представление соответствует теореме Гельмгольца о разложении поля на соленоидальную и потенциальную компоненты. Потенциальная компонента магнитного поля определяется скалярной функцией $B^*(x, y, z, t)$ и связана с вектор-потенциалом $\mathbf{A}$:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -B^*. \quad (6)$$

Понятно, что здесь $\mathbf{A} = \mathbf{A}_p$.

Скалярное магнитное поле (СМП) индуцирует, в частности, тороидальный соленоид (рис. 4). В идеальном случае вихревое (соленоидальное) и потенциальное (скалярное) магнитные поля тороида позиционно разделены: вихревое магнитное поле сосредоточено внутри его обмотки, а потенциальное – вдоль оси во внутреннем отверстии и изображено двумя областями с разными знаками. В области отрицательного СМП располагаются источники потенциального вектора $\mathbf{A}_p$, а в положительной – стоки.

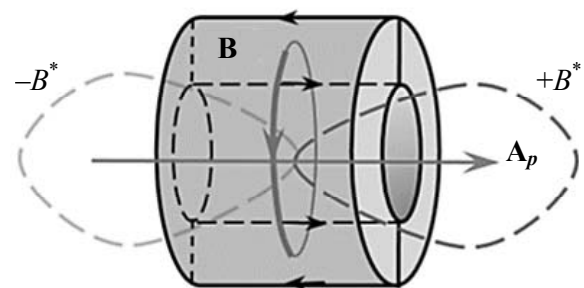


Рис. 4. Магнитное поле тороидального соленоида

В [3] приведена система дифференциальных уравнений обобщенной электродинамики (расширенные уравнения Максвелла). Одно из уравнений выражает закон безвихревой электромагнитной индукции:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial B^*}{\partial t}, \quad (7)$$

из которого следует, что нестационарное СМП с индукцией B^* генерирует потенциальное электрическое поле напряженностью $\mathbf{E}$. Заметим, что из уравнения (7) с учетом (6) вытекает формула (3). В этой же монографии приведены результаты нескольких экспериментов, подтверждающих явление безвихревой электромагнитной индукции. Эксперимент, описанный в настоящей статье, также подтверждает это явление.

Заключение

Сформулируем полученные результаты:

1. В первом эксперименте с помощью зарядочувствительного датчика зарегистрировано потенциальное электрическое поле в отверстии тороида с переменным током. Показано, что в подобных экспериментах необходимо добиваться эквипотенциальности электростатического экрана.

2. Подтвержден феномен проникновения поля безвихревого векторного потенциала сквозь эквипотенциальный электростатический экран, что важно учитывать в задачах электромагнитной совместимости.

3. Установлено, что в нестационарном поле безвихревого векторного потенциала заряженные частицы испытывают силовое воздействие. Этот результат следует иметь в виду при интерпретации эффекта Ааронова-Бома.

4. Во втором эксперименте реализована простейшая схема с потенциометром, не требующая заземления. Ее достоинство в доступности репликации эксперимента с целью проверки описанного феномена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томилин А. К., Мисюченко И., Викулин В. С. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 5–11. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-5-5-11>
2. Lekchaum S., Daibo M. / IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Vol. 30. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970918>
3. Апелъцин В. Ф., Полемаев А. И. / Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/955.html>
4. Томилин А. К. Обобщенная электродинамика. – М.: Триумф, 2020. <https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04>
5. Zohuri B. Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. – Springer, 2019. P. 443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91023-9_6
6. Aharonov Y., Bohm D. / Physical Review. 1959. Vol. 115. P. 485–491.
7. Peshkin M., Tonomura A. The Aharonov-Bohm Effekt. – Berlin; Heideberg; New York; London; Tokio; Hong Kong; Springer-Verlag, 1989.
8. Tonomura A. The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang – World Scientific, Singapore, 1998.
9. Лошак Ж. / Прикладная физика. 2003. № 2. С. 5–11.
10. Афанасьев Г. Н. / Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1990. Т. 21. Вып. 1. С. 172–250.
11. Зубков М. А., Поликанов М. И. / Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 23. № 57. С. 461.

PACS: 41.20.Gz

Detection of potential electric field induced by a toroid with low frequency current

A. K. Tomilin^{1*}, I. Misyuchenko², and V. S. Vikulin³

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

² JSC "Russian Aluminum Management", Moscow, 121096 Russia

³ Macrogroupp company, St. Petersburg, 196105 Russia

*E-mail: aktomilin@gmail.com

Recived 1.09.2025; revised 23.09.2025; accepted 27.04.2026

The article presents the results of experiments on direct measurement of the electric field in the toroid hole with alternating current of 50 Hz. In the first experiment, a shielded charge-sensitive sensor in the form of a metal rod was used. It was found that in the case of traditional single-point grounding, the screen is not equipotential and completely blocks the sensor opera-

tion. Forced equipotentiality of the screen is achieved using two-point grounding, and the sensor inside the screen successfully records the alternating electric field. The result of the experiment is explained by the presence of a non-stationary vortex-free vector potential on the toroid axis, which exerts a force effect on free electrons in the metal probe. In the second experiment, a slider rheostat was used. Such a scheme allows us to abandon the grounded screen and the experiment is simplified as much as possible. The conclusions obtained as a result of the experiments complement the idea of the vector potential and its properties and can be used in solving problems of electromagnetic compatibility.

Keywords: generalized electrodynamics, vector potential, magnetic field of a toroid, Aharonov-Bohm effect, electromagnetic compatibility.

REFERENCES

1. Tomilin A. K., Misyuchenko I., and Vikulin V. S., Applied Physics, № 5, 5–11 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-5-5-11>
2. Lekchaum S. and Daibo M., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **30** (4), 1 (2020). <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2970918>
3. Apel'tsin V. F. and Poletaev A. I., Engineering Journal: Science and Innovations, № 9, (2013). URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technical/955.html>
4. Tomilin A. K. Generalized Electrodynamics. Moscow: Triumph, 2020 [in Russian]. <https://doi.org/10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04>
5. Zohuri B. Scalar Waves. In book: Scalar Wave Driven Energy Applications. Springer: 2019, pp. 443. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91023-9_6
6. Aharonov Y. and Bohm D., Physical Review **115**, 485–491 (1959).
7. Peshkin M. and Tonomura A. The Aharonov-Bohm Effekt. Berlin; Heideberg; New York; London; Tokyo; Hong Kong; Springer-Verlag, 1989.
8. Tonomura A. The Quantum World Unveiled by Electron Waves, with a Preface of Chen Ning Yang. World Scientific, Singapore, 1998.
9. Loshak Zh., Applied Physics, № 2, 5–11 (2003) [in Russian].
10. Afanasyev G. N., Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei **21** (1), 172–250 (1990) [in Russian].
11. Zubkov M. A. and Polikanov M. I., Letters to JETP **23** (57), 461 (1993) [in Russian].

Об авторах

Томилин Александр Константинович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40). E-mail: aktomilin@gmail.com SPIN-код: 6546-3766, AuthorID: 452939

Мисюченко Игорис, к.т.н., начальник инновационного отдела, АО «Русский алюминий менеджмент» (121096, Россия, Москва, ул. Василисы Кожинной, д. 1). E-mail: ruberoid2101@gmail.com

Викулин Владимир Станиславович, инженер, Компания «Макрогрупп» (196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Свеаборгская, д. 12А). E-mail: v_vikulin@mail.ru

УДК 621
EDN: LNYBJQ

PACS: 85.60.–g

Получение чернил из коллоидных нанокристаллов AgInS_2 и микроплоттерная печать фоточувствительных структур на их основе

© И. А. Шуклов*, В. В. Лим, И. С. Власов, М. А. Троянова, А. Ю. Шалагин,
О. В. Вершинина, В. О. Яковлев, В. С. Попов, В. В. Иванов

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

* E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Статья поступила в редакцию 10.12.2025; после доработки 14.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Впервые на основе коллоидных нанокристаллов AgInS_2 с помощью замены лигандов в растворе были получены чернила, пригодные для изготовления фоточувствительных структур. В рамках исследования была подобрана система стабилизирующих лигандов, с которыми полученный золь в диметилформамиде сохранял стабильность в течении двух недель без существенной агломерации. ИК-Фурье спектроскопия подтвердила полноту замены лигандов. С помощью микроплоттера на основе полученных коллоидных материалов на золотых встречно-штыревых электродах была получена фоточувствительная структура фоторезистивного типа, для которой измерены фотоэлектрические характеристики при засвечивании лазером 405 нм.

Ключевые слова: серебра индия сульфид, высокотемпературный коллоидный синтез, нанокристаллы, квантовые точки, тонкие пленки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-19-27

Введение

Коллоидные квантовые точки представляют собой новый класс наноматериалов с возможностью модификации оптических свойств посредством модификации размеров полупроводниковых наночастиц [1, 2]. Синтез коллоидных нанокристаллов, как правило, осуществляется методом высокотемпературного коллоидного синтеза с использованием длинноцепочечных сурфактантов, которые выступают в качестве лигандов и стабилизаторов образующихся наночастиц. Эти органические лиганды позволяют получить нанокристаллы с узким распределением по размерам и малодефектной поверхностью. Кроме того, они обеспечивают длительную седиментационную стабильность получаемых золь. К сожалению, эти же длинноцепочечные лиганды выступают в качестве изоляторов и не позво-

ляют получить тонкие слои коллоидных нанокристаллов с хорошей проводимостью. Поэтому для создания тонких фоточувствительных проводящих пленок на основе ККТ, как правило, используется метод послойного нанесения с послойной заменой лигандов. Замена длинноцепочечных лигандов на короткоцепочечные уже в пленках позволяет обеспечить проводимость с сохранением индивидуальности наносимых наночастиц. Таким образом, могут быть получены как фоторезисторы, так и более сложные многослойные структуры типа фотодиодов. Слабым местом данного метода является сложность получения относительно толстых пленок, т. к. скорость замены лигандов в пленке стремительно падает с ростом толщины пленок. Также многие реакции замены в процессе гетерофазной реакции не позволяют получить высокий процент замены исходных лигандов даже в тон-

ких пленках толщиной в монослой нанокристаллов, т. е. 5–10 нм [3, 4]. В последние годы в качестве альтернативного подхода для получения проводящих пленок на основе коллоидных нанокристаллов предлагается замена длинноцепочечных лигандов еще в растворе с получением относительно стабильных коллоидных растворов нанокристаллов с короткоцепочечными лигандами [5]. В этих коллоидах, как правило, седиментационная стабильность обеспечивается электростатической стабилизацией [6]. Коллоидные растворы подобного типа позволяют создавать тонкие пленки, обладающие фоточувствительностью и проводимостью напрямую, без дополнительного проведения замены лигандов в пленках. Нанесение может осуществляться спин-коатингом, либо методами аэрозольной печати. С точки зрения получения фоточувствительных структур печать является наиболее привлекательным методом, так как она позволяет уменьшить расход наноматериала и наносить его прицельно на выбранные места [7].

Мониторы и телевизоры, изготовленные по технологии QLED, сегодня широко представлены в сетевых супермаркетах электроники. Квантовые коллоидные точки (ККТ) CdSe, используемые в технологии QLED в качестве люминофорных материалов, синтезируются по хорошо отработанным и воспроизводимым методикам. Однако, несмотря на технологические преимущества, данная система имеет серьезный недостаток – экологическую проблематичность соединений кадмия. Использование кадмия не только создаёт дополнительные требования к производственной безопасности, но и повышает риск загрязнения окружающей среды при повреждении, утилизации или неправильной переработке устройств, содержащих такие люминофоры. Именно этот фактор является одним из важных сдерживающих факторов для распространения солнечных батарей на основе нанокристаллов халькогенидов кадмия. Эти экологические ограничения стимулируют поиск альтернативных материалов и развитие более безопасных технологий [8, 9].

Коллоидные нанокристаллы тройных халькогенидов типа ABX_2 представляют собой перспективный класс полупроводниковых наноматериалов для приложений в солнечных батареях, гибких дисплеях и фотосенсорах

[10]. $AgInS_2$ обладает шириной запрещенной зоны, оцениваемой в 1,87 эВ, для объемного материала и радиусом экситона Бора 5,5 нм. Таким образом, как наноматериал он представляет интерес как возможная альтернатива CdSe.

Проводящие тонкие пленки на основе нанокристаллов $AgInS_2$ получали рядом методов, включая метод послойного нанесения с заменой на меркаптопропионовую кислоту [11]. Прямые методы нанесения зольей $AgInS_2$ слабо исследованы и мало пригодны для создания фоточувствительных структур. Ранее опубликованное исследование с созданием ячейки солнечной батареи на основании коллоидного раствора $AgInS_2$, обозначенном авторами как чернила, включает также прогрев полученных пленок при 450 °C в атмосфере элементарной серы [12]. К тому же, в качестве метода нанесения был использован дроп-кастинг, а не какой либо тип печати. Недавно опубликовано создание чернил на основе нанокристаллов $AgInS_2$ с оболочкой ZnS для создания люминесцентных меток [13]. Данная система содержит стабилизирующие длинноцепочечные лиганды, а также полиметилметакрилат, что исключает применения в создании сенсорных или фоточувствительных структур.

В литературе на данный момент нам не удалось найти примеров получения чернил, т. е. зольей коллоидных квантовых точек $AgInS_2$ с лигандами, позволяющими создавать тонкие пленки с хорошей проводимостью. Подобные «чернила» разработаны для ряда нанокристаллов бинарных халькогенидов, таких как PbS [14, 15], CdSe [16], PbSe [17] и HgTe [18]. В рамках представленной работы впервые была найдена система, пригодная для получения «чернил» на основе $AgInS_2$, а также были изготовлены фоточувствительные элементы резистивного типа с помощью микроплоттера.

Материалы и методы

Реактивы

Следующие химикаты были использованы в синтезе ККТ $AgInS_2$ без дополнительной очистки: йодид индия (99 %, Ланхит), сера (99,99999 %, реакхим), децен-1 (90 %, Вектон), додекантиол-1 (Acros, 99 %), меркаптоэтанол

(95 %, Вектон), *n*-бутиламин (95 %, Вектон), нитрат серебра (хч, Вектон), гексан (99 % HPLC grade, MacronFineChemicals), декан (осч, компонент-реактив), олеиновая кислота (90 %, Вектон), олеиламин (80–90 %, Acros), который был высушен нагревом (100 °С) при пониженном давлении (1 мбар). Стеарат индия был получен по литературной методике из металлического индия [19]. Стеарат серебра был получен из нитрата серебра [20].

Методы измерений

Для исследования размеров, морфологии и структуры наночастиц использовался просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100 производства компании JEOL (Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ. Анализ кристаллической структуры проводился путем сопоставления межплоскостных расстояний, измеренных по полученным SAED-изображениям, со значениями из базы данных для кристаллических структур. Оптические свойства оценивались методами спектрофотометрии с помощью спектрофотометра (JASCO V-770, JASCO) и методом спектрометрии на ИК Фурье спектрометре (Spectrum 100, PerkinElmer) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО), оснащённой призмами из Ge и ZnSe (угол падения 45°, число отражений 25), источник-измеритель Keithley 4200A-SCS, лазер 405 нм. С помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT Solver-PRO в полуконтактном режиме была исследована морфология поверхности тонких пленок.

Получение прекурсора серы

15,625 ммоль (0,5 г) элементарной серы растворили в 10 мл децена-1 при температуре 185 °С и повышенном давлении в завинчивающейся толстостенной пробирке в течение 1 часа. Полученный темно-желтый раствор использовался в качестве прекурсора серы в синтезе нанокристаллов.

Методика синтеза ККТ AgInS₂

Нитрат серебра (10,2 мг, 0,06 ммоль) и стеарат индия (57,9 мг, 0,06 ммоль) добавили в смесь 0,4 мл олеиновой кислоты, 0,3 мл децена-1 и 3 мл декана. Полученную смесь нагревали в токе аргона при 110 °С до образования гомогенного раствора. Полученный раствор разбавили 27 мл декана и нагрели до

150 °С. Раствор серы в децене-1 (1,56 М, 1,5 мл) впрыскивается при 150 °С. Реакционная смесь приобретает коричневую окраску в течение реакции, температура поддерживается на уровне 150 °С. Через 60 мин колба погружается в ледяную баню. Наночастицы AgInS₂ выделяются при помощи двукратного переосаждения. Выделение и очистка ККТ осуществлялись посредством добавления смеси метанол:изопропанол 1:2 с последующим центрифугированием и редиспергированием в *n*-гексане (1,5 мл спиртовой смеси на 2,5 мл реакционной смеси при первом осаждении, 0,6 мл спиртовой смеси на 1 мл ККТ в *n*-гексане при втором осаждении). Нанокристаллы редиспергировали в *n*-гексане.

Методика изготовления чернил ККТ AgInS₂

Ацетат натрия (8,2 мг, 0,1 ммоль) добавили к раствору иодида индия в диметилформамиде (0,1 М, 2 мл) под аргоном и растворили при перемешивании. В полученный раствор добавили 0,2 мл 2-меркаптоэтанола с образованием гомогенного раствора. Данный раствор смешали с золей ККТ AgInS₂ в *n*-октане, при этом наблюдается граница раздела гидрофильной и гидрофобной фаз. Полученную смесь перемешивали в течение 20 минут, по прошествии которых ККТ AgInS₂ перешли из гидрофобной фазы в гидрофильную. ККТ с гидрофильной лигандной оболочкой выделили центрифугированием смеси в течение 10 минут при 3000 об/мин в виде темного осадка. Образовавшийся мелкокристаллический осадок редиспергировали в 2 мл ДМФ с добавлением 0,2 мл бутиламина. Далее продукт выделяется при помощи однократного переосаждения посредством добавления тетрахлорэтилена (3 мл ТХЭ на 1 мл золя в ДМФ) с последующим центрифугированием и редиспергированием в ДМФ.

Методика изготовления фоторезистора на основе чернил ККТ AgInS₂ методом дроп-кастинга

На предварительно очищенную от резиста с помощью горячего (90 °С) *n*-метилпирролидона и промытую в кипящем изопропанол подложку капнули 50 мкл раствора ККТ AgInS₂ в диметилформамиде. Для более полного испарения ДМФ подложку поместили на плитку при температуре 70 °С.

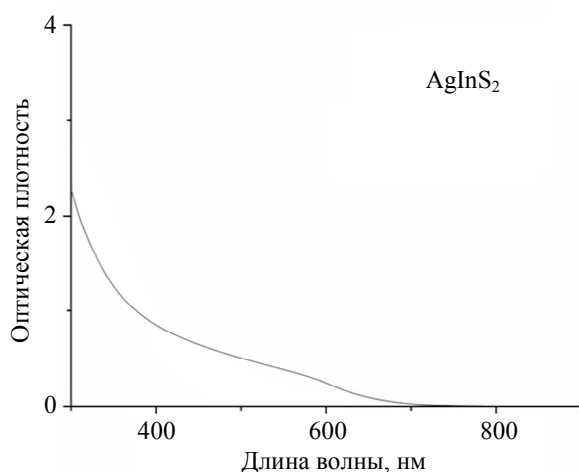
Результаты и обсуждение

В качестве возможных прекурсоров для чернил на основе наночастиц AgInS_2 были выбраны коллоидные нанокристаллы, полученные с прекурсором серы на основе децена-1 [21].

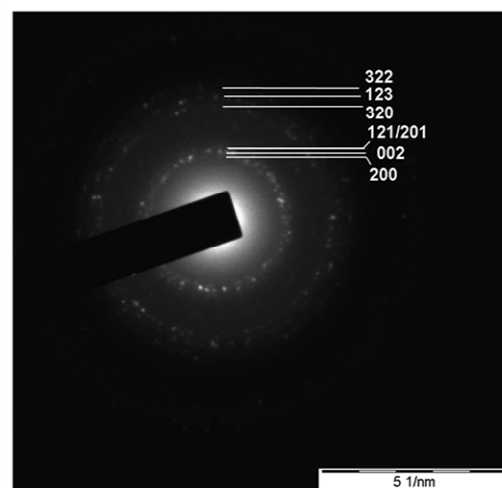
Синтез коллоидных наночастиц AgInS_2 осуществлялся по модифицированной методике, разработанной ранее. Вместо стеарата серебра в качестве прекурсора серебра использовался AgNO_3 [22]. Синтез осуществлялся при 150°C в декане в качестве растворителя. Данная методика позволяет получать нанокристаллы с лигандной оболочкой, состоящей из олеиновой кислоты и олеиламина, что поз-

воляет осуществлять замену исходной оболочки на разные типы короткоцепочечных лигандов. Полученные нанокристаллы обладают кристаллической структурой халькопирита и поглощением в видимом диапазоне (рис. 1). И использованный наноматериал AgInS_2 обладает краем поглощения в 700 нм и максимумом экситонного пика около 580 нм .

Микрофотографии ПЭМ показали, что нанокристаллы обладают формой прямоугольников и прямоугольников с выростами на одной грани и средним размером порядка 16 нм (рис. 2а–б). Анализ гистограмм распределения по размерам показал, что распределение достаточно узкое со среднеквадратичным отклонением равным $3,98$.

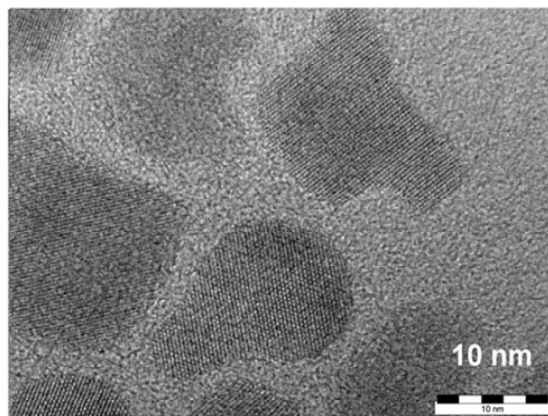


а)

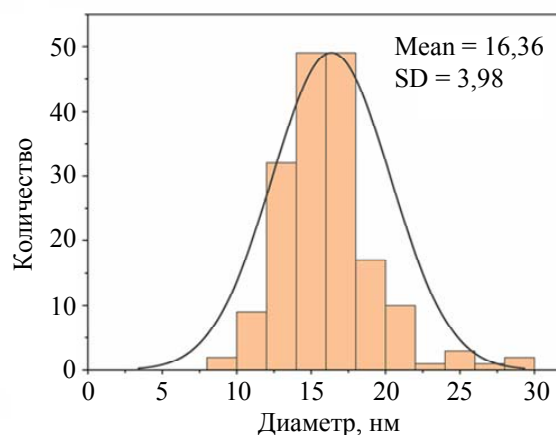


б)

Рис. 1. ККТ AgInS_2 а) Спектр поглощения (видимый диапазон, $300\text{--}700\text{ нм}$); б) SAED-изображение



а)



б)

Рис. 2. а) ПЭМ-изображение и б) распределение по размерам ККТ AgInS_2

Для изготовления чернил из нанокристаллов бинарных халькогенидов таких, как PbS, CdSe или HgTe, обычно проводится замена исходной лигандной оболочки в диметилформамиде на галогенид соответствующего металла и бутиламин. Замещение обычно проводится в двухфазной системе и об эффективности замещения можно судить по перемещению наночастиц из одной фазы в другую с изменением их цвета. Для гидрофобной фазы это изменение окраски с черного на бесцветный и для гидрофильной диметилформамидной с бесцветного на окрашенный.

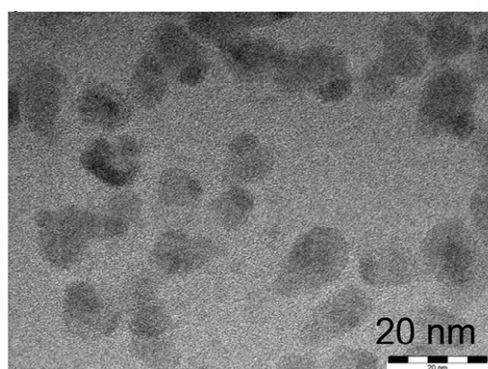
Как уже было упомянуто, изготовление чернил на основе коллоидных нанокристаллов AgInS₂ не описано в литературе. В данном случае по аналогии можно использовать либо галогениды серебра или галогениды индия, либо смесь обоих солей металлов. Первичные опыты показали, что использование галогенидов серебра или смесей с ними для проведения замены затруднительно в силу их крайне низкой растворимости. Таким образом, для оптимизации были выбраны системы на основе галогенидов индия. Замещение исходной лигандной оболочки со сменой фазы наблюдалось при использовании йодида индия для исследованных нанокристаллов с карбоксилатной оболочкой. При этом полученные коллоидные растворы обладали очень низкой стабильностью и практически моментально разрушались с выделением наночастиц AgInS₂, которые было невозможно снова перевести в золь.

Для использования золь нанокристаллов в качестве чернил ключевым фактором является седиментационная стабильность.

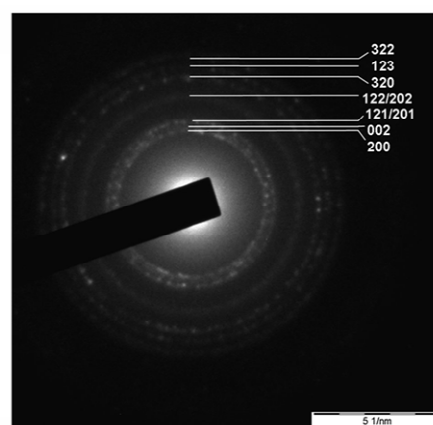
Авторы добились долгосрочной коллоидной стабильности при использовании комбинации бутиламина и меркаптоэтанола на основе нанокристаллов AgInS₂. При этом полученные золи AgInS₂ в ДМФ не разрушались под действием толуола, так как это описано для аналогичных золь, что затрудняло их очистку и выделение. Использование тетрахлорэтилена в качестве высаживающего реагента решило эту проблему.

Исследование с помощью ПЭМ показало, что нанокристаллы после замещения сохраняют размер, близкий к исходному, при этом приобретая более сферическую форму. SAED показал сохранение кристаллической структуры халькопирита AgInS₂. При этом кристалличность образца повышается, кроме того, относительная интенсивность рефлекса от плоскости 122/202 увеличивается.

Сравнительное исследование пленок, получаемых из исходных коллоидных нанокристаллов AgInS₂ и «чернил» AgInS₂ в диметилформамиде, показали, что сигналы исходной оболочки, состоящей из длинноцепочечных карбоксилатных лигандов, исчезают. Так, интенсивность сигналов валентных колебаний метиленовых групп при 2950 см⁻¹ в результате замещения олеата на бутиламин падает в 5 раз, а сигнал карбоксилат-иона при 1585 см⁻¹ полностью исчезает. При этом появляется сигнал карбонильной группы координированного на поверхности нанокристаллов диметилформамида при 1661 см⁻¹. Также в ИК-области появляется широкий пик с максимумом на 4050 см⁻¹, связанный с внутризонным переходом.



а)



б)

Рис. 3. «Чернила» ККТ AgInS₂ а) ПЭМ-изображение и б) SAED

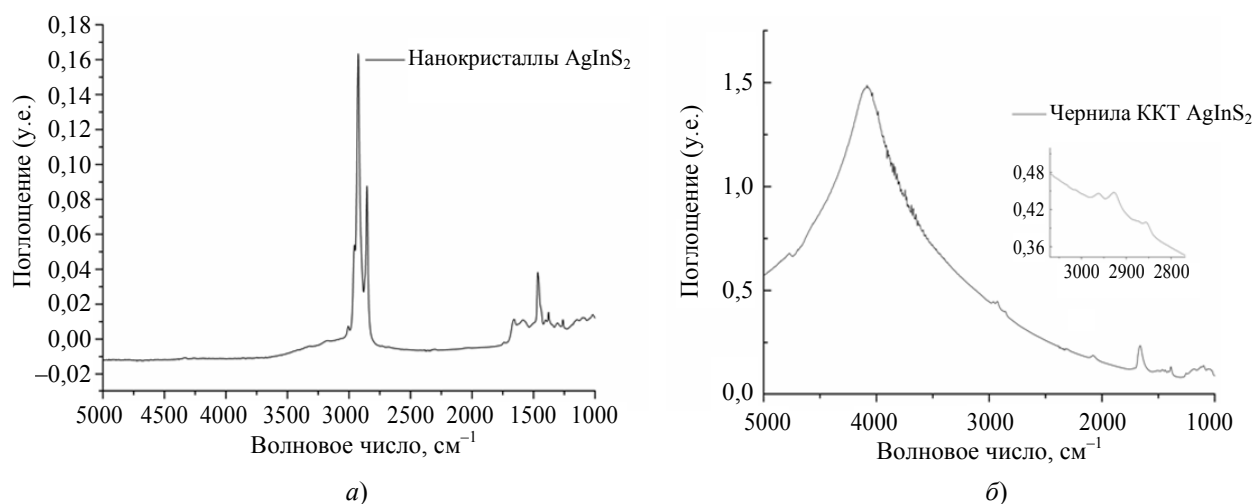


Рис. 4. а) Спектры ИК в диапазоне 5000–1000 см⁻¹; ККТ наночастиц AgInS₂ до замены лигандов в растворе и после замены лигандов

Процесс формирования тонкоплёночных функциональных проводящих микроструктур выполнялся при помощи микроплоттера SonoPlot GIX Microplotter II (SonoPlot, Middleton, USA). Микроплоттер позволяет использовать пиколитры жидкости для осаждения функциональных элементов с плоскостными размерами до 5 мкм. Нанесение происходит с помощью технологии выброса жидкости из сопла, использующей ультразвуковую вибрацию, которая возникает благодаря пьезоэлектрическому элементу. При этом точность позиционирования капилляра достигает 5 мкм. В работе на микроплоттере может быть использован широкий диапазон жидкостей: вязкость функциональных чернил может достигать 450 сП, что в значительной степени превышает подобные характеристики при использовании струйных принтеров, работающих по принципу drop-on-demand. Формирование элементов производилось с использованием чернил на основе ККТ на подложках из оксида кремния с толщиной окисла 260 нм и заранее изготовленными методом литографии золотыми электродами. Было изготовлено два типа подложек со следующими типами электродов: встречно-штыревые с расстоянием между электродами 2, 3 и 5 мкм и «рогатки» с расстоянием между электродами 30, 20 и 10 мкм.

Для печати был выбран стеклянный капилляр с диаметром сопла около 400 мкм. Перед печатью капилляр заправлялся чернилами и опускался на расстояния в 5–10 мкм до подложки, и на пьезоэлектрический элемент подавалось управляющее напряжение в 10 В для формирования контакта между чернилами и подложкой, после чего управляющее напряжение уменьшалось до 1 В. В процессе печати капилляр перемещался со скоростью 10 мм/с, а управляющее напряжение, подаваемое на пьезо-электрический элемент, оставалось неизменным. Печать производилась в 1 и 2 слоя для встречно-штыревых электродов, и в 1, 2 и 4 слоя для электродов в форме «рогаток». После печати образцы сушились при комнатной температуре.

Исследование поверхности с помощью АСМ показала высокую степень однородности поверхности полученных образцов тонких пленок (рис. 5).

Полученные образцы фоторезисторов показали увеличение проводимости под действием монохроматического излучения с длиной волны 405 нм. Наибольшее значение фототока при удельной мощности падающего излучения 0,9 мВт/мм составило 0,18 пА, при темновом токе 0,01 пА (рис. 6), что обеспечивает чувствительность 0,03 мкА/Вт.

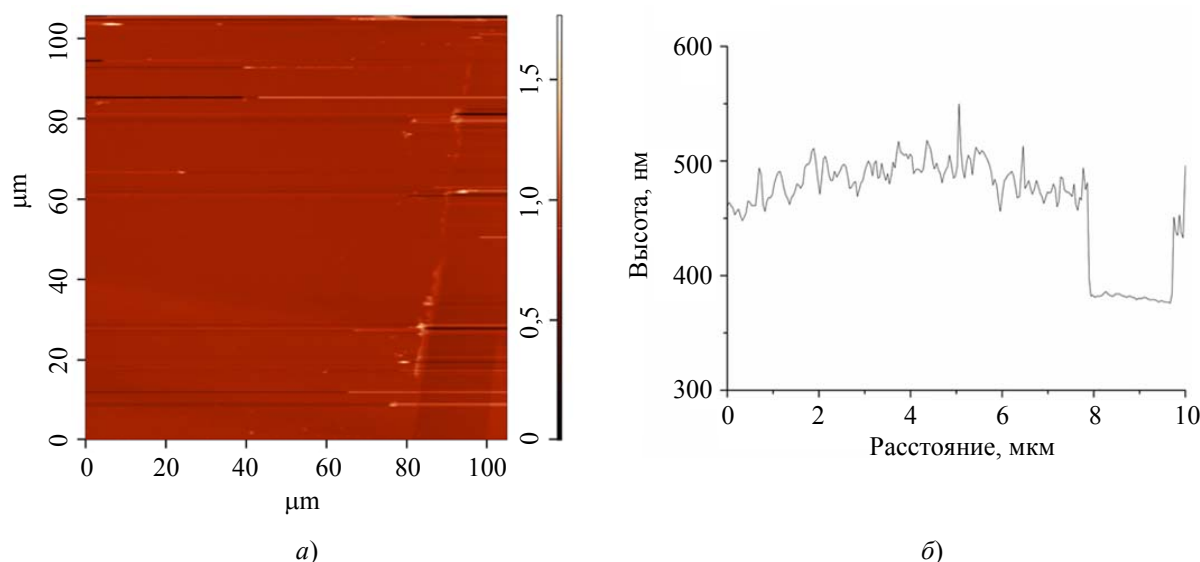


Рис. 5. Изображение поверхности и профиль среза пленки, полученный нанесением чернил KKT AgInS₂

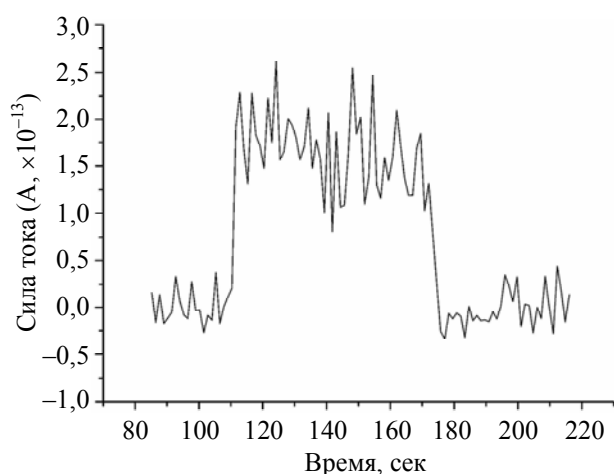


Рис. 6. Характерный вид зависимости тока от времени при включении и выключении засветки от источника 405 нм

Выводы

Впервые на основе коллоидных нанокристаллов AgInS₂ были получены чернила для прямой печати фоточувствительных структур. Для этого была разработана новая замена длинноцепочечных лигандов на короткоцепочечные в растворе для наночастиц AgInS₂. Было установлено, что наночастицы AgInS₂ с таким типом лигандной оболочки более подходят для замены лигандов с созданием чернил. Нами было установлено, что карбоксилатная лигандная оболочка позволяет эффективно и полно проводить требуемую замену лигандов для создания чернил. Полу-

ченные чернила были нанесены с помощью микроплоттера на встречно-штыревые электроды, в результате чего была изготовлена фоточувствительная структура фоторезистивного типа, показавшая фототклик при воздействии монохроматического излучения с длиной 405 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2024. Vol. 93. № 4. P. RCR5113.
2. Shuklov I. A., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2020. Vol. 89. № 3. P. 379.
3. Liu M., Tang G., Liu Y., Jiang F.-L. / The Journal of Physical Chemistry Letters. 2024. Vol. 15. № 7. P. 1975–1984.
4. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Milenkovich T., Dubrovina N. V., Vershinina O. V., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Nanoscience and Technology: An International Journal. 2025. Vol. 16. № 4.
5. Aqoma H., Jang S.-Y. / Energy Environ. Sci. 2018. Vol. 11 (6). P. 1603–1609.
6. Zheng S., Chen J., Johansson E. M. J., Zhang X. / iScience. 2020. Vol. 23. № 11.
7. Xiang C., Wu L., Lu Z., Li M., Wen Y., Yang Y., Liu W., Zhang T., Cao W., Tsang S.-W., Shan B., Yan X., Qian L. / Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 1. P. 1646.
8. Chakraborty D., Ethiraj K. R., Chandrasekaran N., Mukherjee A. / Environmental Pollution. 2021. Vol. 270. P. 116049.
9. Sharma V. K., McDonald T. J., Sohn M., Anquandah G. A. K., Pettine M., Zboril R. / Chemosphere. 2017. Vol. 188. P. 403–413.

10. Liu Y., Gao Y., Yang Q., Xu G., Zhou X., Shi G., Lyu X., Wu H., Liu J., Fang S. / *Angewandte Chemie International Edition*. 2023. Vol. 62. P. e202300396.
11. Cai C., Zhai L., Ma Y., Zou C., Zhang L., Yang Y., Huang S. / *Journal of Power Sources*. 2017. Vol. 341. P. 11–18.
12. Peng S., Zhang S., Mhaisalkar S. G., Ramakrishna S. / *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2012. Vol. 14. № 24. P. 8523–8529.
13. Kumar P., Jin L., Selopal G. S., Abdelkarim O., Liu J., Barba D., Yurtsever A., Wang Z. M., Rosei F. / *Nano Materials Science*. 2024. In press.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2024.10.005>.
14. Wang H., Pinna J., Romero D. G., Di Mario L., Koushki R. M., Kot M., Portale G., Loi M. A. / *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36. P. 2311526.
15. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z., et al. / *Small*. 2022. Vol. 18. P. 2205356.
<https://doi.org/10.1002/sml.202205356>.
16. Tang H., Jia S., Ding S., Liu P., Ma J., Xiao X., Qu X., Liu H., Yang H., Xu B., et al. / *ACS Applied Electronic Materials*. 2021. Vol. 3. P. 3005–3014.
<https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00210>.
17. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z. / *Small*. 2022. Vol. 18. № 48. P. 2205356.
18. Martinez B., Ramade J., Livache C., Goubet N., Chu A., Gréboval C., Qu J., Watkins W. L., Becerra L., Dandeu E., et al. / *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7. P. 1900348.
<https://doi.org/10.1002/adom.201900348>.
19. Dou Q., Ng K. M. / *Powder Technology*. 2016. Vol. 301. P. 949–958.
20. Malik W. U., Jain A. K., Jhamb O. P. / *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*. 1971. № 0. P. 1514–1517.
21. Shuklov I. A., Seraya A. V., Shalagin A. Y., Lim V. V., Milenkovich T., Vershinina O. V., Ivanov V. V. / *Applied Physics*. 2025. № 2. P. 21.
22. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., Popov V. S. / *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2025. Vol. 70. № 2. P. 61.

PACS: 85.60.–g

Preparation of inks based on colloidal AgInS₂ nanocrystals and their application in microplotter printing of photosensitive structures

I. A. Shuklov*, V. V. Lim, I. S. Vlasov, M. A. Troianova, A. Yu. Shalagin, O. V. Vershinina, V. O. Iakovlev, V. S. Popov, and V. V. Ivanov

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

*E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Received 10.12.2025; revised 14.01.2026; accepted 27.04.2026

For the first time, ligand exchange in solution was used to produce inks based on colloidal AgInS₂ nanocrystals that are suitable for the fabrication of photosensitive structures. Within this study, a system of stabilizing ligands was identified that allowed the resulting sol in dimethylformamide to remain stable for two weeks without significant agglomeration. FTIR spectroscopy confirmed the completeness of the ligand exchange. Using a microplotter, a photosensitive, photoconductive-type structure was fabricated on gold interdigitated electrodes from the obtained colloidal materials, and its photoelectrical characteristics were measured under illumination with a 405 nm laser.

Keywords: silver indium sulfide, hot injection synthesis, nanocrystals, colloidal quantum dots, thin films.

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. Shuklov I. A. and Razumov V. F., *Russ. Chem. Rev.* **89** (3), 379 (2020).
3. Liu M., Tang G., Liu Y., and Jiang F.-L., *The Journal of Physical Chemistry Letters* **15** (7), 1975–1984 (2024).
4. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Milenkovich T., Dubrovina N. V., Vershinina O. V., Ivanov V. V., and Razumov V. F., *Nanoscience and Technology: An International Journal* **16** (4), (2025).

5. Aqoma H. and Jang S.-Y., *Energy Environ. Sci.* **11** (6), 1603–1609 (2018).
6. Zheng S., Chen J., Johansson E. M. J., and Zhang X., *iScience* **23** (11), (2020).
7. Xiang C., Wu L., Lu Z., Li M., Wen Y., Yang Y., Liu W., Zhang T., Cao W., Tsang S.-W., Shan B., Yan X., and Qian L., *Nature Communications* **11** (1), 1646 (2020).
8. Chakraborty D., Ethiraj K. R., Chandrasekaran N., and Mukherjee A., *Environmental Pollution* **270**, 116049 (2021).
9. Sharma V. K., McDonald T. J., Sohn M., Anquandah G. A. K., Pettine M., and Zboril R., *Chemosphere* **188**, 403–413 (2017).
10. Liu Y., Gao Y., Yang Q., Xu G., Zhou X., Shi G., Lyu X., Wu H., Liu J., and Fang S., *Angewandte Chemie International Edition* **62**, e202300396 (2023).
11. Cai C., Zhai L., Ma Y., Zou C., Zhang L., Yang Y., and Huang S., *Journal of Power Sources* **341**, 11–18 (2017).
12. Peng S., Zhang S., Mhaisalkar S. G., and Ramakrishna S., *Physical Chemistry Chemical Physics* **14** (24), 8523–8529 (2012).
13. Kumar P., Jin L., Selopal G. S., Abdelkarim O., Liu J., Barba D., Yurtsever A., Wang Z. M., and Rosei F., *Nano Materials Science*, (2024). In press. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2024.10.005>.
14. Wang H., Pinna J., Romero D. G., Di Mario L., Koushki R. M., Kot M., Portale G., and Loi M. A., *Advanced Materials* **36**, 2311526 (2024).
15. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z., et al., *Small* **18**, 2205356 (2022). <https://doi.org/10.1002/sml.202205356>.
16. Tang H., Jia S., Ding S., Liu P., Ma J., Xiao X., Qu X., Liu H., Yang H., Xu B., et al., *ACS Applied Electronic Materials* **3**, 3005–3014 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00210>.
17. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., and Shi Z., *Small* **18** (48), 2205356 (2022).
18. Martinez B., Ramade J., Livache C., Goubet N., Chu A., Gréboval C., Qu J., Watkins W. L., Becerra L., Dandeu E., et al., *Advanced Optical Materials* **7**, 1900348 (2019). <https://doi.org/10.1002/adom.201900348>.
19. Dou Q. and Ng K. M., *Powder Technology* **301**, 949–958 (2016).
20. Malik W. U., Jain A. K., and Jhamb O. P., *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, № 0, 1514–1517 (1971).
21. Shuklov I. A., Seraya A. V., Shalagin A. Y., Lim V. V., Milenkovich T., Vershinina O. V., and Ivanov V. V., *Applied Physics*, № 2, 21 (2025).
22. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., and Popov V. S., *Journal of Communications Technology and Electronics* **70** (2), 61 (2025).

Об авторах

Шуклов Иван Алексеевич, старший научный сотрудник, доцент, Dr. rer. nat., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: shuklov.ia@mipt.ru SPIN-код: 4060-7233, AuthorID: 1146575

Лим Владимир Валерьевич, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: lim.vv@mipt.ru

Власов Иван Сергеевич, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: vlasov.is@mipt.ru SPIN-код: 7291-5090

Троянова Маргарита Александровна, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: troianova.ma@mipt.ru

Шалагин Александр Юрьевич, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: shalagin.au@mipt.ru SPIN-код: 9769-2552

Вершинина Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: seraia.ov@phystech.edu

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

Попов Виктор Сергеевич, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доцент, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru SPIN-код: 1128-2332, AuthorID: 625948

Иванов Виктор Владимирович, главный научный сотрудник, директор института квантовых технологий, профессор, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: ivanov.vv@mirt.ru SPIN-код: 1856-3914, AuthorID: 19128

УДК 621.383
EDN: LOTWHX

PACS: 85.60.–q

Зависимость затухания фотосигнала в фоторезисторах на основе массивов коллоидных квантовых точек HgTe от условий их получения© В. О. Яковлев¹, Т. В. Королева¹, К. Т. Хакимов¹, О. А. Сапцова¹, А. А. Короннов¹,
О. В. Вершинина¹, А. Г. Медведев¹, В. П. Пономаренко^{1,2}, В. С. Попов^{1,2*}¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия² АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

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

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 3.03.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

В данной работе исследовано влияние условий синтеза коллоидных квантовых точек на количество и типы поверхностных состояний, которые, в свою очередь, определяют быстродействие фотосенсоров на их основе. Показано, что замена этандитиола на β -меркаптоэтанол позволяет повысить быстродействие фоторезисторов на основе ККТ HgTe на три порядка.

Ключевые слова: фотосенсор, коллоидные квантовые точки, ККТ, поверхностные состояния, теллурид ртути.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-28-34

Введение

Фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений инфракрасной фотоэлектроники [1, 2]. Фоточувствительные элементы резистивного и барьерного типов на основе коллоидных квантовых точек используются как для одиночных фоточувствительных элементов, так и при формировании матричных фотоприемных устройств коротковолнового и средневолнового ИК диапазона [3]. В основе чувствительных слоев в таких фотосенсорах применяются консолидированные слои, изготовленные жидкостными методами из золь нанокристаллов полупроводников, преимущественно сульфида свинца и теллурида ртути. При таком подходе перенос носителей в получаемых поликристаллических наноструктурированных слоях протекает преимущественно по прыжковому механизму. Поверхность нано-

кристаллов в слоях, сформированных химическими методами, содержит большое число различных функциональных групп и не скомпенсированных связей, приводящих к возникновению поверхностных состояний. Вопросы быстродействия в фотосенсорах на основе ККТ занимают важное место в связи с большой поверхностью квантово-размерных материалов и более сложно контролируемой средой, окружающей нанокристаллы в ходе формирования консолидированных пленок. Исследование влияния поверхностных состояний на чувствительность и быстродействие фотосенсоров при направленной модификации поверхности ККТ и их слоев имеет большое значение для разработки способов формирования фоточувствительных слоев. Представленные в литературе результаты исследований влияния ловушек в основном сосредоточены на исследовании кривых затухания фоторезисторов [4, 5], фотолюминесценции [6, 7] или спектроскопии накачки-

зондирования («pump-probe») [8] при варьировании лигандов в слоях ККТ PbS, при этом другим ККТ внимание в должном объеме не уделялось, а вопросы влияния условий синтеза самих нанокристаллов в литературе не рассматривались.

Целью настоящей работы являлось исследование изменения поверхностных состояний при варьировании методов синтеза ККТ и постсинтетической обработки поверхности ККТ HgTe путем изучения кривых затухания фотосигнала в фоторезисторах на основе ККТ HgTe.

1. Синтез ККТ на основе HgTe и изготовление слоев на их основе

Синтез ККТ HgTe

Синтез ККТ HgTe осуществляли согласно опубликованной методике [9] с использованием в качестве прекурсора ртути комплексного соединения $\text{NH}_4[\text{HgCl}_2(\text{SCN})]$.

Фоторезистивные структуры изготавливали в два этапа. Первый этап – активация подложки, второй этап – последовательное послойное формирование фоторезистивной структуры. Оба этапа предполагают использование в качестве активатора и замены лигандов один и тот же раствор: раствор этандитиола (EDT) в соляной кислоте и изопропанол HCl:EDT:IPA (1:1:20 по об.) либо раствор β -меркаптоэтанола (β -ME) в соляной кислоте и изопропанол $\text{HCl}:\beta\text{-ME:IPA}$ (1:1:20 по об.).

Методы

ИК-Фурье спектры были получены на ИК-Фурье спектрометре Spectrum 100 (Perkin-Elmer, США) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Снимки высокого разрешения были получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа Microscope JEM-2100 (JEOL, Япония).

2. Методика исследования кривых затухания фотосигнала

Исследование процессов спада фототока является одним из классических инструментов исследования поверхностных состояний в фо-

топроводящих слоях полупроводников [9]. В зависимости от вида ловушки и создаваемого ею энергетического уровня удерживаемые носители через какое-то время возвращаются в валентную зону или в зону проводимости.

Поскольку фототок пропорционален количеству носителей заряда [10], то выражение для спада фототока от времени будет описываться выражением [11]:

$$I_{\Phi} = I_{\Phi 0} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $I_{\Phi 0}$ – значение фототока при насыщении, τ – время жизни носителей.

Для анализа многостадийной релаксации используется разделение сигнала по амплитуде фототока. Пороговое значение определяется как:

$$I_{\text{thr}} = I_{\text{min}} + \gamma(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}),$$

где I_{min} и I_{max} – минимальное и максимальное значения фототока в выбранном интервале.

Коэффициент γ задаёт относительное положение порогового уровня в полном динамическом диапазоне фототока и тем самым определяет границу между различными стадиями релаксационного процесса. В используемой методике значение γ выбирается в виде:

$$\gamma = \frac{1}{e^n},$$

где e – основание натуральных логарифмов, а показатель степени n является целым или дробным числом, задаваемым пользователем в зависимости от предполагаемого числа и выраженности релаксационных компонент. При $n = 1$ порог соответствует уровню $1/e$ от полного амплитудного диапазона, что является характерным значением для одноэкспоненциального затухания и естественным образом связано с определением постоянной времени. При увеличении показателя степени пороговое значение последовательно смещается в область меньших токов, что позволяет выделять более медленные стадии релаксации.

Такой способ задания порогов обеспечивает физически обоснованное разбиение сигнала на участки, каждый из которых соответствует определённому диапазону времен и,

соответственно, доминирующему релаксационному механизму. В результате каждый выделенный участок может анализироваться независимо с использованием собственной экспоненциальной аппроксимации, что повышает точность определения постоянных времени и амплитуд отдельных компонент и снижает взаимное влияние быстрых и медленных процессов при совместной обработке всего сигнала.

Для снижения влияния шумов и одиночных выбросов применяется медианное сглаживание. При этом допускается комбинированный режим, при котором начальный участок временного ряда сохраняется без фильтрации, а последующая часть подвергается сглаживанию. Это позволяет сохранить быстрые начальные изменения фототока и одновременно повысить устойчивость анализа медленной релаксационной области.

Аппроксимация релаксационной части фотоотклика проводится с использованием модели суммы затухающих экспоненциальных компонент. В общем виде модель записывается как

$$I_{\text{model}}(t) = I_{\text{т}} + \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\frac{t-t_s}{\tau_k}\right),$$

где $I_{\text{т}}$ – темновой ток, A_k – амплитуды отдельных релаксационных компонент, τ_k – соответствующие им постоянные времени, N – число экспоненциальных слагаемых, а t_s – эффективный сдвиг начала релаксации по времени. При этом предполагается, что $A_k \geq 0$, что обеспечивает физически осмысленную интерпретацию результатов.

Результатом обработки являются численные значения τ для каждого из участков кривой затухания фототока, а также набор временных зависимостей, включающий исходный сигнал и аппроксимирующие кривые.

3. Обсуждение результатов

В работе синтезированы коллоидные квантовые точки HgTe, имеющие экситонный пик поглощения в диапазоне от 2,13 до 3,16 мкм (рис. 1).

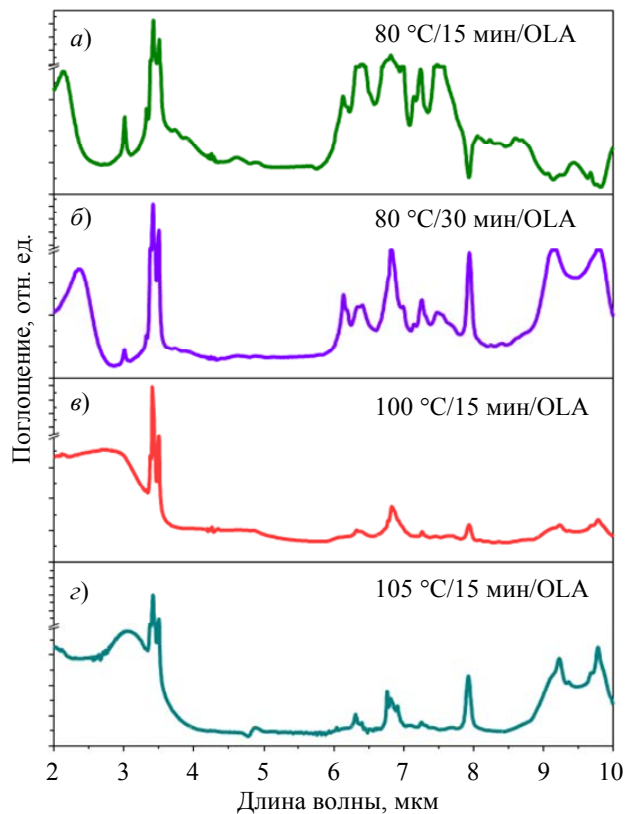


Рис. 1. ИК-Фурье спектры поглощения ККТ, HgTe синтезированных при различных режимах (OLA-олеиламин)

По данным просвечивающей электронной микроскопии во всех случаях синтезированы нанокристаллы HgTe (рис. 2). Слои на основе ККТ HgTe имели толщину около 80–90 нм согласно данным атомно-силовой микроскопии.

Исследование кривых затухания показало, что в зависимости от условий синтеза коллоидных квантовых точек и типа лиганда, используемого для модификации поверхности фоточувствительных слоев, изменяется число и типы поверхностных состояний (рис. 3).

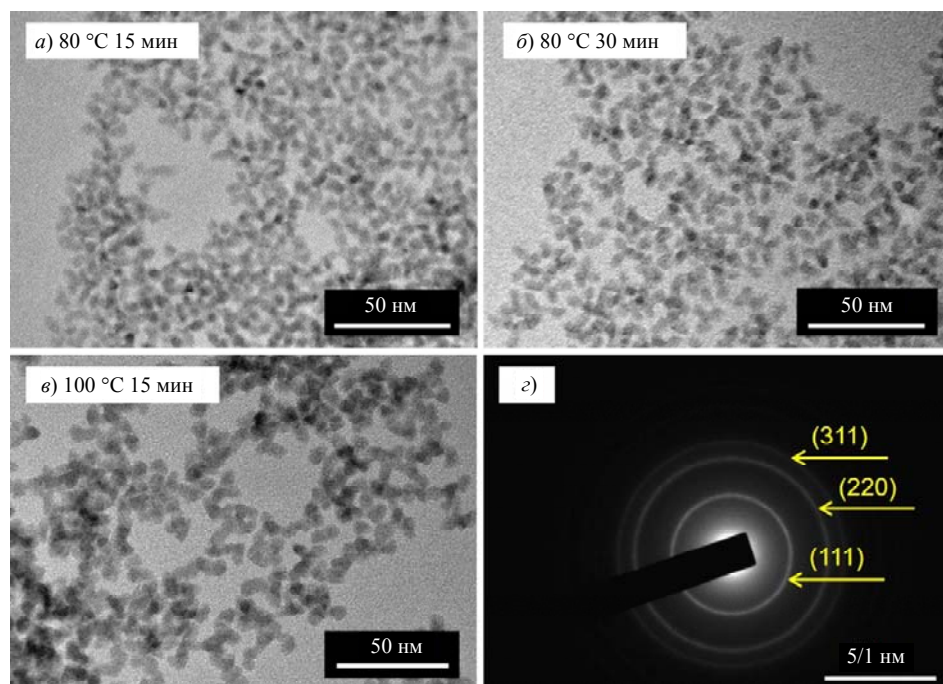


Рис. 2. (а–в) Просвечивающая электронная микроскопия ККТ HgTe полученных при различных условиях, (г) дифракция электронов на выделенной области

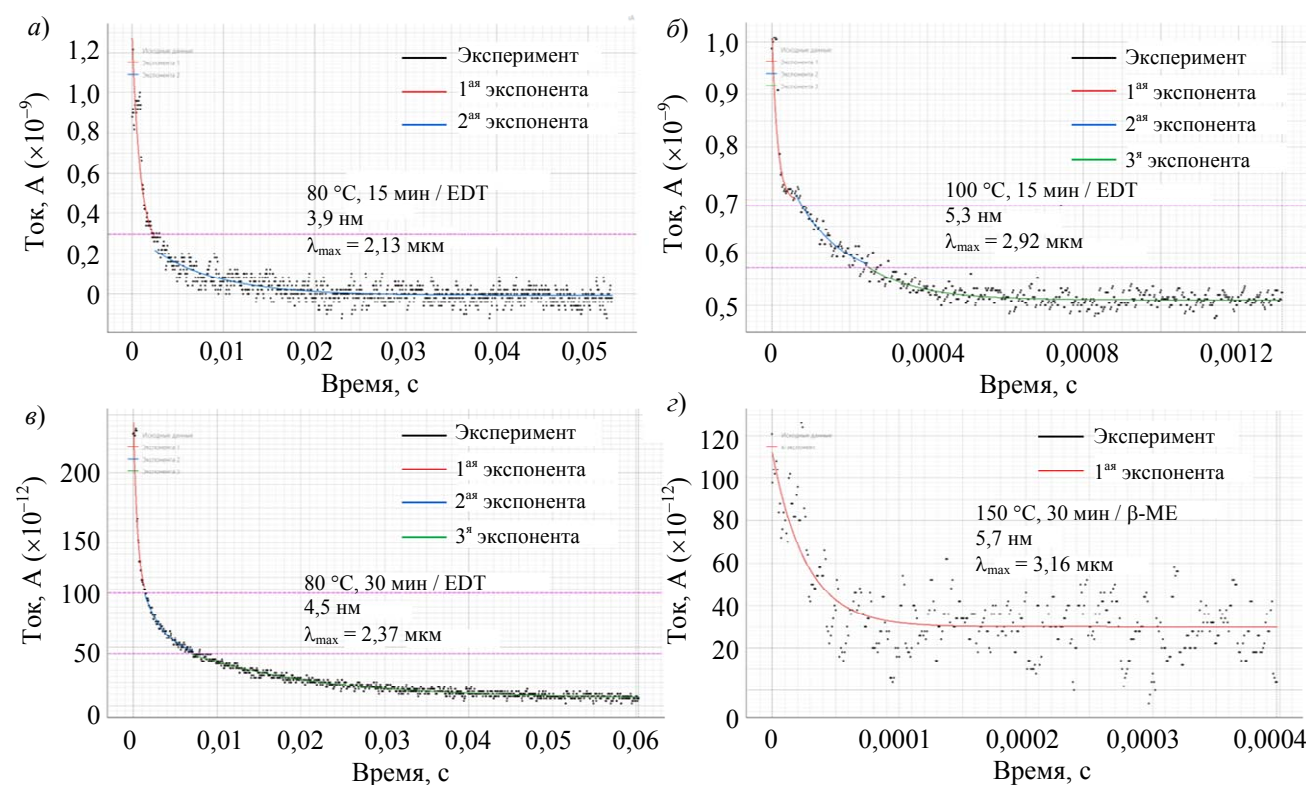


Рис. 3. Кривые затухания фотосигналов фоторезисторов на основе ККТ HgTe, полученных при различных условиях (температура и время синтеза: а) 80 °C, 15 мин, б) 100 °C, 15 мин, в) 80 °C, 30 мин) и с использованием различных лигандов при модификации поверхности б) этандитиол (EDT) и г) β-меркаптоэтанол (β-ME)

Поскольку время жизни характеризует энергию поверхностного состояния, а именно большему времени жизни соответствуют более глубокие ловушки [12], можно заключить,

что в зависимости от размера квантовой точки и используемого лиганда на её поверхности присутствуют поверхностные состояния, существенно отличающиеся по энергии.

Для ККТ HgTe с последующей заменой на этандитиол при изменении размера ККТ от 3,9 нм к 4,5 нм сохраняются поверхностные состояния, характеризующиеся $\tau \sim 0,0002$ с и $\tau \sim 0,003$ с, при этом добавляется новый тип поверхностных состояний с $\tau \sim 0,02$ с. При изменении размера ККТ от 4,5 нм до 5,3 нм сохраняются только поверхностные состояния, характеризующиеся $\tau \sim 0,02$ с, вместе с

тем появляются новые поверхностные состояния с $\tau \sim 0,08$ с и $\tau \sim 0,003$ с (рис. 4).

Использование в качестве лигандной замены β -меркаптоэтанола вместо этандитиола при близких размерах квантовых точек (5,3 и 5,7 нм) кардинально меняет поверхностные состояния: вместо состояний трех типов с $\tau \sim 0,02$ с, $\tau \sim 0,08$ с и $\tau \sim 0,003$ с, наблюдается лишь один тип с $\tau \sim 0,00001$ с (рис. 4).

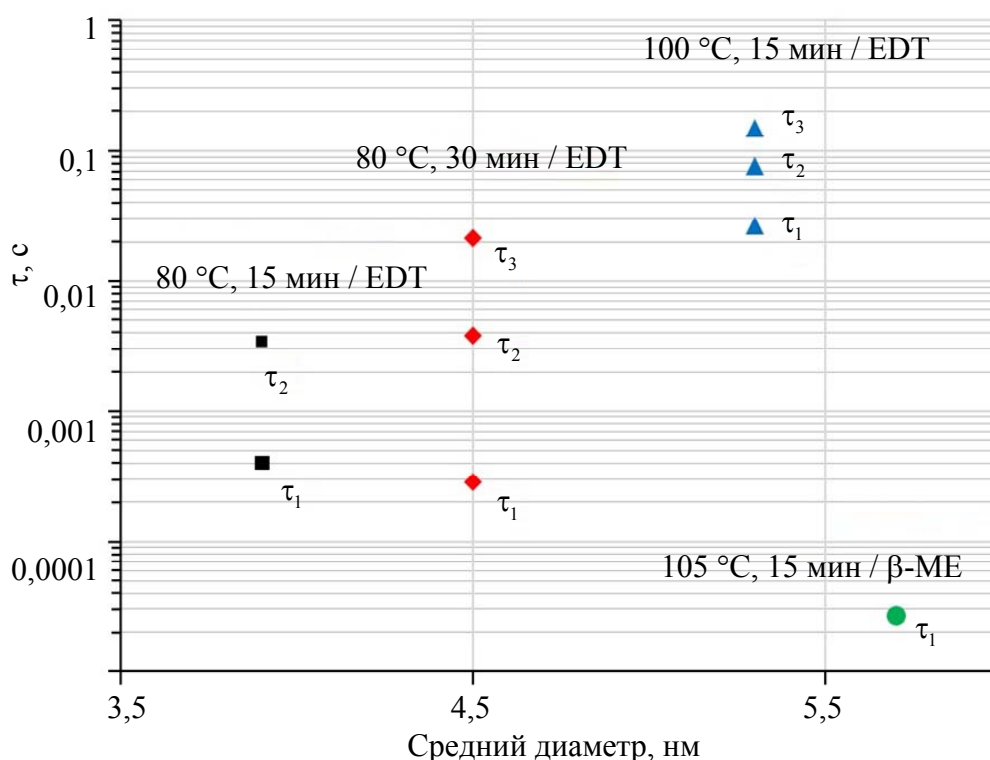


Рис. 4. Значения τ , полученные при обработке кривых затухания фотосигналов фоторезисторов на основе ККТ HgTe полученных при различных условиях (температура и время синтеза: а) 80 °C, 15 мин, б) 100 °C, 15 мин, в) 80 °C, 30 мин) и с использованием различных лигандов при модификации поверхности б) этандитиол (EDT) и г) β -меркаптоэтанол (β -ME)

Заключение

В ходе анализа кривых затухания фототклика фоторезисторов на основе ККТ HgTe полученных при варьировании параметров синтеза и отличающихся размером нанокристаллов показано существование поверхностных состояний разных типов. Использование в качестве лигандной замены β -меркаптоэтанола позволяет снизить число поверхностных состояний с трех типов до одного, при этом характеризующегося наименьшим из обнаруженных в данной работе временем жизни, равным 10 мкс, обеспечивающим высокое быстродействие фотосенсора.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 45–53.
2. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. / Успехи химии. 2024. Т. 93. № 4. С. RCR5113.
3. Попов В. С., Пономаренко В. П., Дирочка А. И., Попов С. В. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 54–61.

4. Konstantatos G., Sargent E. H. / Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. № 17. P. 1–4.
5. Gong W., Wang P., Deng W., Zhang X., An B., Li J., Sun Z., Dai D., Liu Z., Li J., Zhang Y. / ACS Appl. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. № 22. P. 25812–25823.
6. Xia Y., Chen W., Zhang P., Liu S., Wang K., Yang X., Tang H., Lian L., He J., Liu X., Liang G., Tan M., Gao L., Liu H., Song H., Zhang D., Gao J., Wang K., Lan X., Zhang X., Müller-Buschbaum P., Tang J., Zhang J. / Adv. Funct. Mater. 2020. Vol. 30. № 22. P. 2000594.
7. Liu X., Fu T., Liu J., Wang Y., Jia Y., Wang C., Li X., Zhang X., Liu Y. / ACS Appl. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. № 12. P. 14274–14283.
8. Bakulin A. A., Neutzner S., Bakker H. J., Ottaviani L., Barakel D., Chen Z. / ACS Nano. 2013. Vol. 7. № 10. P. 8771–8779.
9. Koroleva T.V., Medvedev A.G., Khakimov K.T., Yakovlev V.O., Saptsova O.A., Koronnov A.A., Chemakina Y.A., Asnachev D.D., Vershinina O.V., Ponomarenko V.P., Popov V.S. / Optical Materials. 2026. Vol. 175. P. 118029.
10. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
11. Le B. Q., Van T. N., Quang D. T., Le Dinh V., Van T. P., Kim N. C. T. / J. Semicond. 2025. Vol. 46. № 7. P. 072101.
12. Konstantatos G., Levina L., Fischer A., Sargent E. H. / Nano Lett. 2008. Vol. 8. № 5. P. 1446–1450.

PACS: 85.60.–q

Influence of the HgTe colloidal quantum dots layers obtaining conditions on the photosignal decay in photoresistors

V. O. Yakovlev¹, T. V. Koroleva¹, K. T. Khakimov¹, O. A. Saptsova¹, A. A. Koronnov¹,
O. V. Vershinina¹, A. G. Medvedev¹, V. P. Ponomarenko^{1,2}, and V. S. Popov^{1,2*}

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

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

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

Received 25.12.2025; revised 3.03.2026; accepted 27.04.2026

This paper examines the influence of colloidal quantum dot synthesis conditions on the number and types of surface states, which in turn determine the response time of photosensors based on them. It is shown that replacing ethanedithiol with β -mercaptoethanol improves the response time of HgTe CQD-based photoresistors by three orders of magnitude.

Keywords: photosensor, colloidal quantum dots, CQDs, surface states, mercury telluride.

REFERENCES

1. Popov V. S., Ponomarenko V. P., and Popov S. V., J. Comm. Tech. Electron. **69** (4–6), 219–226 (2024).
2. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., and Razumov V. F., Russ. Chem. Rev. **93** (4), RCR5113 (2024).
3. Popov V. S., Ponomarenko V. P., Dirochka A. I., and Popov S. V., J. Comm. Tech. Electron. **70** (1), 21–27 (2025).
4. Konstantatos G. and Sargent E. H., Appl. Phys. Lett. **91**, 1 (2007).
5. Gong W., Wang P., Deng W., Zhang X., An B., Li J., Sun Z., Dai D., Liu Z., Li J., Zhang Y., ACS Appl. Mater. Interfaces **14**, 25812 (2022).
6. Xia Y., Chen W., Zhang P., Liu S., Wang K., Yang X., Tang H., Lian L., He J., Liu X., Liang G., Tan M., Gao L., Liu H., Song H., Zhang D., Gao J., Wang K., Lan X., Zhang X., Müller-Buschbaum P., Tang J., and Zhang J., Adv. Funct. Mater. **30**, 2000594 (2020).
7. Liu X., Fu T., Liu J., Wang Y., Jia Y., Wang C., Li X., Zhang X., and Liu Y., ACS Appl. Mater. Interfaces **14**, 14274 (2022).
8. Bakulin A. A., Neutzner S., Bakker H. J., Ottaviani L., Barakel D., and Chen Z., ACS Nano **7**, 8771 (2013).
9. Koroleva T. V., Medvedev A. G., Khakimov K. T., Yakovlev V. O., Saptsova O. A., Koronnov A. A., Chemakina Y. A., Asnachev D. D., Vershinina O. V., Ponomarenko V. P., and Popov V. S., Optical Materials **175**, 118029 (2026).

10. Bube R. Photoconductivity of Solids. NY-London: John Wiley & Sons, 1960.
11. Le B. Q., Van T. N., Quang D. T., Le Dinh V., Van T. P., and Kim N. C. T., J. Semicond. **46**, 072101 (2025).
12. Konstantatos G., Levina L., Fischer A., and Sargent E. H., Nano Lett. **8**, 1446 (2008).

Об авторах

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

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

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: sapsova.ou@mipt.ru SPIN-код: 3710-5884, AuthorID: 1323937, ORCID 0009-0008-5445-4629

Короннов Алексей Алексеевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9). E-mail: koronnov.aa@mipt.ru SPIN-код: 9854-4380, AuthorID: 116157, ORCID 0000-0001-6046-3400

Вершинина Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: seraia.ov@phystech.edu

Медведев Александр Геннадьевич, к.х.н., зам. 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

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: 1128-2332, AuthorID: 625948, ORCID 0000-0002-0962-9775

УДК 621.315.5:621.383
EDN: MUTHMR

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

Влияние микродефектов на вольт-амперные характеристики и шумы кремниевых фотодиодов

© К. О. Болтарь^{1,2}, М. Н. Вильдяева¹, С. С. Демидов¹, Е. А. Климанов^{1,3*},
Д. С. Конорев¹, Э. А. Макарова¹, Д. С. Молчанов¹, К. А. Попов¹, В. В. Полунеев¹,
А. А. Жукович-Гордеева¹

¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: klimanov3@mail.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

Статья поступила в редакцию 27.03.2026; после доработки 7.04.2026; принята к публикации 27.04.2026

Шифр научной специальности: 1.3.11

Проведено исследование дефектов, вызывающих токи утечки и шумы в p^+ – n -переходах кремниевых фотодиодов. Установлено, что причиной возникновения туннельной компоненты темновых токов являются локальные дефекты в окисле и примесные преципитаты в ОПЗ p – n -перехода. Протекание туннельных токов приводит к возникновению шумов, имеющих широкий спектр, в том числе «взрывного» шума.

Ключевые слова: кремниевый фотодиод, микродефекты, туннельные токи, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-35-42

Введение

Одним из основных требований к фотодиодам (ФД), используемым в фотоприемных устройствах, является низкий уровень шума, что требует снижения темновых токов и исключения избыточных шумов в низкочастотном диапазоне.

Цикл изготовления кремниевых фотодиодов включает в себя ряд термических операций (окисление, диффузия бора и фосфора, низкотемпературные отжиги), во время проведения которых происходит загрязнение образцов примесями металлов и образование локальных дефектов в окисле, кислородных и примесных преципитатов в объеме кремния. [1–3]. Указанных дефекты могут приводить к образованию локальных n^+ -каналов в p^+ – n -переходах, дефектов на поверхности и в объеме кремния, вызывая токи утечки – «мягкие»

вольт-амперные характеристики (ВАХ) [4], приводящие к увеличению шумов фотодиодов, в том числе низкочастотных.

В работе [5] было установлено, что причиной «мягких» ВАХ является возникновение туннельного тока в сильном электрическом поле локальных дефектов.

1. Эксперимент

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n -типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см, ориентацией (100), без свирловых дефектов изготавливались линейки фоточувствительных элементов (ФЧЭ) с размером площадок $1,4 \times 1,4$ мм².

Технологический цикл изготовления включал операции окисления в парах

$\text{H}_2\text{O}+\text{HCl}$, фотолитографии, загонки (осаждения) бора из пластин нитрида бора (BN), диффузии (разгонки) бора и диффузии фосфора в различных режимах.

На пластинах с изготовленными ФЧЭ определялась концентрация и распределение по пластине локальных дефектов с помощью селективного травления и оптического микроскопа, а также распределение времени жизни носителей заряда. На изготовленных образцах проводились измерения ВАХ ФЧЭ в диапазоне обратных напряжений от 0,01 В до 90 В и шумов в диапазоне частот 10–12000 Гц.

2. Результаты

2.1 Вольт-амперные характеристики

Поскольку наблюдаемые в оптический микроскоп дефекты окисных слоев [2] имеют различный диаметр (5–10 мкм) и глубину, не все из них являются электрически активными, что затрудняет сравнение пространственных распределений ФЧЭ с «мягкими» ВАХ и дефектов на пластине. Наблюдалась лишь качественная связь пространственных распределе-

ний таких ФЧЭ и плотности дефектов.

Поэтому для нахождения зависимости величины туннельных токов от плотности дефектов окисла определялось распределение величины порогового напряжения $U_{\text{п}}$ для ФЧЭ с различным числом наблюдаемых дефектов (N) (рис. 1) по массиву из 350 ФЧЭ. За пороговое напряжение принималось значение, при котором темновой ток I_d превышал величину 10^{-7} А.

Наблюдаемая корреляция величин N и $U_{\text{п}}$ подтверждает взаимосвязь между ними.

В то же время сравнение пространственных распределений темновых токов при напряжениях 0,01, 1 и 5 В показывают существование областей, в которых наблюдается корреляция между туннельными токами и токами при низких напряжениях (рис. 2). Данная взаимосвязь подтверждается возрастанием доли ФЧЭ с величиной темнового тока $I_d < 10^{-11}$ А при 0,01 В среди элементов с высоким пороговым напряжением (рис. 3).

Качественная корреляция величин N , $U_{\text{п}}$ и I_d указывает на взаимосвязь между ними и, соответственно, между числом дефектов N и величиной темнового тока I_d .

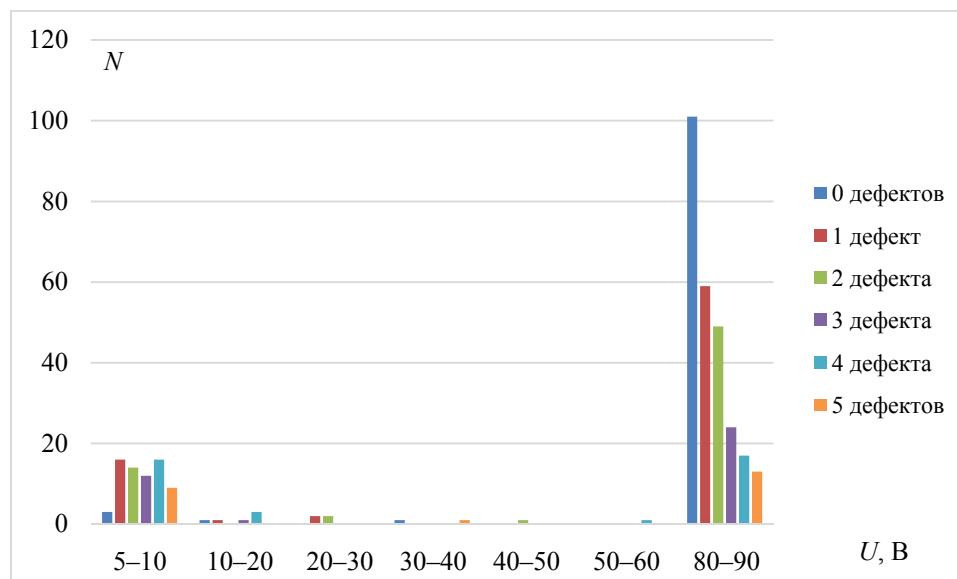


Рис. 1. Гистограмма распределения ФЧЭ по пороговому напряжению для различного числа дефектов на одном элементе

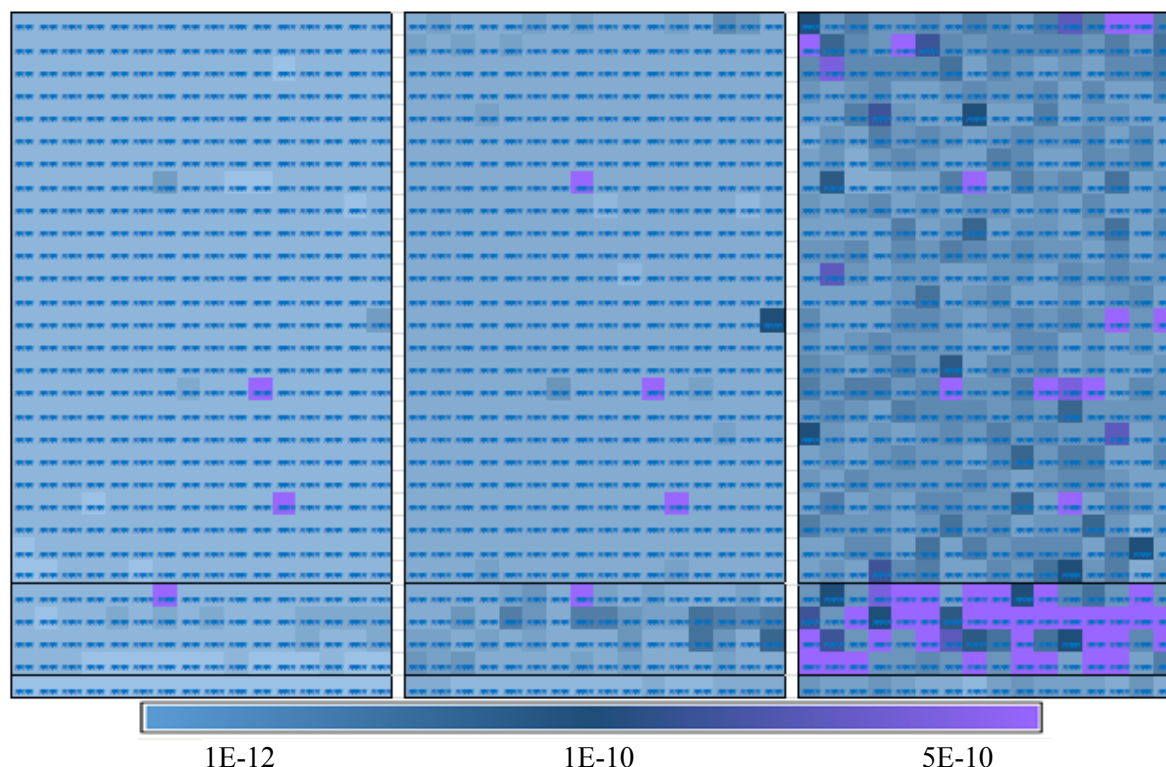


Рис. 2. Распределение темновых токов по площади пластины при напряжениях 0,01 В, 1 В и 5 В

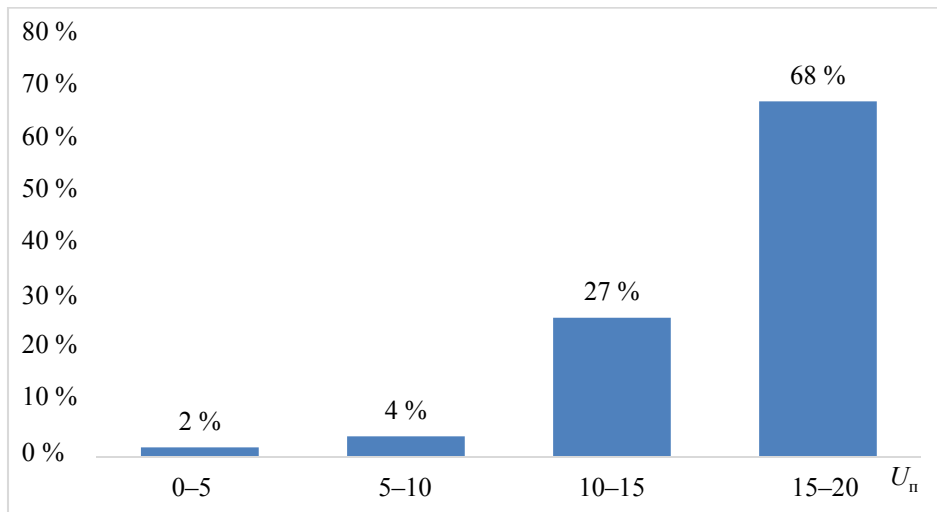


Рис. 3. Зависимость доли ФЧЭ с током $I_d < 10^{-11}$ А от порогового напряжения

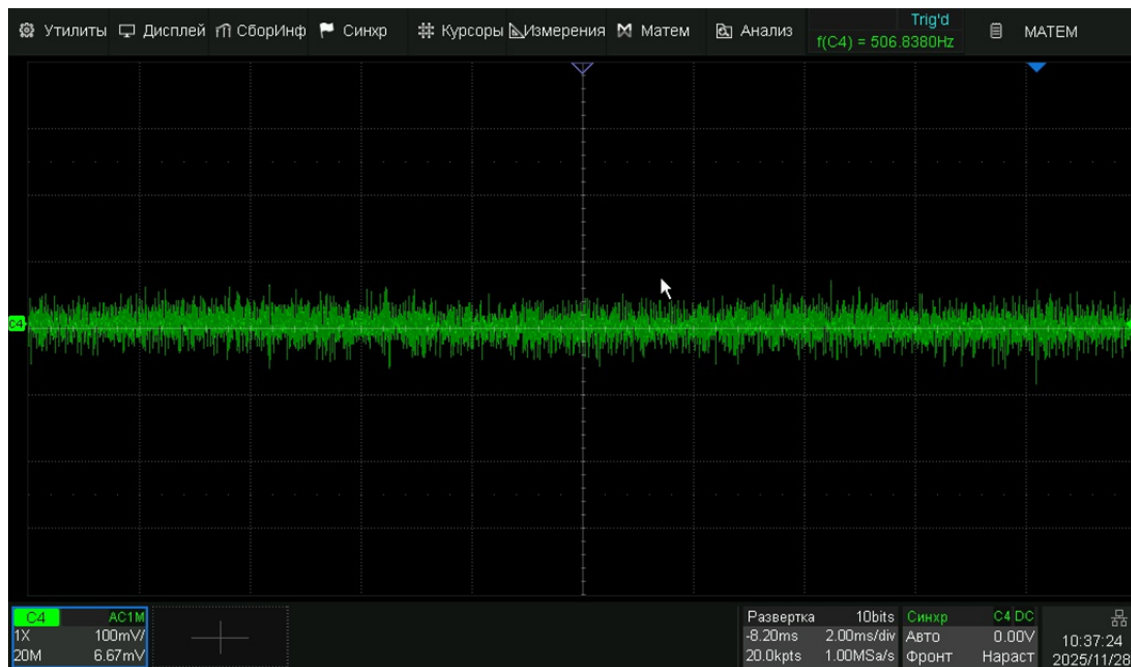
2.2. Шумы

На ФЧЭ с «мягкими» ВАХ проводились измерения шумов и спектральной плотности шума в полосе частот 100–12000 Гц при различных обратных напряжениях. На рис. 4 приведены временные осциллограммы шумового напряжения при напряжениях смещения 1 В (а) и 10 В (б). При напряжении 10 В, кото-

рое соответствует участку экспоненциального роста туннельного тока, появляется большое число шумовых выбросов с амплитудой до 400 мВ на фоне шумовой дорожки с амплитудой до 50 мВ. Одновременно у некоторых ФЧЭ наблюдался участок осциллограммы с двумя состояниями, характерный для «взрывного» (телеграфного) шума [5, 6].

На рис. 5 показаны соответствующие частотные зависимости спектральной плотности шума при напряжениях 1 В (а) и 10 В (б), по-

казывающие резкое возрастание спектральной плотности шума при напряжении 10 В, особенно значительное на частоте 1 кГц.



а)

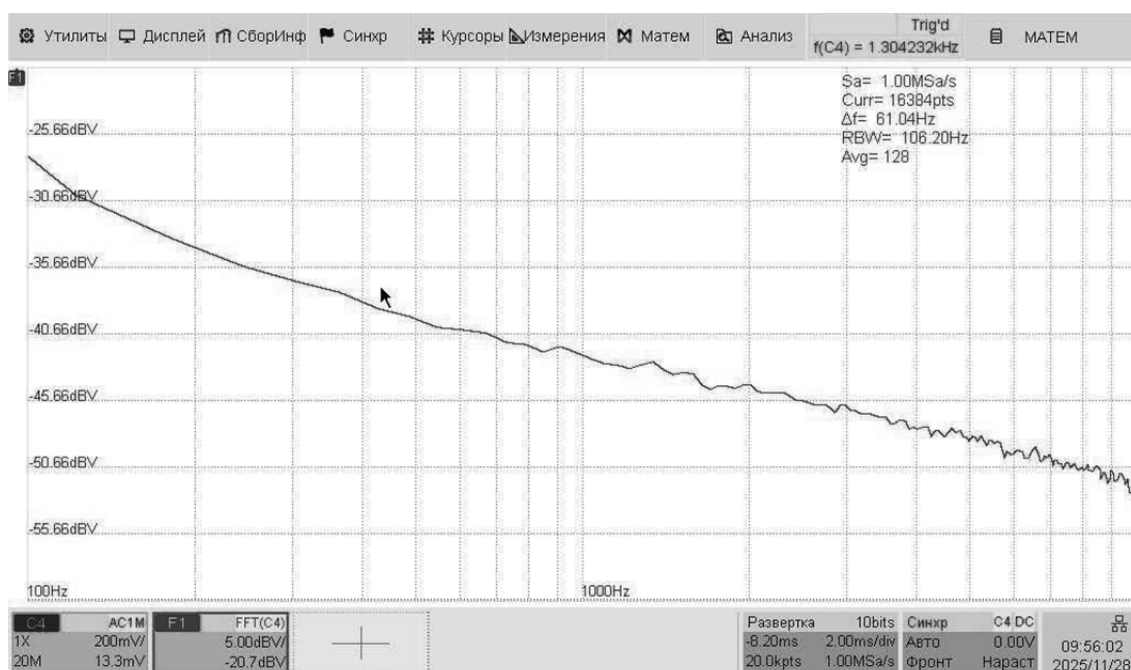


б)

Рис. 4. Осциллограммы напряжения шума при напряжениях 1 В и 10 В



а)



б)

Рис. 5. Зависимости спектральной плотности шума от частоты при напряжениях 1 В и 10 В

Обсуждение результатов

В работах [3, 7] было установлено влияние кислородных преципитатов на время жизни носителей заряда в кремнии, а также на темновые токи и фоточувствительность фотодиодов, изготовленных на кремнии с кольцевым распределением концентрации кислорода по площади пластины [8].

В данной работе использовался кремний без свирловых дефектов с более однородным распределением кислорода, что приводит к более равномерному распределению времени жизни носителей заряда (разброс значений 10–12 %) и микродефектов (ямок травления) по площади пластин и, соответственно, случайному распределению ФЧЭ с «мягкими» ВАХ.

Поскольку распределение ФЧЭ с «мягкими» характеристиками по площади пластин носит случайный характер, причиной их возникновения могут быть локальные дефекты – такие как, дефекты в окисле и на поверхности кремния, образующиеся при диффузии фосфора [2]. Расположение дефектов, вызывающих туннельные токи вблизи поверхности, подтверждается тем, что в рассматриваемом диапазоне обратных напряжений ширина области пространственного заряда (ОПЗ) p^+-n -перехода с высокой напряженностью поля не превышает 5–7 микрон. Глубокие дефекты указанного типа могут приводить к туннельному пробоем паразитных p^+-n^+ -переходов из-за высокой концентрации легирующих примесей, а также образованию локальных дефектов на поверхности кремния, содержащих примеси кислорода, углерода и тяжелых металлов (примесные преципитаты). Туннельный пробой p^+-n^+ -переходов приводит к ВАХ с резким пробоем при напряжениях 6–7 В.

Следовательно, важной задачей является снижение плотности дефектов окисла, что достигается как оптимизацией режимов процесса диффузии фосфора, так и улучшением качества окисла, формируемого перед диффузией [1, 2].

Другой причиной возникновения туннельных токов могут являться примесные преципитаты, в том числе кислородные, в ОПЗ p – n -переходов [9, 10], приводящие к «мягким» ВАХ с увеличивающимися токами при напряжениях больше 10 В. Подбором оптимальных режимов операции геттерирования, приводящих к удалению примесей тяжелых металлов из объема кремния, в том числе из примесных преципитатов, удастся значительно снизить количество ФЧЭ с такими характеристиками.

Повторное проведение операции геттерирования примесей на пластинах, содержащих ФЧЭ с «мягкими» характеристиками, также приводит к уменьшению количества таких элементов.

Зависимости спектральной плотности шума от величины обратного напряжения 1 В, 10 В на частотах 100 Гц и 1 кГц показывают значительно более слабую зависимость от тока для низкочастотного шума, что может свидетельствовать о различных механизмах генерации шума: на низкой частоте преобладает

шум типа $1/f$, вызываемый перезарядкой поверхностных состояний на границе Si-SiO₂, на высокой – «взрывной» (RTN) шум, имеющий широкий спектр. Поскольку известны работы [11, 12], связывающие возникновение RTN в p – n -переходах с модуляцией тока, протекающего через примесные преципитаты, приведенные данные также могут подтверждать модель генерации туннельного тока в электрическом поле преципитата.

Выражение для электрического поля в области преципитата можно представить в виде [9]:

$$E = \beta E_{\max} = \beta \left(\frac{2qNd}{\epsilon_s} \right) (V_b + V)^{1/2}, \quad (1)$$

где V_b – встроенный потенциал, N_d – концентрация носителей заряда в n -области, $E_{\max}$ – максимальная напряженность поля в однородной области пространственного заряда (ОПЗ), β – коэффициент, учитывающий локальные изменения поля вследствие наличия дефекта, ϵ_s – диэлектрическая постоянная.

Используя экспериментально полученные значения коэффициента $\beta = 100$ –200 для различных образцов, можно оценить форму дефектов. Большие значения β свидетельствуют о вытянутой форме дефекта в направлении приложенного поля, что позволяет использовать для анализа электрического поля дефекта решение для потенциала поля проводящего вытянутого в направлении электрического поля полусфероид с полуосями c и b в однородном электрическом поле E_0 [13]. Выражение для электрического поля на поверхности полусфероид в направлении большей оси имеет вид:

$$E = E_0 \frac{1}{\left(\frac{1}{2} \ln \frac{\eta_0 + 1}{\eta_0 - 1} - 1 \right) (\eta_0^2 - 1)}, \quad (2)$$

где $\eta_0 = c / (c^2 - b^2)^{1/2}$, E_0 – поле области пространственного заряда (ОПЗ) p – n -перехода.

Из выражения (2) и приведенных значений β получаем отношения полуосей $c/b = 10$ –20. Полагая b равным половине диаметра дефекта и используя значения $b = 200$ –300 Å [2], получаем размер дефекта в направлении поля

0,2–0,6 мкм. Разброс значений c/b приводит к соответствующему разбросу в значениях пороговых напряжений туннельного тока.

Таким образом, другой причиной «мягких» ВАХ и повышенных шумов ФЧЭ являются примесные преципитаты вытянутой формы в ОПЗ p – n -перехода, для удаления которых необходимо использовать оптимальные режимы геттерирования металлических примесей.

Выводы

1. Вольт-амперная характеристика кремниевых фотодиодов с «мягкими» характеристиками определяется наличием туннельной компоненты протекания тока. Величина темнового тока при малых напряжениях (0,01 В) зависит от напряжения начала резкого роста туннельного тока (порогового напряжения).

2. Существует корреляция между пороговым напряжением, величиной темнового тока и числом дефектов окисла.

3. Протекание туннельных токов приводит к возникновению шумов, имеющих широкий спектр. В ряде случаев при большом темновом токе наблюдается «взрывной» шум.

4. Причиной возникновения туннельных токов являются локальные дефекты небольшой площади в окисле, приводящие к образованию паразитных p^+-n^+ -переходов, и примесные преципитаты в ОПЗ p – n -перехода, имеющие вытянутую в направлении электрического поля форму.

5. Улучшение качества диэлектрика и применение оптимальных режимов геттери-

рования примесей приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с туннельными ВАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L., Fisher A. W. / Journal of Electrochemical Society. 1982. Vol. 3. P. 667–668.
2. Болтарь К. О., Вильдяева М. А., Иродов Н. А., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Малыгин В. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А. / Прикладная физика. 2025. № 2. С. 39.
3. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., Falster R. J. / Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. P. 215706.
4. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М.: «Мир», 1984. С. 269.
5. Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А., Попов К. А., Жукович-Гордеева А. А., Егоров А. В. / Прикладная физика. 2025. № 6. С. 7.
6. Букингом М. Шумы в электронных приборах и устройствах. – М.: «Мир», 1986. С. 193.
7. Вильдяева М. Н., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Макарова Э. А., Скребнева П. / Прикладная физика. 2017. № 6. С. 54.
8. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 282–287.
9. Busta H. H., Waggener H. A. / Journal of Electrochemical Society. 1977. Vol. 124. № 9. P. 1424–1429.
10. Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Скребнева П. С., Хлызова У. Д. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 13. № 6. С. 511–514.
11. Hsu S. T., Whittier R. J., Mead C. A. / Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13. P. 1055–1070.
12. Mori Y., Takeda K., Yamada R. / Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 107. P. 014509.
13. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. – McGraw-Hill, 1969. P. 178–179.

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

The effect of microdefects on the current-voltage characteristics and noise of silicon photodiodes

K. O. Boltar^{1,2}, M. N. Vildyaeva¹, S. S. Demidov¹, E. A. Klimanov^{1,3*}, D. S. Konorev¹,
E. A. Makarova¹, D. S. Molchanov¹, K. A. Popov¹, V. V. Poluneev¹,
and A. A. Zhukovich-Gordeeva¹

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

* E-mail: klimanov3@mail.ru

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

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

Received 27.03.2026; revised 7.04.2026; accepted 27.04.2026

A study was conducted of defects causing leakage currents and noise in the p^+-n junctions of silicon photodiodes. It was established that the tunneling component of dark currents is caused by local defects in the oxide and impurity precipitates in the space charge region of the $p-n$ junction. The flow of tunneling currents leads to the generation of noise with a wide spectrum, including "burst" noise.

Keywords: silicon photodiode, microdefects, tunneling currents, current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L. and Fisher A. W., Journal of Electrochemical Society **3**, 667–668 (1982).
2. Boltar K. O., Vildyaeva M. A., Irodov N. A., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., Malygin V. A., Molchanov D. S., Makarova E. A., Applied Physics, № 2, 39 (2025).
3. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., and Falster R. J., Journal of Applied Physics **118**, 215706 (2015).
4. Rejvi K. Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii. Moscow: "Mir", 1984, pp. 269.
5. Boltar K. O., Vildyaeva M. A., Demidov S. S., Klimanov E. A., Molchanov D. S., Makarova E. A., Popov K. A., Zhukovich-Gordeeva A. A., and Egorov A. V., Applied Physics, № 6, 5 (2025).
6. Bukingem M. Shumy v elektronnykh priborax i ustroystvax. Moscow: "Mir", 1986, pp. 193.
7. Vil'dyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., and Fokina A. S., Applied Physics, № 6, 54 (2017) [in Russian].
8. Vil'dyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., and Fokina A. S., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **5** (3), 282–287 (2017) [in Russian].
9. Busta H. H. and Waggner H. A., Journal of Electrochemical Society **124** (9), 1424–1429 (1977).
10. Vil'dyaeva M. N., Demidov S. S., Demidova Yu. S., Klimanov E. A., Skrebneva P. S., and Khlyzova U. D., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **13** (6), 511–514 (2023) [in Russian].
11. Hsu S. T., Whittier R. J., and Mead C. A., Solid-State Electronics **13**, 1055–1070 (1970).
12. Mori Y., Takeda K., and Yamada R., Journal of Applied Physics **107**, 014509 (2010).
13. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. McGraw-Hill, 1969, pp.178–179.

Об авторах

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

Вильдяева Мария Николаевна, инженер 1 категории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: mari.vildyaeva@mail.ru

Демидов Станислав Стефанович, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). SPIN-код: 2028-9758, AuthorID: 780596

Климанов Евгений Алексеевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9); МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 78). E-mail: klimanov3@mail.ru SPIN-код: 7697-4688, AuthorID: 171375

Коноров Дмитрий Сергеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: konorev.dima@mail.ru

Молчанов Дмитрий Сергеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Макарова Элина Алексеевна, инженер 2 категории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Попов Константин Алексеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: kostya.popov.2001@gmail.com SPIN-код: 5321-4009

Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). SPIN-код: 5228-6837, AuthorID: 780556

Жукович-Гордеева Александра Александровна, инженер 2 категории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

УДК 533.9.03, 537.528
EDN: PTXWBW

PACS: 52.77.-j

Конверсия CO_2 в микроволновом разряде в жидком метаноле© Т. С. Батукаев¹, И. В. Билера¹, Г. В. Крашевская^{1,2}, Ю. А. Лебедев^{1*}, В. К. Шумилов¹¹ Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук,
Москва, 119991 Россия

* E-mail: lebedev@ips.ac.ru

² Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ), Москва, 115409 Россия

Статья поступила в редакцию 20.01.2026; после доработки 9.02.2026; принята к публикации 27.04.2026

Показана зависимость степени разложения CO_2 и концентрации основных продуктов (H_2 и CO) от скорости потока CO_2 на входе реактора. Максимальная степень разложения CO_2 достигла 75%.***Ключевые слова:*** микроволновый разряд в жидком метаноле, разложение CO_2 , хроматография продуктов разряда, получение синтез-газа.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-43-46

Введение

В настоящее время активно изучаются технологии разложения и конверсии углекислого газа (CO_2) в химически ценные продукты. Эта задача имеет важное значение для обеспечения экологической безопасности процессов, одним из продуктов которых является углекислый газ. Эффективным способом её решения является использование низкотемпературной плазмы, создаваемой различными типами электрических разрядов [1].

Исследование процесса конверсии CO_2 ведется, в основном, в плазме газовых разрядов. Известно, что добавление компонентов таких, как метан и водород, позволяет существенно повысить степень разложения CO_2 . Так, положительное влияние водорода и метана на конверсию CO_2 подтверждено в барьерных разрядах, скользящих дугах и микроволновых разрядах в газовой фазе (см., например, [2–8]). Введение паров метанола в смеси с CO_2 способствует не только увеличению степени разложения, но и образованию синтез-газа [8, 9]. Полученные степени конверсии CO_2 не превышают 20 %.

В работе [9] был продемонстрирован новый подход к плазменному преобразованию смеси CO_2 и паров метанола в устройстве со скользящей дугой при атмосферном давлении, позволяющий получить синтез-газ при одновременной конверсии CO_2 с эффективностью до 20 %. По аналогии с традиционным сухим риформингом метана, данный процесс авторами назван «сухим риформингом метанола».

Высокую степень конверсии CO_2 демонстрируют микроволновые разряды, инициируемые в жидкой фазе, где разряд зажигается в газовом пузыре у конца микроволновой антенны. Одним из важных преимуществ таких систем является естественная реализация процесса закалки продуктов процесса на этапе послесвечения разряда (после отрыва газового пузыря от антенны), вызванного испарением жидкости в горячий газовый пузырь. Это существенно повышает эффективность разложения CO_2 . В частности, в работе [10] при атмосферном давлении и использовании микроволнового разряда в жидких углеводородах была достигнута степень разложения CO_2 до 60 %. В микроволновом разряде в водном растворе этанола степень конверсии CO_2 до-

стигала 45 % [11]. Важно отметить, что в этих условиях продуктом является синтез-газ, который служит сырьем для получения различных химических соединений. Недостатком использования таких жидкостей было образование сажи. В [11] для подавления процесса сажеобразования использовался не чистый этанол, а его водный раствор, что, негативно влияло на конверсию CO_2 .

Поэтому перспективным представляется исследование конверсии CO_2 в микроволновом разряде в жидком метаноле, который является простейшим представителем гомологического ряда спиртов и в плазме которого образуются H_2 и CH_4 , но отсутствует образование сажи. [12].

В настоящей работе впервые представлены результаты экспериментального исследования конверсии CO_2 при пропускании его через микроволновый разряд в метаноле. Особый акцент сделан на определении степени разложения CO_2 и состава основных газообразных продуктов.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, используемая для генерации и исследования СВЧ-разряда в жидкостях, подробно описана в [10, 11]. СВЧ-система включает в себя магнетронный СВЧ-генератор (2,45 ГГц) и элементы, необходимые для управления и измерения падающей микроволновой мощности. Эксперименты проводились при падающей микроволновой мощности 490 Вт. Разрядная секция представляет собой волноводно-коаксиальный переход, центральный проводник которого служит антенной для ввода СВЧ-энергии в реактор. Разряд создавался вблизи кончика антенны в кварцевом реакторе (диаметр 55 мм), заполненном метанолом и помещенном в защитную металлическую сетку (шаг ячеек 0,5 мм). Для облегчения возникновения разряда на расстоянии 3 мм над центральным проводником располагался стержень из вольфрама диаметром 3 мм. Центральный проводник коаксиальной линии представляет собой вольфрамовую трубку (внешний диаметр 3,0 мм, диаметр канала 1 мм), через которую в жидкость подавался углекислый газ. Объем метанола в реакторе составляет около 40 мл, что

обеспечивает расположение конца центрального электрода коаксиальной линии ниже поверхности жидкости.

CO_2 с расходом от 110 до 670 мл/мин проходил через расходомер РРГ-20 и вводился в реактор через канал в антенне. Давление над поверхностью жидкости было близко к атмосферному. Продолжительность эксперимента составляла около одной минуты. В течение этого времени измерялся поток газа на выходе из реактора и после установления стационарного режима отбиралась проба газа для анализа состава продуктов. В ходе одного эксперимента состав жидкости в реакторе не обновлялся.

Для отделения газообразных продуктов плазмохимических реакций от испаренных жидких продуктов использовался водяной холодильник. Сконденсированная жидкость возвращалась в реактор. Скорость потока газовой смеси на выходе разряда после водяного холодильника измерялась механическим расходомером.

Состав газовой фазы (CO , CO_2 , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 и CH_4) на выходе из реактора с разрядом определялся на портативном газовом хроматографе с обратной продувкой ПИА (НПФ МЭМС, Россия) с катарометром и двумя хроматографическими колонками с использованием адсорбентов Hayesep N и молекулярных сит 13X. Газ-носитель – аргон.

Основными продуктами разряда являются H_2 и CO . К неосновным компонентам смеси относятся CO_2 , CH_4 , C_2H_2 и C_2H_4 . В настоящей работе мы концентрируем внимание на изучении процесса разложения CO_2 и производства синтез-газа.

Степень разложения CO_2 (α) рассчитывали по скоростям потока продуктов на выходе из реактора по формулам:

$$\alpha = \frac{\text{CO}_2^{\text{вх}} - \text{CO}_2^{\text{вых}}}{\text{CO}_2^{\text{вх}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где $\text{CO}_2^{\text{вх}}$ – скорость потока CO_2 на выходе реактора, а $\text{CO}_2^{\text{вых}}$ – скорость потока CO_2 на входе в реактор. Эти величины получены по измеренной суммарной скорости потока газов на выходе реактора и соответствующей концентрации компонент.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости концентраций основных компонентов газовой смеси на выходе разряда от скорости потока CO_2 на входе реактора. Уменьшение концентрации водорода при увеличении скорости потока CO_2 связано, по-видимому, с разбавлением паров метанола углекислым газом, а также с уменьшением времени пребывания реакционной смеси в области разряда. Заметим, что время пребывания уменьшается и из-за уменьшения времени жизни газового пузыря с плазмой при увеличении скорости потока CO_2 .

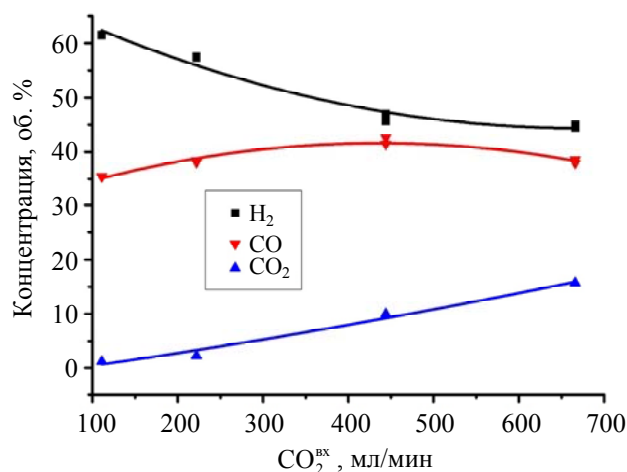


Рис. 1. Зависимость концентраций основных продуктов от потока CO_2

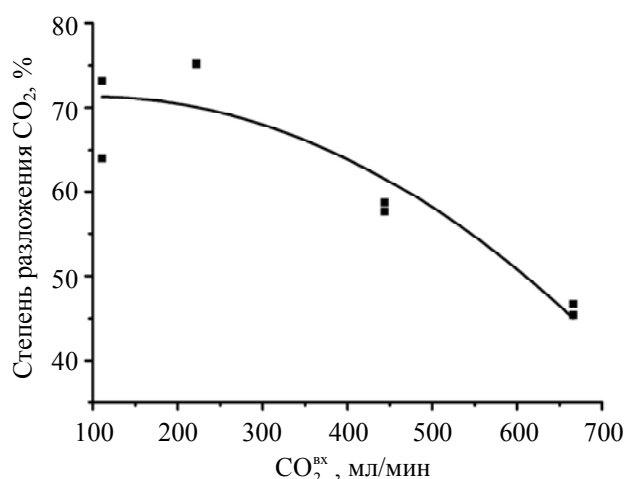


Рис. 2. Зависимость степени разложения CO_2 от потока CO_2 на входе

На рис. 2 показана зависимость степени разложения CO_2 от скорости его потока на входе реактора. Уменьшение степени разложения CO_2 связано с уменьшением времени пребывания реакционной смеси в области разряда.

Заключение

Представленные результаты показывают, что микроволновый разряд в жидком метаноле может быть эффективным средством разложения углекислого газа при одновременном получении синтез газа. Полученная степень конверсии углекислого газа превышает значения, полученные в микроволновом разряде в водном растворе этанола.

Работа выполнена в рамках Госзадания
ИНХС РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogaerts A., Centi G. / Front. Energy Res. 2020. Vol. 8. P. 111.
2. Aerts R., Snoeckx R., Bogaerts A. / Plasma Process. Polym. 2014. Vol. 11. № 10. P. 985.
3. Kim S. C., Lim M. S., Chun Y. N. / Plasma Chem. Plasma Process. 2014. Vol. 34. P. 125.
4. Van Alphen S., Wanten B., Girard-Sahun F., Slaets J., Creel J., Aghaei M., Bogaerts A. / Sustain. Chem. Eng. 2024. Vol. 12. № 42. P. 15715.
5. Mei D., Duan G., Fu J., Liu S., Zhou R., Zhou R., Ostrikov K. K. / J. CO₂ util. 2021. Vol. 53. P. 101703.
6. Wanten B., Gorbanev Y., Bogaerts A. / Fuel. 2024. Vol. 374. P. 132355.
7. Kelly S., Mercer E., De Meyer R., Ciocarlan R. G., Bals S., Bogaerts A. / J. CO₂ Util. 2023. Vol. 75. P. 102564.
8. Czulowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasinski M., Dors M., Mizeraczyk J. / Int. J. Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. № 40. P. 14039.
9. Zhang H., Li X., Zhu F., Cen K., Du C., Tu X. / Chem. Eng. J. 2017. Vol. 310. P. 114.
10. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., Nazarov N. A. / Plasma. 2023. Vol. 6. № 1. P. 115.
11. Батукаев Т. С., Билера И. В., Крашевская Г. В., Лебедев Ю. А., Шумилов В. К. / Письма в ЖТФ. 2025. Т. 51. № 21. С. 50.
12. Niu Y. L., Li S. Z., Wang X. C., Cao S. L., Yang D., Zhang J. / J. Appl. Phys. 2023. Vol. 134. № 1. P. 013304.

Conversion of CO₂ in microwave discharge in liquid methanol

T. S. Batukaev¹, I. V. Bilera¹, G. V. Krashevskaya^{1,2}, Yu. A. Lebedev^{1*}, and V. K. Shumilov¹

¹ A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences (TIPS RAS),
Moscow, 119991 Russia

* E-mail: lebedev@ips.ac.ru

² Institute LAPLAZ, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia

Received 20.01.2026; revised 9.02.2026; accepted 27.04.2026

The dependence of the degree of CO₂ decomposition and the concentration of the main products (H₂ and CO) on the CO₂ flow rate at the reactor inlet is shown. The maximum degree of CO₂ decomposition reached 75 %.

Keywords: microwave discharge in liquid methanol, CO₂ decomposition, chromatography of discharge products, production of synthesis gas.

REFERENCES

1. Bogaerts A. and Centi G., *Front. Energy Res.* **8**, 111 (2020).
2. Aerts R., Snoeckx R., and Bogaerts A., *Plasma Process. Polym.* **11** (10), 985 (2014).
3. Kim S. C., Lim M. S., and Chun Y. N., *Plasma Chem. Plasma Process* **34**, 125 (2014).
4. Van Alphen S., Wanten B., Girard-Sahun F., Slaets J., Creel J., Aghaei M., and Bogaerts A., *Sustain. Chem. Eng.* **12** (42), 15715 (2024).
5. Mei D., Duan G., Fu J., Liu S., Zhou R., Zhou R., and Ostrikov K. K., *J. CO₂ Util.* **53**, 101703 (2021).
6. Wanten B., Gorbanev Y., and Bogaerts A., *Fuel* **374**, 132355 (2024).
7. Kelly S., Mercer E., De Meyer R., Ciocarlan R. G., Bals S., and Bogaerts A., *J. CO₂ Util.* **75**, 102564 (2023).
8. Czykowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasinski M., Dors M., and Mizeraczyk J., *Int. J. Hydrogen Energy* **40** (40), 14039 (2015).
9. Zhang H., Li X., Zhu F., Cen K., Du C., and Tu X., *Chem. Eng. J.* **310**, 114 (2017).
10. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., and Nazarov N. A., *Plasma* **6** (1), 115 (2023).
11. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., and Shumilov V. K., *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* **51** (21), 50–53 (2025).
12. Niu Y. L., Li S. Z., Wang X. C., Cao S. L., Yang D., and Zhang J., *J. Appl. Phys.* **134** (1), 013304 (2023).

Об авторах

Батукаев Тимур Саидэмиевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: batukaevtimur95@gmail.com ORCID 0000-0001-8246-0868, WOS Research ID AAQ-7536-2021, SPIN-код: 4215-8220, Scopus Author ID 57209216257

Билера Игорь Васильевич, к.х.н., ведущий научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: bilera@ips.ac.ru ORCID 0000-0001-6724-1907, WOS Research ID E-6524-2014, SPIN-код: 5140-8527, Scopus Author ID 6603277297

Крашевская Галина Витальевна, к.ф.-м.н., доцент, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29); Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ) (115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31). E-mail: krashevskaya-gv@mail.ru ORCID 0000-0001-6724-1907, WOS Research ID N-5208-2017, SPIN-код: 1186-9514, Scopus Author ID 35776305000

Лебедев Юрий Анатольевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: lebedev@ips.ac.ru ORCID 0000-0001-5374-3957, WOS Research ID E-5939-2014, SPIN-код: 2509-0361, Scopus Author ID 57203810439

Шумилов Владислав Константинович, студент, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: shumilow.vladislav@yandex.ru SPIN-код: 8718-2948, AuthorID: 1318446

УДК 537.868.4
EDN: QIRRAWA

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

**Воздействие плазмы на резонансное рассеяние магнитного поля
диэлектрическим кольцом**

© М. С. Доброклонская*, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия***E-mail: m.dobro42@gmail.com**Статья поступила в редакцию 2.03.2026; после доработки 23.03.2026; принята к публикации 27.04.2026**Шифр научной специальности: 1.3.9*

Экспериментально изучены спектры резонансного рассеяния на основной магнитной моде структур, состоящих из субволнового тонкого диэлектрического кольца и плазмы низкого давления. Плазма создавалась в линейной и спиральной люминесцентных лампах, возбуждаемых плоской СВЧ-волной. Обнаружено, что при включении разряда амплитуда индуцированного кольцом магнитного поля на резонансной частоте кольца значительно уменьшается. Эффект уменьшения реализуется при определенной ориентации разряда относительно кольца. Компьютерное моделирование подтверждает эффект уменьшения индуцированного кольцом магнитного поля на резонансной частоте. Электрический разряд может быть использован для переключения резонансных электромагнитных полей диэлектрических элементов в фильтрах, антеннах, системах перераспределения энергии.

Ключевые слова: разряд низкого давления, диэлектрический магнитный диполь, диэлектрическое кольцо, плоская СВЧ-волна, резонанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-47-52

Введение

Для создания метаматериалов [1], метаповерхностей [2] антенн [3–5], систем фильтрации и перераспределения излучения [6, 7], идеальных линз [8] применяются резонансные элементы различных типов [9–11]. Первые метаматериалы были созданы на основе резонансного LC-контура в виде металлического кольца с тонкой щелью [12, 13], свойства которого хорошо известны и резонансная частота может быть рассчитана на основе емкости и самоиндуктивности, а магнитные поля из закона Био-Савара-Лапласа. На основе таких элементов было создано достаточно много конструкций для микроволновой области, в фильтрах и в антенной технике. Замена металлических метаземента диэлектрическими является одной из возможностей снизить диссипативные потери на высоких частотах.

Однако даже в простых диэлектрических телах, например, сфера, диск, цилиндр, электромагнитная волна инициирует много различных типов резонансов, частоты которых могут совпадать, поэтому расчеты резонансных частот и полей рассеяния для диэлектрических тел становятся сложной задачей [14–19]. Исследования показали, что субволновое диэлектрическое кольцо является идеальным магнитным диполем [20] с основной резонансной частотой, которую можно рассчитать из понятий емкости и самоиндуктивности, а поля рассеяния из закона Био-Савара-Лапласа. Следовательно, диэлектрическое кольцо можно использовать в конструкциях, которые уже созданы на основе металлического кольцевого диполя.

Целью работы являлось исследование резонансного магнитного поля системы из диэлектрического кольца и плазменного эле-

мента в виде положительного столба разряда низкого давления при возбуждении плоской ЭМ-волной СВЧ-диапазона.

Результаты экспериментов и компьютерного моделирования

Схема проведения экспериментов по измерению магнитных полей структуры из диэлектрического кольца и дополнительного проводящего элемента, возбуждаемой плоской электромагнитной волной, была аналогична использованной нами ранее [21]. Задающим генератором служил один из каналов спектроанализатора Agilent E5071C ENA Network Analyzer, сигнал от которого поступал на усилитель (20 дБ) и далее на рупорную антенну ETS-Lindgren's model 3115, которая формировала плоскую линейно поляризованную волну. Магнитные поля измерялись датчиком Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром кольца детектора 3,7 мм, сигнал с которого поступал на вход анализатора спектров Agilent E5071C ENA Network Analyzer. Плоская СВЧ-волна возбуждала систему из диэлектрического кольца ($\epsilon = 149$, $\text{tg}\alpha = 0,0003$, внешний диаметр 38 мм, внутренний 28 мм, высота 5 мм) и плазменного элемента. В качестве плазменного элемента использовались прямые и спиральные люминесцентные лампы.

На рисунке 1 показана система из диэлектрического кольца, расположенного сверху на спиральной лампе мощностью 13 Вт с внешним диаметром колец 38 мм и диаметром плазмы 7 мм. Кольцо с лампой расположены на расстоянии 25 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор и вектор электрического поля плоской падающей волны были параллельны плоскости диэлектрического кольца и колец газоразрядной лампы, а вектор магнитного поля волны перпендикулярен. Диэлектрическое кольцо помещалось либо непосредственно на лампу, либо над верхним кольцом лампы на расстоянии 5 мм. Поскольку конструктивно спираль лампы свернута в торце, то диэлектрическое кольцо тесно примыкает только к полукольцу спирали лампы. Зонд магнитного поля был расположен с дальней от антенны стороны диэлектрического кольца. Расстояние от края кольца до зонда

составляло 10 мм, поэтому зонд измеряет резонансный спектр прошедшего сигнала в ближней зоне кольца. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна вектору магнитного поля и параллельна волновому вектору и вектору электрического поля падающей волны.



Рис. 1. Фотография системы диэлектрическое кольцо на спиральной лампе. Справа расположен зонд магнитного поля

Экспериментальные результаты измерений спектров магнитного поля кольца и спиральной лампы приведены на рисунке 2. При выключенной лампе наблюдается стандартный резонансный пик магнитного диполя (кривая 1). При создании плазмы в лампе (лампа включена) резонансный пик пропадает (кривая 2). Кривая 3 представляет фоновый сигнал с зонда, когда нет кольца и лампа выключена. Включенная лампа с плазмой (без кольца) незначительно экранирует прошедший сигнал (кривая 4). При других расположениях диэлектрического кольца около спиральной лампы такого сильного эффекта затухания резонансной частоты не наблюдается. Следовательно, эффект взаимодействия полей диэлектрического кольца с плазменным полукольцом возникает только при близком взаимодействии индуцированного электрического поля в диэлектрическом кольце с плазмой в лампе, в результате чего в плазме протекает наведенный ток с диссипацией энергии. Если длина взаимодействия мала, то и затухание мало. При удалении кольца от лампы более 5 мм эффект резко ослабевает. Таким образом, плазменный элемент в виде электрического разряда низкого давления может выполнять роль ключа, с помощью которого можно включать и выключать резонансный элемент.

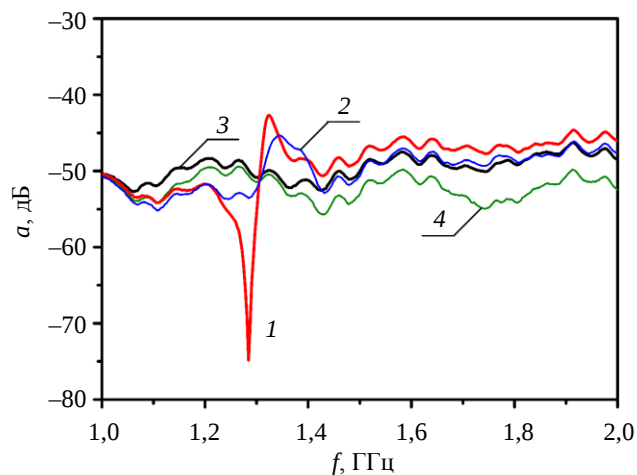


Рис. 2. Измеренные спектры магнитного поля.
 1 – кольцо на лампе без плазмы (красная линия 1);
 2 – кольцо на лампе с плазмой (синяя линия 2);
 3 – без кольца, лампа без плазмы (черная линия 3);
 4 – без кольца, лампа с плазмой (зеленая линия 4)

По оценкам, исходя из мощности лампы и ее тока, средняя концентрация электронов составляет порядка 10^{13} см^{-3} при типичной напряженности электрического поля в столбе около 1 В/см, поэтому плазменная частота на порядок превышает область резонансных частот диэлектрического кольца. Следовательно, экспериментальное и компьютерное моделирование можно проводить, используя вместо плазмы медный провод в форме полукольца, помещенный сверху на диэлектрическое кольцо. Для выделения рассеянной составляющей магнитного поля исследуемой системы перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения иницирующей волны с зондом при отсутствии тестовых объектов. Затем фоновый сигнал вычитали из измеренного сигнала при наличии тестовых элементов. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программы CST Microwave Studio. Параметры расчета были заданы в соответствии с условиями эксперимента для медного провода (проводимость 58 млн См/м) диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм. Полукольцо располагалось в разных положениях на диэлектрическом кольце. Результаты экспериментов и расчетов с медным полукольцом, расположенным выпуклостью к зонду, приведены на рис. 3. Видно, что рассчитанные и экспериментальные резонансные спектры одиночного диэлектрического кольца хорошо согласуются по частоте (кривые 1 и 2). При добавлении

медного полукольца резонансная частота сдвигается в сторону низких частот и уменьшается по амплитуде, как в экспериментах, так и при расчетах (кривые 3 и 4). Уменьшение резонансной частоты связано с увеличением эффективной емкости в резонансной цепи при добавлении металлического полукольца. В случае плазмы возникает еще и диссипация энергии, поэтому и амплитуда рассеянного магнитного поля сильно затухает.

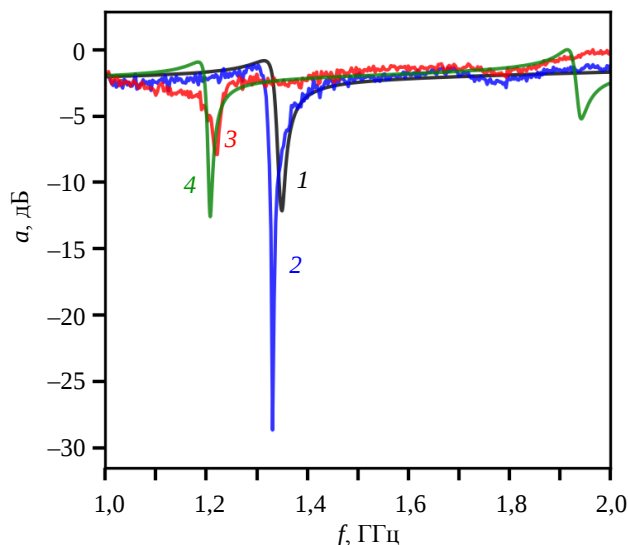


Рис. 3. Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм выпуклостью к зонду. Расстояние от кольца до зонда 30 мм: 1 (черный) – расчет, одиночное диэлектрическое кольцо, $f_0 = 1,350 \text{ ГГц}$, $a_0 = -11,832 \text{ дБ}$; 2 (синий) – эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо $f_0 = 1,331 \text{ ГГц}$, $a_0 = -28,675 \text{ дБ}$; 3 (красный) – эксперимент, металлическое полукольцо $f_0 = 1,222 \text{ ГГц}$, $a = -7,903 \text{ дБ}$; 4 (зеленый) – расчет, медное полукольцо $f_0 = 1,208 \text{ ГГц}$

Были также исследованы системы диэлектрическое кольцо и линейные лампы низкого давления с мощностями 12 Вт и 15 Вт диаметрами 12,5 мм и 26 мм, длинами 370 мм и 430 мм, соответственно, а также медные провода разной длины для замены лампы. Лампа или медный провод были расположены сразу после диэлектрического кольца перпендикулярно волновому вектору и параллельно вектору электрического поля падающей СВЧ-волны. Зонд расположен после лампы или проводника на расстоянии от кольца 30 мм. Пример результатов экспериментов и расчетов для системы кольцо и медный провод

длиной полуволны на резонансной частоте (115 мм) показан на рис. 4. Рассчитанный и экспериментальный спектры хорошо совпадают по резонансной частоте (кривые 1 и 2). При добавлении провода за кольцом происходит затухание амплитуды магнитного поля на резонансной частоте как в эксперименте (кривая 3), так и при расчетах (кривая 4).

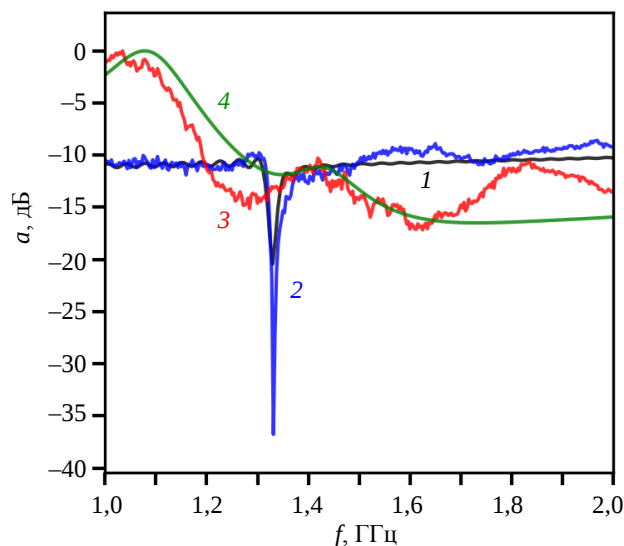


Рис. 4. Резонансные спектры магнитного поля для кольца и прямого проводника длиной полволны (115 мм): 1 (черный) – расчет, одиночное диэлектрическое кольцо, $f_0 = 1,350$ ГГц, $a_0 = -11,832$ дБ; 2 (синий) – эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо $f_0 = 1,331$ ГГц, $a_0 = -28,675$ дБ; 3 (красный) – эксперимент, кольцо с проводником; 4 (зеленый) – расчет, кольцо с проводником

Следует отметить, что затухание резонансной амплитуды магнитного поля происходит только при определенной ориентации лампы относительно диэлектрического кольца. Если кольцо надето на лампу, т. е. оси лампы и кольца совпадают, то влияния лампы на спектр не оказывает. Нет влияния, если ось лампы параллельна магнитному полю и в других положениях лампы около кольца. Наибольшее влияние лампы и проводник оказывают в положении, когда они параллельны вектору электрического поля. Если проводник или лампа параллельны волновому вектору, то влияние на резонансный спектр кольца они оказывают только в случае, когда часть лампы или провода находится на левой или правой половине кольца, т. е. они могут взаимодействовать с электрическим полем половины кольца. Если лампа или провод проходят

через центр кольца, то влияния нет. Следовательно, прямая лампа или прямой проводник могут взаимодействовать либо через круговые электрические поля кольца, как в случае спиральной лампы, либо создать дополнительную резонансную систему и экранировать проходящую волну, индуцируемую резонансным полем диэлектрического кольца. Во втором случае высокая проводимость оказывается более важным фактором, чем затухание в плазме, что подтверждается расчетами. Следовательно, плазменный элемент в виде прямой лампы может также включать или выключать проходящую резонансную волну или резонансное магнитное поле. Такие ключи могут найти применение в фильтрах, антеннах, системах перераспределения СВЧ-энергии.

Заключение

Исследованы резонансные спектры рассеяния системы диэлектрическое кольцо - плазменный элемент. Обнаружено, что при включении разряда резко возрастает затухание амплитуды рассеянного резонансного магнитного поля кольца. Экспериментальное и компьютерное моделирование при замене плазмы медным проводом показало, что в случае полукольца происходит сдвиг плазменной частоты и затухание амплитуды. В случае прямого провода и прямой лампы происходит резонансное взаимодействие подающей плоской ЭМ-волны не только с диэлектрическим кольцом, но и с прямым проводом, в результате чего наиболее сильное взаимодействие происходит в случаях, когда длина провода кратна четверти длины волны на резонансной частоте. Обнаружено, что сдвиг резонанса и затухание резонансного рассеяния возникает только при определенной ориентации плазменного столба относительно диэлектрического кольца, когда вектор индуцированной напряженности электрического поля параллелен оси разряда. Таким образом, плазменный элемент может выполнять роль ключа, с помощью которого можно включать и выключать резонансные рассеянные поля от диэлектрического кольца. Такие ключи могут найти применение для переключения резонансных фильтров, в антенной технике и для перераспределения потоков СВЧ-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R., Li W. / *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. P. 1069722.
2. Ремнев М. А., Климов В. В. / УФН. 2018. Т. 188. С. 169–205.
3. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., Simovski C. R. / *Physics reports*. 2016. Vol. 634. P. 1–72.
4. Engheta N. / *IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2002. Vol. 1. № 1. P. 10–13.
5. Paniagua-Dominguez R., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. I. Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas. In *Dielectric Metamaterials*. – Woodhead Publishing, 2020. P. 73–108.
6. Lagarkov A., Kissel V. / *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 92. № 7. P. 077401
7. Климов В. В. / УФН. 2021. Т. 191. С. 1044–1076.
8. Лагарьков А. Н., Сарычев А. К., Кисель В. Н., Тартаковский Г. / УФН. 2009. Т. 179. С. 1018–1027.
9. Рыбин М. В., Лимонов М. Ф. / УФН. 2019. Т. 189. С. 881–898.
10. Климов В. В. / УФН. 2023. Т. 193. С. 279–304.
11. Климов В. В. / УФН. Т. 189. С. 1131–1133.
12. Pendry J. B. / *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. № 18. P. 3996.
13. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. / *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 84. P. 4184–4187.
14. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A. et al. / *Sci Rep*. 2017. Vol. 7. P. 731.
15. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Jimenez S., Vasilyak L. M., Vrazquez L., Vetchinin S. P. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. Vol. 54. P. 075004.
16. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Dominguez R., Fedyanin A. A. / *Sci Rep-UK*. 2021. Vol. 11. P. 23453.
17. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., Luk'yanchuk B. / *Sci Rep-UK*. 2022. Vol. 12. № 05. P. 7997.
18. Kapitanova P., Zanganeh E., Pavlov N., Song M., Belov P., Evlyukhin A., Miroshnichenko A. / *Annalen der Physik*. 2020. Vol. 532. № 12. P. 2000293.
19. Enriquez J. A., Balafendiev R., Millar A. J., Simovski C., Belov P. / *Physical Review Applied*. 2025. Vol. 23. № 5. P. 054053.
20. Bukharin M. M., Vasilyak L. M., Basharin A., Luk'yanchuk B., Ospanova A., Pecherkin V. Ya. / *Journal of Applied Physics*. 2025. Vol. 137. P. 203101.
21. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Бухарин М. М., Доброклонская М. С. / *Прикладная физика*. 2023. № 5. С. 15–21.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

The effect of plasma on resonant scattering of a magnetic field by a dielectric ring

M. S. Dobroklonskaya*, V. Ya. Pecherkin, and L. M. Vasilyak

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

*E-mail: m.dobro42@gmail.com

Received 2.03.2026; revised 23.03.2026; accepted 27.04.2026

The resonance scattering spectra on the main magnetic mode of structures made of a subwavelength dielectric thin ring and a low-pressure discharge plasma in a linear fluorescent lamp and a spiral lamp excited by an incident plane electromagnetic wave of the microwave range have been experimentally studied. It was found that when the discharge is turned on, the amplitude of the magnetic field induced by the ring at the resonant frequency of the ring decreases significantly. The reduction effect is realized with a certain orientation of the discharge relative to the ring. Computer simulation confirms the effect of reducing the magnetic field induced by the ring at the resonant frequency. An electric discharge can be used to switch the resonant electromagnetic fields of dielectric elements in filters, antennas, and energy redistribution systems.

Keywords: low pressure discharge, dielectric magnetic dipole, negative magnetic response, dielectric ring, plane microwave, resonance.

REFERENCES

1. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R., and Li W., *Frontiers in Physics* **10**, 1069722 (2022).
2. Remnev M. A. and Klimov V. V., *Phys. Usp.* **61**, 157–190 (2018).

3. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., and Simovski C. R., *Physics reports* **634**, 1–72 (2016).
4. Engheta N., *IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters* **1** (1), 10–13 (2002).
5. Paniagua-Dominguez R., Luk'yanchuk B., and Kuznetsov A. I., *Control of scattering by isolated dielectric nano-antennas*. In *Dielectric Metamaterials*. Woodhead Publishing, 2020, pp. 73–108.
6. Lagarkov A. and Kissel V., *Pys. Rev. Lett.* **92** (7), 077401 (2004).
7. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **64**, 990–1020 (2021).
8. Lagarkov A. N., Sarychev A. K., Kissel V. N., and Tartakovsky G., *Phys. Usp.* **52**, 959–967 (2009).
9. Rybin M. V. and Limonov M. F., *Phys. Usp.* **62**, 823–838 (2019).
10. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **66**, 263–287 (2023).
11. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **62**, 1058–1059 (2019).
12. Pendry J. B., *Phys. Rev. Lett.* **85** (18), 3996 (2000).
13. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184–4187 (2000).
14. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A., et al., *Sci Rep.* **7**, 731 (2017).
15. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Jimenez S., Vasilyak L. M., Vrazquez L., and Vetchinin S. P., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 075004 (2021).
16. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Dominguez R., and Fedyanin A. A., *Sci Rep-UK* **11**, 23453 (2021).
17. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., and Luk'yanchuk B., *Sci Rep-UK* **12** (05), 7997 (2022).
18. Kapitanova P., Zanganeh E., Pavlov N., Song M., Belov P., Evlyukhin A., and Miroshnichenko A., *Annalen der Physik* **532** (12), 2000293 (2020).
19. Enriquez J. A., Balafendiev R., Millar A. J., Simovski C., and Belov P., *Physical Review Applied* **23** (5), 054053 (2025).
20. Bukharin M. M., Vasilyak L. M., Basharin A., Luk'yanchuk B., Ospanova A., and Pecherkin V. Ya., *Journal of Applied Physics* **137**, 203101 (2025).
21. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Bukharin M. M., and Dobroklonskaya M. S., *Applied Physics*, № 5, 15–21 (2023) [in Russian].

Об авторах

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: m.dobro42@gmail.com SPIN-код: 5232-9283, AuthorID: 1175259

Печеркин Владимир Яковлевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpecherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, Author ID: 1089774, ORCID 0000-0001-7470-5132, Scopus ID: 6507468054

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus ID 7004886755

УДК 537.52
EDN: QJPRIK

PACS: 52.80.Wq

**Динамика межфазной границы в системе «вода–масло»
при электрическом пробое**

© В. А. Панов*, А. С. Савельев, Ю. М. Куликов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

*E-mail: panovvladislav@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9.02.2026; после доработки 5.03.2026; принята к публикации 27.04.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9

В работе экспериментально и с помощью численного моделирования в осесимметричной трехмерной постановке рассмотрена задача формирования конической поверхности границы раздела «вода–трансформаторное масло» при подаче высоковольтного напряжения на электроды. Благодаря использованию электродов цилиндрической формы с заруглением торцов удалось провести более детальное численное моделирование, результаты которого хорошо согласуются с данными эксперимента. Показано, что для отслеживания границы следует использовать профили фазовой переменной и нормированной осевой скорости. Предложенный метод моделирования процесса может помочь проводить предварительную оценку устойчивости высоковольтного маслonaполненного оборудования к возникновению локальных электрических пробоев из-за возможного появления влажности.

Ключевые слова: проводящая вода, трансформаторное масло, импульсное электрическое поле, водяной конус, ЭГД-течения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-53-59

Введение

Влажность в масляной изоляции высоковольтного оборудования является критическим фактором риска, способствующим иницированию электрического пробоя, который может привести к катастрофическим последствиям. Особую опасность представляет наличие протяженной (по сравнению с зазорами в высоковольтном оборудовании) границы раздела фаз «вода–масло», поведение которой в импульсном электрическом поле до конца не изучены, а механизм электрического пробоя в таком случае требует детального изучения.

Наличие даже следовых количеств воды в трансформаторном масле резко снижает его диэлектрическую прочность. Это связано с тем, что вода, обладающая высокой диэлек-

трической проницаемостью ($\epsilon \sim 80$) относительно масла ($\epsilon \sim 2,2$) и электропроводностью, в неоднородном поле поляризуется, формируя проводящие мостики и локально усиливая величину его напряженности [1, 2]. Конденсация влаги на внутренних поверхностях бака или образование свободных водяных капель могут привести к локальным разрядам, инициирующим внутренний пробой и аварийную разгерметизацию активной части трансформатора.

В однородных диэлектрических жидкостях превалируют два классических механизма пробоя [3]. Стримерно-лидерный (лавинный) пробой обусловлен ударной ионизацией и развитием быстрых древовидных каналов (стримеров). Он характерен для импульсных воздействий (нано-/микросекунды) в сильных полях (>100 кВ/см) и хорошо изучен [3, 4]. Его динамика аналогична пробую в плотных

газах, где решающую роль играет эмиссия электронов с катода и образование газовых пузырьков за счет джоулева нагрева [3–12]. Тепловой пробой происходит в более слабых, но длительно действующих полях, где нагрев жидкости от токов утечки и проводимости превышает теплоотвод, приводя к тепловой неустойчивости и образованию проводящего канала.

Фактором, существенно усложняющим картину, является наличие межфазной границы (газ-жидкость или жидкость-жидкость). Её присутствие приводит к скачку диэлектрических свойств и накоплению связанных поляризационных зарядов, что существенно снижает общую электрическую прочность промежутка. В частности, для границы «масло–вода» при средних напряженностях поля ниже 5 кВ/см развитие классических стримеров в объеме любой из жидкостей невозможно [3], а тепловой механизм в воде также не реализуется из-за емкостного характера начального тока. Таким образом, доминирующую роль начинает играть электрогидродинамическая (ЭГД) неустойчивость.

При приложении импульсного электрического поля к границе двух несмешивающихся жидкостей с разной проводимостью и проницаемостью на этой границе индуцируются свободные заряды. Взаимодействие внешнего поля с этими зарядами создает тангенциальные электростатические силы (давление), вызывающие неустойчивость границы по типу неустойчивости Тонкса-Френкеля [13]. Это приводит к нелинейной деформации границы – появлению остроконечных выступов или ячеистой структуры; ЭГД-течениям – формированию конвективных потоков в обеих жидкостях; взрывному росту возмущений – при превышении критической напряженности, выступ со стороны более проводящей жидкости (воды) может вытянуться в тонкую струю, способную быстро достичь противоположного электрода и вызвать замыкание промежутка. Этот процесс может происходить на порядки медленнее, чем стримерный пробой и приводить к замыканию промежутка.

Исследования показывают, что полярность импульса, геометрия электродов и соотношение проводимостей жидкостей являются ключевыми параметрами, определяющими

морфологию деформации и пороговую напряженность [14–17].

В работе [18] было проведено экспериментальное и численное исследование поведения границы раздела «вода–трансформаторное масло», где в качестве высоковольтного электрода выступала сфера. Результаты моделирования давали отставание от реальной высоты конуса примерно в 1,4 раза, что связывали с двумерностью постановки задачи.

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование поведения границы раздела «вода–трансформаторное масло», где в качестве высоковольтного электрода выступает цилиндр с рабочим торцом в виде полусферы. Такая постановка делает возможным трехмерное осесимметричное моделирование, которое было невозможным с предшествующей геометрией электрода из-за численных осцилляций, возникавших у противоположного от границы жидкостей полюса сферы. В случае цилиндрического электрода такой проблемы не возникает, а результаты моделирования с хорошей точностью совпадают с экспериментом.

Экспериментальная установка и методы математического моделирования

Экспериментальная установка, использованная в настоящей работе, идентична, [18] за исключением высоковольтного электрода, который в данной работе был выбран цилиндрическим, диаметром 7 мм, рабочий торец которого, обращенный к границе раздела вода–масло, выполнен в виде полусферы того же диаметра. Ниже приведем краткое описание. Для проведения исследований в прозрачную емкость из оргстекла наливается слой воды (300 мкСм/см), на который затем наливается слой трансформаторного масла. Толщина слоёв выбирается таким образом, чтобы граница раздела оказалась между верхним и нижним электродами и была равноудалена от них. Заземленный электрод, выполненный из латунного стержня диаметром 1,6 мм со скругленной кромкой на рабочем торце, помещается в слой воды. Высоковольтный электрод в виде латунного стержня диаметром 7 мм, погружается в слой масла на глубину 12 мм. Наблюдение за разрядным

промежутком ведется при помощи микроскопа МБС-10 и фотокамеры Phantom v2012. Импульс напряжения формируется при помощи полупроводникового высоковольтного коммутатора (типа «полумост»), подключенного к ударной емкости. Коммутатор способен поднимать до требуемой величины (равно как и опускать до 0) потенциал высоковольтного коммутатора за время порядка 100 нс.

Моделирование проводится в осесимметричной постановке в цилиндрической области, в которую введены два электрода. Нижний электрод имеет радиус 0,8 мм, его высота 25 мм, радиус скругления кончика электрода – 0,4 мм. Нижний электрод погружен в воду на глубину 3 мм. Внешняя цилиндрическая граница находится на расстоянии 40 мм от оси электрода. Над слоем воды толщиной 28 мм располагается слой масла толщиной 12 мм. В него полностью погружен закругленный электрод радиусом 3,5 мм. Таким образом, его нижняя поверхность находится на расстоянии 3 мм от границы раздела сред. Нижний электрод является заземленным (напряжение $V = 0$ В), на верхний подается постоянное напряжение, равное $V = 3360, 3900, 4440$ В. Область течения дополнительно разделена на несколько подобластей, которые покрываются сеткой с различными характеристиками. В частности, в областях, в которых фазовый состав не меняется, используется расчетная сетка из треугольников. Во всех остальных областях, по которым движется граница раздела фаз, задается ортогональная сетка. Для совместного решения уравнений Пуассона, Навье-Стокса, а также переноса фазы выполняется пространственная дискретизация на основе метода конечных элементов. Для дискретизации по времени используется неявная схема Эйлера с переменным шагом. В алгоритме используется расщепление по физическим процессам: на каждом шаге по времени последовательно рассчитываются электрическое поле, распределение скоростей и давлений в возникающем течении, а также движение границы раздела сред. Межфазная граница имеет конечную толщину и моделируется на основе метода Level-Set [19]. Возникновение движущей электростатической

силы обусловлено дивергенцией тензора напряжений Максвелла в среде с неоднородной диэлектрической проницаемостью.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены кинограммы движения границы раздела вода–трансформаторное масло под действием импульсного напряжения амплитудой 3360, 3900 и 4440 В. В первые моменты после подачи напряжения деформация границы вблизи оси электрода происходит практически равномерно, как и в случае сферического электрода [18]. Затем граница приобретает заметную кривизну с постоянным по знаку радиусом. При высоте около 1 мм на границе начинает формироваться острая вершина (радиус кривизны меняет свой знак). Дальнейшее движение воды вглубь масла происходит за счет обострения и вытяжения вершины границы раздела. Когда до электрода остается около 0,2 мм, с вершины конуса начинают отделяться мелкие капли: а) 42,5 мс, б) 34,826 мс, в) 29 мс – и формируют поток, который и достигает поверхности электрода. Электрический пробой (34,994 мс на рис. 1б) инициируется в результате одновременного отделения и вытяжения множества капель, которые в результате формируют тонкий водный канал, окончательно замыкающий промежуток, либо оказываются на расстояниях между собой, достаточных для пробоя масляного промежутка. Формирование плазменного канала при этом наблюдается только в тонкой верхней части конуса, где плотность тока была достаточной для теплового механизма инициации. С увеличением напряжения сокращается общее время процесса, а форма границы раздела проходит через схожие состояния (см., например, 34,826, 29 и 25 мс для а), б) и в), соответственно).

На рисунке 2 представлены кривые положения вершины конуса. Индексы «э» и «м» относятся, соответственно, к результатам эксперимента и моделирования. Трехмерная постановка задачи дает гораздо лучшее совпадение с экспериментом по сравнению с двумерной [18].

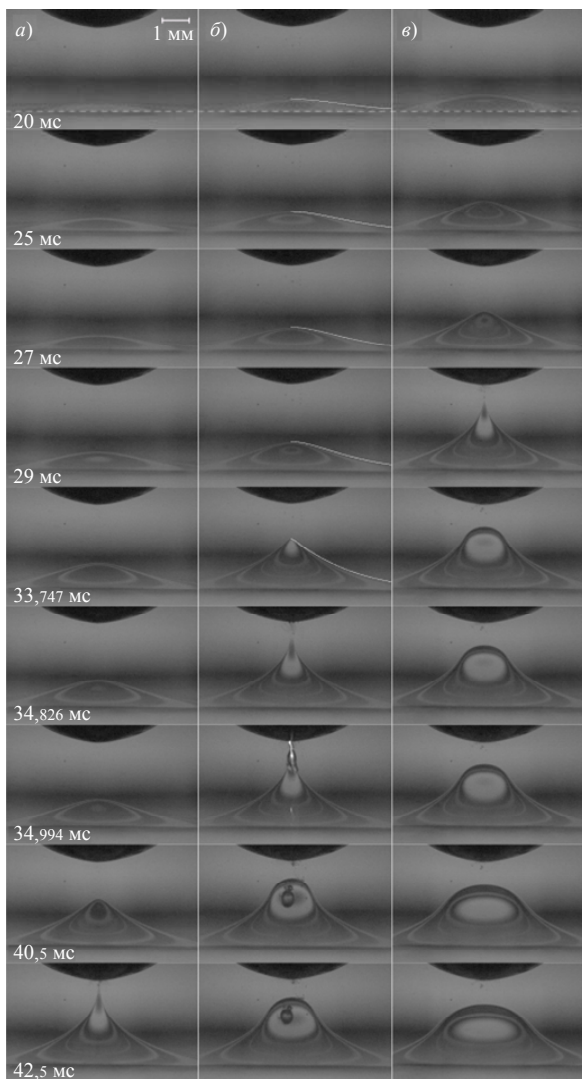


Рис. 1. Кинограмма движения границы раздела воды и трансформаторного масла в вертикальном электрическом поле при напряжении а) 3360, б) 3900, в) 4440 В. Результаты моделирования положения границы отмечены белой линией для случая 3900 В на кадрах 20–33,747 мс. Пунктиром указано положение невозмущенной границы

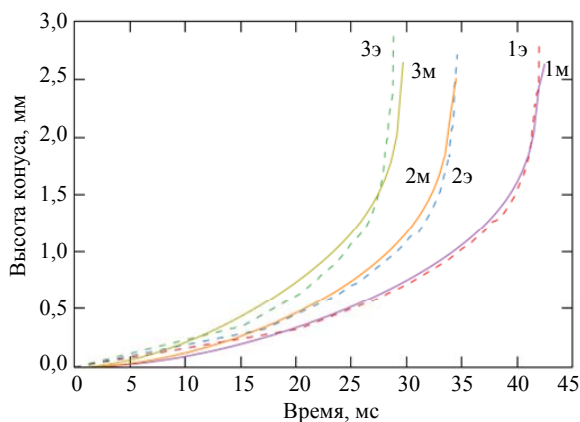


Рис. 2. Графики зависимости положения вершины конуса от времени после подачи напряжения в экспериментах (с отметкой «э») и численном моделировании (с отметкой «м») при напряжении 1) 3360, 2) 3900 и 3) 4440 В

Движение вершины происходит с постоянным увеличением скорости (кривая 2 на рис. 3) за счет постоянного увеличения сил со стороны электрического поля, возрастающего при сокращении дистанции между вершиной и поверхностью высоковольтного электрода.

На рисунке 3 представлена динамика нормированных (на максимум) величин высоты конуса H , скорости движения вершины v и объема V видимой части конуса для наиболее медленного случая 3360 В на этапе роста и спада конуса. Примечательно, что своих максимальных значений величины достигают неодновременно. Первым наступает максимум скорости – порядка 1 м/с. Это связано с началом распыления жидкости с вершины, что замедляет продвижение отчетливо видимой части вершины. Максимальное значение высоты $H_{\max}$ составляет 2,86 мм, что меньше начального расстояния в 3 мм также вследствие распыления и снятия напряжения с электрода до наступления пробоя. Значительно позднее достигается максимум объема $V_{\max} = 41 \text{ мм}^3$ видимой части конуса, что объясняется инерцией жидкости, движущейся внутри конуса. Данное значение является оценкой снизу, т. к. с течением времени все больший объем жидкости оказывается за пределами видимой области. Представленная картина качественно повторяется для всех рассматриваемых случаев напряжений.

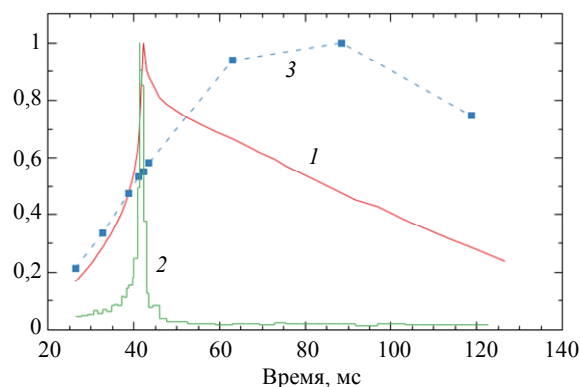


Рис. 3. Графики зависимости положения вершины конуса $H/H_{\max}$ (1), ее скорости $v/v_{\max}$ (2) и объема $V/V_{\max}$ конуса (3), нормированные на свои максимальные значения, на этапе роста и спада. Напряжение 3360 В. Спад импульса напряжения при $t = 42,2 \text{ мс}$. $(H_{\max}, v_{\max}, V_{\max}) = (2,86 \text{ мм}, 1 \text{ м/с}, 41 \text{ мм}^3)$

На рисунке 4 представлено расширенное сравнение экспериментальных и численных результатов для случая 3360 В.

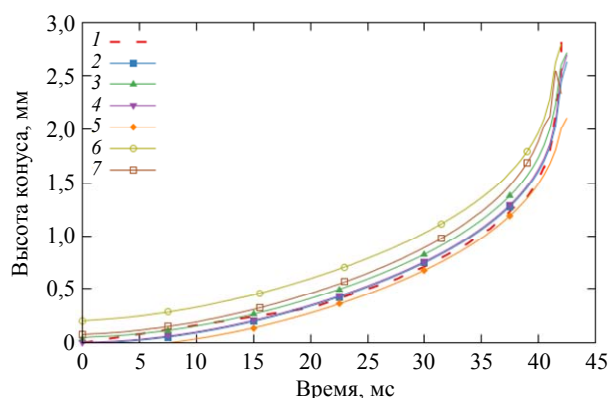


Рис. 4. Графики зависимости от времени положения вершины конуса H (1) в эксперименте (3360 В), и смоделированных значений $\varphi = 0,5$ (2), $v_z/\max\{v_z\} = 0,1$ (3), $v_z/\max\{v_z\} = 0,5$ (4), $v_z/\max\{v_z\} = 0,9$ (5), $\min\{F_z\}$ (6), $\max\{F_z\}$ (7)

Для каждого расчета рассматривается осевое (ось z) распределение трех величин: профиля фазовой переменной φ , профиля z -компоненты напряженности электрического поля, профиля z -компоненты скорости (V_z), профиля z -компоненты вынуждающей объемной силы (F_z). Для фазовой переменной в области значений $\varphi = [0, 1]$ выбирается количество линий уровня N , по которому определяется дискретный набор φ_i , исключая крайние значения 0 и 1. На каждом моменте времени t_i (для которого были получены результаты) определяется положение ближайших точек на профиле $\varphi = \varphi(z)$ для набора уровней φ_i , $i = 0, N-1$. Изменение положения точек во времени $z_i = z_i(t)$ позволяет построить набор соответствующих кривых и отождествить численные результаты для некоторой кривой с экспериментом. Основная причина, по которой рассматриваются несколько величин – конечная толщина межфазной границы, сильно превышающая свой физический аналог. Кроме того, она подвержена «расплыванию» в процессе расчета вследствие модельной диффузии. В случае скорости V_z в каждый момент времени выполняется нормировка профиля на максимальное значение, изменение линий уровня V_z строится аналогичным образом. Поведение уровней E_z оказывается подобным φ и потому не рассматривается. Профиль силы претерпевает очень сильные изменения в процессе расчета как по амплитуде (ее максимальные значения меняются на несколько порядков), так и по форме. Задание набора уровней для этой величины оказывает-

ся нецелесообразным. Однако можно отслеживать движение ее фронта. Первым очевидным «маркером» является положение максимума F_z в каждый момент времени. Рассматривая профили силы сразу после подачи напряжения, можно заметить, что пространственная дискретизация методом конечных элементов приводит к появлению немонотонности, а при дальнейшем смещении воды к высоковольтному электроду распределение F_z отличается сильными неоднородностями, которые могут распространяться с иной скоростью, чем «материальная» переменная φ . В качестве дополнительных критериев смещения межфазной границы можно рассмотреть положение последнего локального минимума на профиле $F_z = F_z(t)$. Наилучшее приближение обеспечивает профиль по средней линии $\varphi = 0,5$, линия уровня $\varphi = 0,1$ дает завышенное значение высоты конуса, а $\varphi = 0,9$ – заниженное в течение всего расчета. Аналогично фазовой переменной, линия уровня $V_z/\max\{V_z\} = 0,9$ для скорости дает заниженное значение высоты конуса для любого момента времени. На начальном отрезке ($t < 20$ мс) наилучшее приближение дается линией уровня $z_{V_z} = 0,0909$, на всем протяжении расчета наилучшее приближение дается средней линией. Использование в качестве маркера движения границы положений максимума F_z и локального минимума, ближайшего к высоковольтному электроду, дает завышенные значения высоты конуса и является неудовлетворительным.

Выводы

Экспериментально и с помощью численного моделирования исследовано движение границы раздела воды и трансформаторного масла в вертикальном электрическом поле. Получены данные о скорости движения границы, объеме вовлеченной жидкости и динамике вершины образующегося конуса воды на этапе его роста во время действия напряжения, а также на этапе обратного спада. Показано, что при отношении 2:1 диаметра D высоковольтного электрода к расстоянию l до границы раздела геометрия рабочего торца электрода определяет характер деформации границы, а его высота не оказывает заметного влияния на ее движение и развитие разряда.

Переход от двумерного к трехмерному осесимметричному моделированию позволил значительно сблизить экспериментальные и численные результаты для зависимости высоты конуса от времени. Изменение формы высоковольтного электрода со сферической на цилиндрическую с аналогичной полусферой на рабочем торце позволило оптимизировать вычислительные времязатраты (несмотря на трехмерную постановку) за счет полного исключения течений, возникающих у противоположного от разряда полюса сферы, которые слабо влияют на движение границы раздела жидкостей, однако требуют сопоставимых рассматриваемой задаче вычислительных ресурсов.

Несмотря на большое количество модельных гипотез и ограничений, связанных с конечной толщиной межфазной границы, эмпирическими коэффициентами в модели переноса фазовой переменной, приближенной формой записи объемной силы, в целом, удастся правильно описать движение границы «вода-масло» к высоковольтному электроду. Наилучшим способом представления этого движения являются линии фазовой переменной ϕ и нормированной осевой скорости $V_z/\max\{V_z\}$. Описание в терминах локальных экстремумов объемной силы $F_{es,z}$ является неудовлетворительным, однако показывает степень возмущения поля объемной силы вследствие конечной толщины межфазной границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun C., Ohodnicki P. R., Stewart E. M. / IEEE Sens. J. 2017. Vol. 17. № 18. P. 5786–5806.

2. Hao J., Chen G., Liao R., Yang L., Tang C. / IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Vol. 19. № 4. P. 1456–1464.

3. Ушаков В. Я., Климкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.

4. Lesaint O. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 14. P. 144001.

5. Chng T. L., Brisset A., Jeanney P., Starikovskaia S. M., Adamovich I. V., Tardiveau P. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 9. P. 09LT02.

6. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbanev S. A., Starikovskaia S. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 8. P. 085005.

7. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 1. P. 015005.

8. Liu Z., Hara K., Shneider M. N. / Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. № 4. P. 042101.

9. Shneider M. N., Pekker M. Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field. – Institute of Physics Publishing, 2019.

10. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. № 9. P. 095022.

11. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. № 7. P. 075004.

12. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., Shneider M. N. / Phys. Rev. E. 2021. Vol. 103. № 6. P. 063201.

13. Tonks L. / Phys. Rev. 1935. Vol. 48. P. 562.

14. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кадомская К. П., Козырев Н. А., Костенко М. В., Кучинский Г. С., Половой И. Ф., Рябов Б. М., Хоберг В. А. Техника высоких напряжений. – М.: Высшая школа, 1973.

15. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2017. № 5. С. 5–9.

16. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. / Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61–65.

17. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. / Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5–9.

18. Панов В. А., Куликов Ю. М., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 5–10.

19. Olsson E., Kreiss G. / J. Comput. Phys. 2005. Vol. 210. № 1. P. 225–246.

PACS: 52.80.Wq

The influence of local conductivity inhomogeneities on the shape of a discharge channel in water

V. A. Panov*, A. S. Saveliev, and Yu. M. Kulikov

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

*E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 9.02.2026; revised 5.03.2026; accepted 27.04.2026

The paper experimentally demonstrates the effect of formation of counter discharge channels during breakdown initiation in weakly conducting water along a trace with increased conduc-

tivity from a moving crystal of table salt. The first channel is initiated in the gap between the high-voltage electrode and the salt crystal, due to which the current begins to flow mainly along the trace with increased conductivity as a result of the crystal dissolution. The second channel is initiated inside the trace at some distance from the crystal and has no direct contact with the grounded electrode, which is located at a distance of 8 mm. The counter motion of the discharge channels leads to their unification and final formation of a single channel. This effect is explained based on numerical modeling, which consists in the presence of vortex structures in the trace directly behind the moving crystal, which form a wider, compared to the main part of the trace, region with lower salt concentration and conductivity. As a result, the current density in this region is lower than in the main part of the trace, which leads to later boiling of the liquid and the appearance of a plasma channel.

Keywords: conductive water, transformer oil, pulsed electric field, water cone, EHD flows.

REFERENCES

1. Sun C., Ohodnicki P. R., and Stewart E. M., IEEE Sens. J. **17** (18), 5786–5806 (2017).
2. Hao J., Chen G., Liao R., Yang L., and Tang C., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **19**, 1456–1464 (2012).
3. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F., and Korobeynikov S. M. Impulse Breakdown of Liquids. Berlin Heidelberg New York, Springer, 2007.
4. Lesaint O., J. Phys. D: Appl. Phys. **49** (14) 144001 (2016).
5. Chng T. L., Brisset A., Jeanney P., Starikovskaia S. M., Adamovich I. V., and Tardiveau P., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (9), 09LT02 (2019).
6. Ding C., Khomenko A. Y., Shcherbaney S. A., and Starikovskaia S. M., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (8), 085005 (2019).
7. Kosarev I. N., Starikovskiy A. Y., and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (1), 015005 (2019).
8. Liu Z., Hara K., and Shneider M. N., Phys. Fluids. **35** (4), 042101 (2023).
9. Shneider M. N. and Pekker M. Liquid Dielectrics in an Inhomogeneous Pulsed Electric Field. Institute of Physics Publishing, 2019.
10. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **28** (9), 095022 (2019).
11. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., Plasma Sources Sci. Technol. **29** (7), 075004 (2020).
12. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L., and Shneider M. N., Phys. Rev. E. **103** (6), 063201 (2021).
13. Tonks L., Phys. Rev. **48**, 562 (1935).
14. Aleksandrov G. N., Ivanov V. L., Kadomskaya K. P., Kozyrev N. A., Kostenko M. V., Kuchinskij G. S., Polovoj I. F., Ryabov B. M., and Hoberg V. A. Tekhnika vysokih napryazhenij. Moscow, Vysshaya shkola, 1973 [in Russian].
15. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Saveliev A. S., Plasm. Phys. Rep. **44** (9), 882–885 (2018).
16. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., and Son E. E., Plasm. Phys. Rep. **42**, 1074 (2016).
17. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., and Saveliev A. S., Plasm. Phys. Rep. **47**, 623 (2020).
18. Panov V. A., Kulikov Yu. M., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., and Saveliev A. S., Applied Physics, № 6, 5–10 (2023) [in Russian].
19. Olsson E. and Kreiss G., J. Comput. Phys. **210**, 225–246 (2005).

Об авторах

Панов Владислав Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: panovvladislav@gmail.com SPIN-код: 5821-2776, AuthorID: 755538

Савельев Андрей Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: fisteh@mail.ru SPIN-код: 6888-7369, AuthorID: 866343

Куликов Юрий Матвеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru SPIN-код: 7719-8459, AuthorID: 1130937

УДК 621.315.592
EDN: QROEJA

PACS: 81.

Возможности планетарной схемы обработки для группового шлифования и полирования пластин InSb и матричных модулей© В. А. Улькаров^{1*}, А. А. Трофимов^{1,2}, Н. А. Саркисов¹, В. О. Кузин¹, К. Ю. Арбузов¹,
И. Д. Размахнин¹, А. Н. Кобыш², Р. Ю. Козлов^{3,4}, М. С. Нестюркин^{3,4}¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: ulkarov@yandex.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия³ АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия⁴ НИТУ «МИСИС», Москва, 119049 Россия

Статья поступила в редакцию 5.03.2026; после доработки 20.03.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 2.2.2; 2.2.3

В работе предложена групповая обработка по планетарной схеме, разработаны конструкторско-технологические решения, и проведен ряд процессов для пластин InSb и матричных модулей. По результатам измерений показана возможность увеличения производительности труда и выхода годных в единицу времени при одновременном снижении материальных затрат.

Ключевые слова: планетарная схема обработки, шлифование и полирование, InSb, матричный модуль.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-60-66

Фоточувствительный материал антимонид индия (InSb) является одним из основных в промышленно-ориентированном производстве матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона и фотоприемных устройств на их основе, серийно выпускаемых различными отечественными предприятиями [1].

Технология изготовления таких приборов является хорошо отработанной, однако в ходе серийного производства изделий одним из ключевых аспектов наравне с повышением производительности при сохранении качества продукта и воспроизводимости результата является стремление сократить издержки и трудоемкость, что побуждает искать новые пути решения и модернизировать отдельные процессы технологического маршрута. При операциях одностороннего шлифования и полирования, как правило, применяется орбитальная схема обработки с поштучной загрузкой. Переход на планетарную схему потенциально представляется оптимальным решением, од-

нако, требует высокой точности и конструктивной модернизации оборудования. В настоящей работе исследовались отдельные операции на этапе обработки материала с целью установления возможности их оптимизации для увеличения производительности.

Обработка пластин объемного InSb производится поштучно методом свободного абразива и включает шлифование с обеих сторон последовательно абразивными суспензиями с различным размером зерна [2, 3]. После шлифования пластины с каждой стороны подвергаются полированию. Схематично порядок обработки представлен на рис. 1.

Прирост производительности при сокращении затрат на применяемые расходные материалы обеспечивают групповые методы обработки [4]. Для реализации групповой обработки в приведенной на рис. 1 схеме на операции приклеивания пластин InSb предложено использовать диск-носитель максимально возможного диаметра (112 мм), с которым

позволяет работать имеющееся оборудование и оснастка для шлифования и полирования.

Зная текущий диаметр обрабатываемых пластин (50,8 мм) и применяя решение двумерной задачи упаковки («упаковка кругов в

круге»), полученное в 2014 г. Э. Спехтом [5] и рассмотренное отечественными авторами [6], выявлено, что диск-носитель диаметром 112 мм вмещает 3 пластины InSb диаметром 50,8 мм (рис. 2).

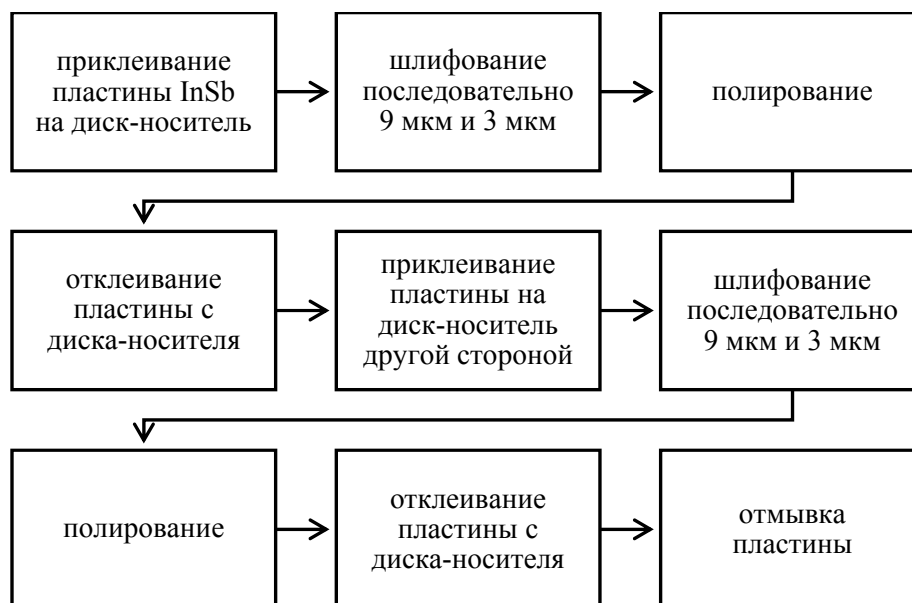


Рис. 1. Схема процесса обработки пластин InSb на этапе шлифования и полирования

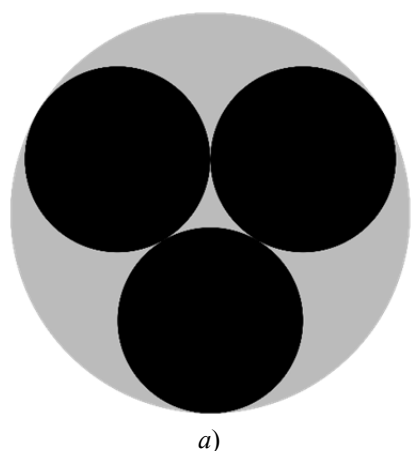


Рис. 2. Иллюстрация решения двумерной задачи упаковки для диска-носителя диаметром 112 мм и пластин InSb диаметром 50,8 мм (а) и фото приклеенных на диск-носитель пластин InSb (б)

Для оценки жизнеспособности предложенного решения групповая обработка пластин производилась шлифованием с применением стандартной оснастки. Использовался абразив Al_2O_3 с размерностью зерна 3 мкм, разведенный в деионизованной воде. Общая нагрузка на образцы составила 1,35 кг (23 г/см^2), скорость вращения шлифовальной плиты задана на уровне 15 об/мин, время обработки составило 10 мин. Профиль поверхности шлифовальной плиты (диаметр 300 мм)

задан выпуклой линзой +3 мкм для компенсации разницы съема материала в центральной части диска-носителя и по краям, обусловленной разницей угловых скоростей при шлифовании, поскольку в данной модели обработки с применением трех пластин на одном диске-носителе пластины InSb расположены вплотную друг к другу. Измерения толщины пластин выполнялись на бесконтактном измерителе толщины NCG-2 Logitech (Шотландия), как представлено на рис. 3.

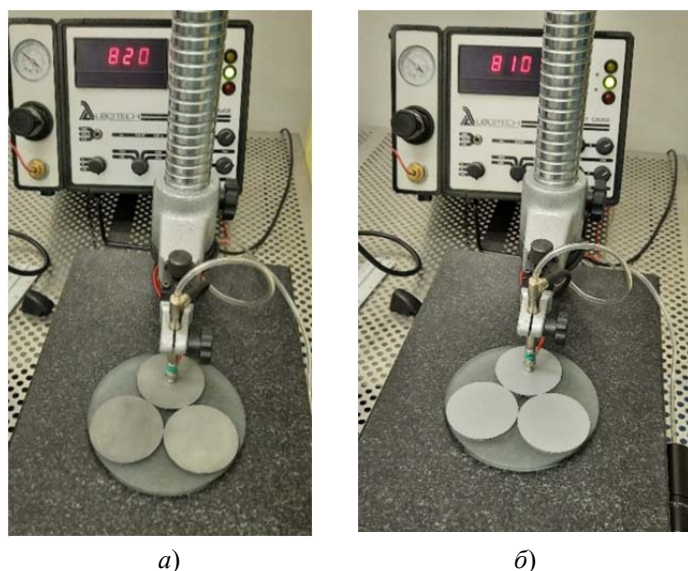


Рис. 3. Одновременная обработка шлифованием трех пластин InSb диаметром 50,8 мм на стеклянном диске-носителе диаметром 112 мм:
а) – измерения толщины до обработки;
б) – измерения толщины после обработки

Результаты обработки и измерений толщины до и после обработки, а также схема измерений по нескольким точкам на каждой пластине представлены в таблице 1.

Плоскостность обработанных поверхностей пластин InSb измерялась контактным методом на профилометре DekTakXT Bruker (Германия) на диаметре 49 мм (рис. 4).

Анализируя результаты измерений, заметно, что отклонения от плоскостности не превышают 0,5 мкм. Можно заметить незначительный завал на 0,25 мкм, вероятно обусловленный недостаточной выпуклостью профиля шлифовальной плиты, выбранной для обработки в ходе подготовки оснастки. Тем не менее, результаты находятся в допустимом диапазоне отклонений, которые в настоящее время применяются при поштучной обработке пластин (до 3 мкм).

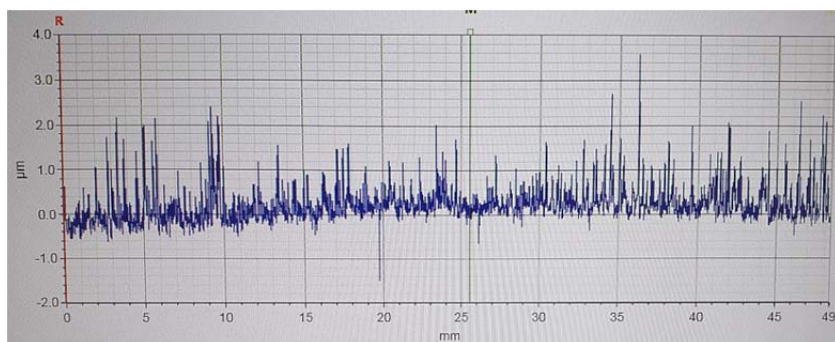
Таким образом, предложенное решение групповой обработки пластин InSb в серийном производстве матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона показывает возможность его применения для оптимизации процесса.

После шлифования и полирования пластины InSb подвергаются ряду последующих операций в технологическом маршруте, направленных на формирование матричных фоточувствительных элементов и их стыковку с кремниевой интегральной схемой считывания (БИС). Готовые матричные фоточувствительные модули поступают на утонение, которое является сложным технологическим процессом, необходимым для улучшения пространственного разрешения и повышения квантовой эффективности фотоприемного устройства.

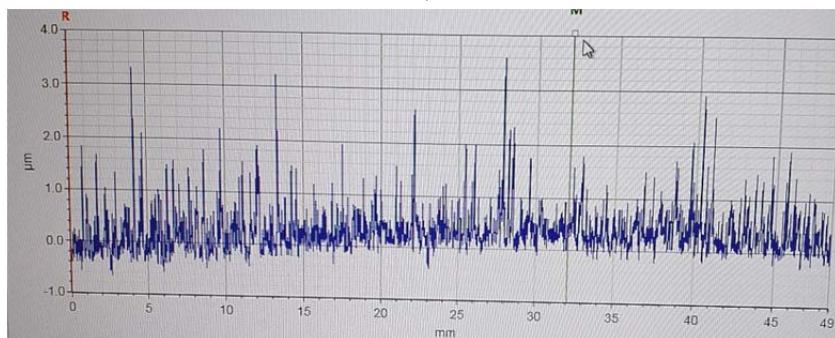
Таблица 1

Результаты измерений толщины пластин до и после шлифования (мкм)

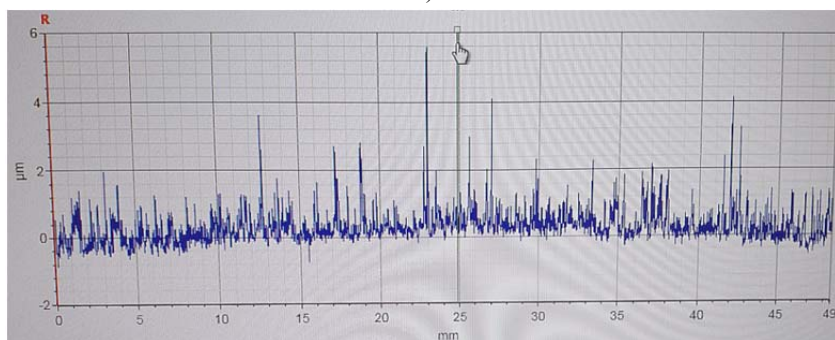
Номер образца	Точка измерений	A	B	C	D	E	Расположение точек измерения на каждом образце
9	до	817	819	822	821	820	
	после	809	809	810	809	810	
10	до	816	817	821	818	818	
	после	808	808	810	810	809	
11	до	817	816	819	819	818	
	после	808	808	810	808	809	



а)



б)



в)

Рис. 4. Результаты измерений плоскостности обработанных поверхностей пластин InSb:
а) – образец № 9; б) – образец № 10;
в) – образец № 11

В настоящее время на участке шлифования и полирования утонение модуля производится также поштучно [7]. Для реализации возможности обработки групповым методом (одновременно по 3 фоточувствительных мо-

дуля) разработано конструкторско-технологическое решение, изготовлен макет новой детали, и модифицирована оснастка полировального оборудования (рис. 5).



а)



б)



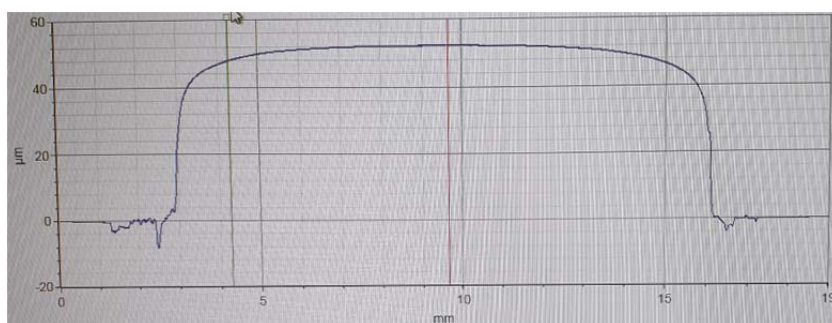
в)

Рис. 5. Оснастка для установки полирования: а) – внешний вид; б) – стандартная вакуумная часть оснастки; в) – модификация оснастки добавлением макета новой детали вакуумной части

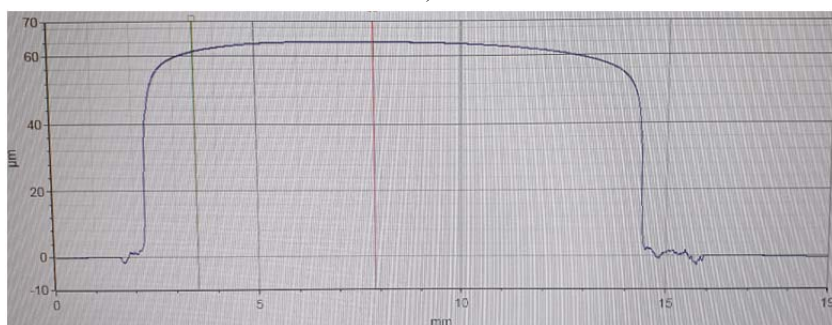
Макет новой детали сопряжен определённым образом со стандартной оснасткой для полирования так, чтобы обеспечивалась максимальная плоскостность поверхности, что является важным фактором последующей групповой обработки фоточувствительных модулей. Режимы и прочие параметры обработки, описанные в работе [7], не менялись, кроме отключения возвратно-поступательного перемещения оснастки по полировальному полотну в ходе обработки. Такое перемещение при поштучном полировании позволяет добиться лучших результатов плоскостности поверхности обрабатываемого образца. В случае же групповой обработки полирование происходит по планетарной схеме, которая обеспечивает повышение качественных характеристик поверхности при финишной обработке, высокую точность и равномерный съём материала вследствие совершения каждым фото-

чувствительным модулем сложного пространственного движения [8, 9].

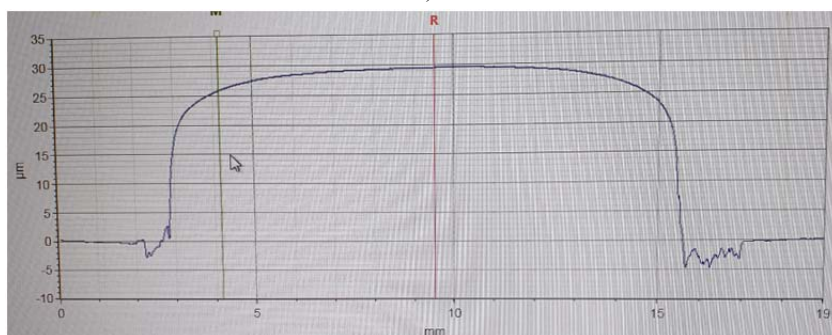
В результате экспериментальной групповой обработки фоточувствительных модулей утонение производилось до толщины 30–60 мкм, после обработки результаты измерений плоскостности поверхностей модулей, полученные на профилометре DektakXT Bruker (Германия), представлены на рис. 6. Данные показывают, что отклонения от плоскостности на целевом расстоянии (выделено вертикальными зеленой и красной линиями) не превышают 2–3 мкм. Разница в толщинах обработанных модулей обусловлена разницей толщин специальных держателей для модулей, изготовленных из лейкосапфира. Эти держатели требуют доведения до единого размера толщин, что обеспечит равномерное удаление материала со всех модулей в едином процессе.



а)



б)



в)

Рис. 6. Результаты измерений плоскостности поверхностей фоточувствительных модулей InSb, состыкованных с кремниевой интегральной схемой считывания, после групповой обработки: а) – образец № 4536; б) – образец № 4571; в) – образец № 4573

Таким образом, в результате проведенных исследований, направленных на повышение эффективности промышленно-ориентированного производства матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона, предложены и апробированы решения для групповой обработки пластин InSb и фоточувствительных модулей. Установлено, что качество изделий, полученных при обработке групповым способом, по ряду параметров не уступает аналогичному при поштучной обработке. При этом возможно увеличение производительности труда и выхода годных в единицу времени при одновременном снижении затрат на расходные материалы.

Вместе с тем остаются еще некоторые нерешенные задачи в рамках настоящего исследования, а именно:

- проведение полного процесса обработки пластин InSb, включая снятие материала с обеих сторон пластины, а также полирования;

- подготовка специальных держателей для модулей, изготовленных из лейкосапфира и имеющих одинаковую толщину;

- проведение полного процесса обработки модулей на новых специальных держателях;

- проведение серии процессов как обработки пластин, так и обработки модулей с целью достижения воспроизводимости результатов;

- внедрение полученных и обоснованных решений в серийное производство.

Несмотря на ряд нерешенных задач, авторы считают целесообразным продолжить

дальнейшее исследование с целью достижения положительных результатов в интересах промышленного производства отечественных матричных фоточувствительных элементов и фотоприемных устройств на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлаков И. Д., Старцев В. В. / Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: АО «НПО «Орион», 2024. С. 24–27.
2. Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., Лопатин В. В., Улькаров В. А., Молодцова Е. В., Павлов П. В., Павлова О. С., Косякова А. М., Комаровский Н. Ю., Нестюркин М. С., Клековкин А. В., Минаев И. И., Ерошенков В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 46–56.
3. Улькаров В. А., Трофимов А. А., Павлова О. С., Новиков И. В., Саркисов Н. А., Кузин В. О. / Успехи прикладной физики. 2024. Т. 12. № 5. С. 456–464.
4. Козлов Р. Ю., Трофимов А. А., Молодцова Е. В., Абрамова Е. Н., Павлов П. В., Павлова О. С., Нестюркин М. С., Щеников Н. В. / Приборы. 2024. № 12. С. 32.
5. Specht E. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to $N = 2600$).
6. Казаков А. Л., Лебедев П. Д. / Вычислительные методы и программирование. 2015. Т. 16. С. 307–317.
7. Мирофьянченко Е. В., Мирофьянченко А. Е., Попов В. С. / Прикладная физика. 2020. № 2. С. 46–52.
8. Зверовицков В. З., Зотов Е. В. / Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 2 (8). С. 209–213.
9. Артемов И. И., Зверовицков А. Е., Мартынов А. Н. / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион, Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2013. № 4 (28). С. 199–211.
10. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2014. № 4. С. 45–50.
11. Babu S. V. Advanced in chemical mechanical planarization (CMP). – Woodhead Publishing, 2016.

PACS: 81.

Possibilities of a planetary machining scheme for group grinding and polishing of InSb wafers and matrix modules

V. A. Ul'karov^{1*}, A. A. Trofimov^{1,2}, N. A. Sarkisov¹, V. O. Kuzin¹, K. Yu. Arbuzov¹, I. D. Razmahnin¹, A. N. Kobysh², R. Yu. Kozlov^{3,4}, and M. S. Nestyurkin^{3,4}

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

* E-mail: ulkarov@yandex.ru

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ Giredmet, JSC, Moscow, 111524 Russia

⁴ University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

Received 5.03.2026; revised 20.03.2026; accepted 27.04.2026

During serial production, one of the key aspects, along with increasing productivity while maintaining product quality and reproducibility, is the desire to reduce costs and labor intensity.

Single-sided lapping and polishing operations typically use an orbital machining system with individual loading. Switching to a planetary system potentially offers the optimal solution; however, it requires high precision and a significant upgrade in equipment design. This paper proposes a planetary scheme of lapping and polishing, develops design and technological solutions, and conducts a series of processes on InSb wafers and matrix modules. Measurement results demonstrate the potential for increased labor productivity and yield while simultaneously reducing material costs.

Keywords: planetary lapping and polishing, photodetector array, lapping and polishing, InSb.

REFERENCES

1. Burlakov I. D. and Startsev V. V. *Materialy XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya*. Moscow: RD&P Center ORION, JSC, 2024, pp. 24–27 [in Russian].
2. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ul'karov V. A., Molodcova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovskij N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S., and Kovin Ya. A., *Applied Physics*, № 5, 46–56 (2024) [in Russian].
3. Ul'karov V. A., Trofimov A. A., Pavlova O. S., Novikov I. V., Sarkisov N. A., and Kuzin V. O., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **12** (5), 456–464 (2024) [in Russian].
4. Kozlov R. Yu., Trofimov A. A., Molodcova E. V., Abramova E. N., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Nestyurkin M. S., and Shchenikov N. V., *Pribory*, № 12, 32 (2024) [in Russian].
5. Specht E. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to $N = 2600$).
6. Kazakov A. L. and Lebedev P. D., *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* **16**, 307–317 (2015) [in Russian].
7. Mirofyanchenko E. V., Mirofyanchenko A. E., and Popov V. S., *Applied Physics*, № 2, 46–52 (2020) [in Russian].
8. Zverovshchikov V. Z. and Zotov E. V., *Izvestiya MGTU «MAMI»*, № 2 (8), 209–213 (2009) [in Russian].
9. Artemov I. I., Zverovshchikov A. E., and Martynov A. N., *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region, Tekhnicheskie nauki. Mashinostroeniye i mashinovedeniye*, № 4 (28), 199–211 (2013).
10. Boltar' K. O., Vlasov P. V., Eroshenkov V. V., and Lopuhin A. A., *Applied Physics*, № 4, 45–50 (2014) [in Russian].
11. Babu S. V. *Advanced in chemical mechanical planarization (CMP)*. Woodhead Publishing, 2016.

Об авторах

Улькаров Вадим Айратович, к.т.н., ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: ulkarov@yandex.ru

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., доцент, начальник отдела развития материалов, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

Саркисов Никита Андреевич, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: nsarkisov@mail.ru

Кузин Владислав Олегович, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Арбузов Кирилл Юрьевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Размахнин Иван Дмитриевич, инженер 2 кат. АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Кобыш Алина Николаевна, к.т.н., заведующая кафедрой оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: kobysh@mirea.ru SPIN-код: 8836-0683, AuthorID: 514026

Козлов Роман Юрьевич, начальник лаборатории, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н. П. Сагина» (111524, Россия, Москва, Электродная ул., д. 2, стр. 1), НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1). E-mail: RYKozlov@rosatom.ru SPIN-код: 7324-5403, AuthorID: 1302882

Нестюркин Михаил Сергеевич, руководитель направления, АО «Гиредмет» имени Н. П. Сагина (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, 2/1); НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1).

УДК 53.083.4
EDN: RGBEGA

PACS: 73.50.Lw

Термо-ЭДС наноразмерных пленок $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

© А. С. Терехова*, Л. А. Зеленский, С. В. Смирнов

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, 634050 Россия*** E-mail: tas18102004@mail.ru**Статья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 21.11.2025; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11*

Приведены результаты исследований дифференциальной термо-ЭДС и коэффициента Зеебека наноразмерных пленок $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$ (ITO), полученных методом магнетронного распыления компактной мишени. Показана зависимость коэффициента термо-ЭДС пленок от температуры, а также объяснена ее корреляция с температурной зависимостью электропроводности. Спроектировано автоматизированное устройство для измерения термо-ЭДС пленок и распределения её по их поверхности в диапазоне температур от 300 до 450 К. Полученные результаты позволяют спрогнозировать возможность дальнейшего применения пленок ITO в электронике.

Ключевые слова: пленки ITO, термо-ЭДС, коэффициент Зеебека, уровень Ферми, концентрация носителей заряда.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-67-72

Введение

Прозрачные проводящие пленки $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$ (ITO) находят широкое применение в качестве основного материала для оптоэлектронных устройств, биосенсоров, датчиков электрохимического анализа, датчиков температуры. Поскольку тонкие пленки ITO во всех вышеперечисленных применениях используются в виде различных комбинаций с металлическими и полупроводниковыми материалами в широком диапазоне температур, то возникает проблема учета возникающей на их контакте термо-ЭДС. Термо-ЭДС является важнейшей характеристикой металлов и полупроводников. Зная её значение, можно вычислить такие их электрофизические характеристики, как коэффициент Зеебека, положение уровня Ферми, концентрацию носителей заряда, плотность состояний в зоне проводимости [1, 2].

Поэтому целью данной работы является измерение собственного коэффициента термо-

ЭДС пленок ITO, что позволит спрогнозировать возможность дальнейшего применения пленок в электронике.

Коэффициент Зеебека S_{AB} для двух контактирующих материалов определяется по формуле:

$$S_{AB} = \frac{dU}{dT} = \alpha_A - \alpha_B, \quad (1)$$

где α_A и α_B – коэффициенты термо-ЭДС материалов А и В, соответственно.

Как правило, коэффициенты термо-ЭДС принимаются относительно свинца или платины, т.к. считается, что у этих материалов не возникает разности потенциалов при градиенте температур, и являются известной величиной для многих металлов. Таким образом, измеряя коэффициент Зеебека контакта ITO с металлом, коэффициент термо-ЭДС которого известен, можно вычислить собственный коэффициент термо-ЭДС пленки.

В пленках ИТО электропроводность осуществляется как по делокализованным состояниям вблизи уровня Ферми, обусловленными вырожденностью полупроводника, так и пере-скоками по локализованным состояниям, представляющим из себя кислородные вакансии.

В области низких температур (10–100 °C) пленки ИТО представляют собой вырожденный полупроводник с высокой долей аморфизации. В данном случае наиболее подходящей для определения термо-ЭДС является формула, предложенная Моттом:

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot k^2 \cdot T}{3} \cdot \left(\frac{d(\ln \sigma)}{dE} \right)_{E=E_f} \quad (2)$$

где α – коэффициент термо-ЭДС, $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, T – температура, E_f – положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости, σ – электропроводность.

Из формулы (2) можно определить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости:

$$E_c - E_f = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 \cdot T}{q} \cdot \frac{1}{\alpha}. \quad (3)$$

Далее по формуле Бурштейна-Мосса можно вычислить концентрацию электронов в зоне проводимости:

$$n = \frac{8 \cdot \pi \cdot (3 \cdot m_e^*)^{\frac{3}{2}}}{3 \cdot h^3} \cdot (E_f - E_c)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

где m_e^* – эффективная масса электрона, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

Однако при более высоких температурах электропроводность в пленках ИТО начинает осуществляться по прыжковому механизму. При этом энергетические уровни кислородных вакансий вырождены, т. е. обладают примерно одинаковой энергией, что способствует образованию зоны, по которой осуществляется электропроводность. Тогда температурную

зависимость термо-ЭДС можно представить следующим выражением:

$$\alpha = \omega_1 \cdot \left(-\frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 \cdot T}{q} \cdot \frac{1}{E_f} \right) + \omega_2 \cdot \left(-\frac{k}{q} \cdot \left(\frac{\pi - 2}{\pi} \cdot \frac{\Delta E_a}{k \cdot T} + \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot k \cdot T \right) \cdot \frac{1}{E_f} \right), \quad (5)$$

где ω_1 – вклад вырождения энергетических уровней кислородных вакансий в значение термо-ЭДС, ω_2 – вклад прыжкового механизма электропроводности в значение термо-ЭДС, а ΔE_a – энергия активации электропроводности, которая может быть найдена из ее температурной зависимости:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp \left(-\frac{E_a}{2kT} \right). \quad (6)$$

Наиболее распространенным является метод измерения коэффициента Зеебека тонких пленок ИТО, путем создания тонкопленочной термопары с эталонным материалом, например ИТО-вольфрам [4–8].

Экспериментальная установка

В данной работе в качестве измерительных электродов используется вольфрамовая проволока диаметром 1 мм. Движение измерительных электродов производится при помощи четырех шаговых моторов с винтовой передачей. Для увеличения точности позиционирования у драйверов управления используется функция микрошага с делением 1/16, точность позиционирования в этом случае равняется ± 5 мкм.

Измерения напряжения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок производятся по четырем точкам, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термо-ЭДС по поверхности образца. Также, на разработанном стенде есть возможность исследования зависимости напряжения термо-ЭДС от температуры. 3D-модель измерительной части установки представлена на рисунке 1.

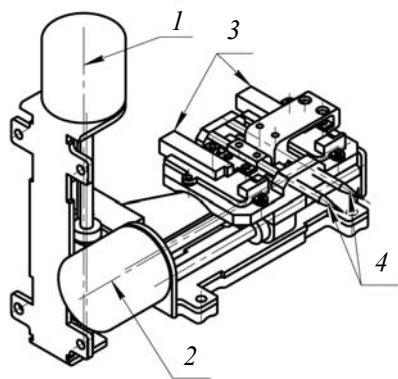


Рис. 1. 3D-модель измерительной части установки:
1 – двигатель оси Y, 2 – двигатель оси X,
3 – двигатели оси Z, 4 – медные электроды

Электрод измеряет термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок в трех точках, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термо-ЭДС по поверхности пленки.

На рисунке 2 представлен внешний вид установки.

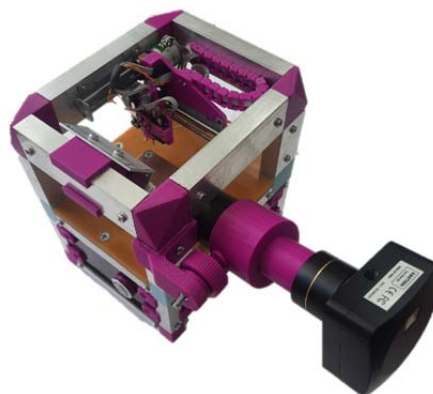


Рис. 2. Внешний вид установки для измерения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок

На рисунке 3 представлена структурная схема установки.

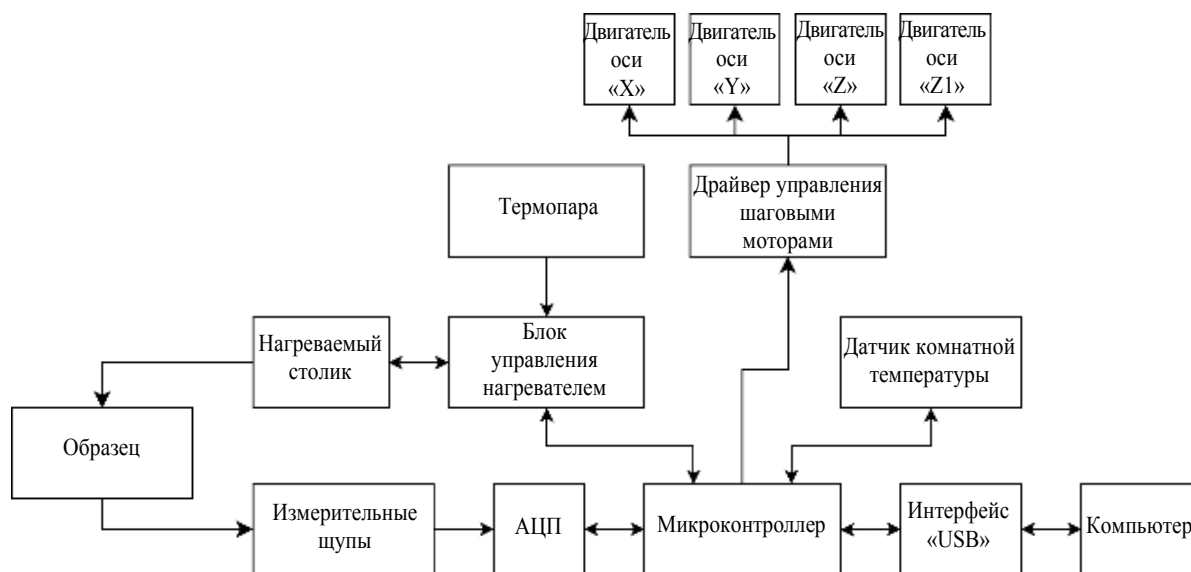


Рис. 3. Структурная схема установки для измерения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок

Регистрация термо-ЭДС производится 16-битным аналогово-цифровым преобразователем с входным сопротивлением 100 МОм, обработка результатов измерений производится при помощи 8-битного микроконтроллера семейства AVR, ATmega 328p.

Результаты исследований

Исследуемые в данной работе образцы были получены методом магнетронного распыления из компактной мишени индий-олово

(90 % – In, 10 % – Sn) в газовой среде аргона с добавкой кислорода. Давление кислорода составляло 10–30 % от общего давления в камере [9, 10]. В качестве подложек использовались кремний и боросиликатное стекло. Напыление длилось 20 минут на предварительно разогретую до 350 °С подложку с последующим отжигом в вакууме при температуре 400 °С в течение 30 минут. 4-х зондовым методом было измерено удельное сопротивление полученных пленок, а также снята температурная зависимость электропроводности, которая представлена на рисунке 4.

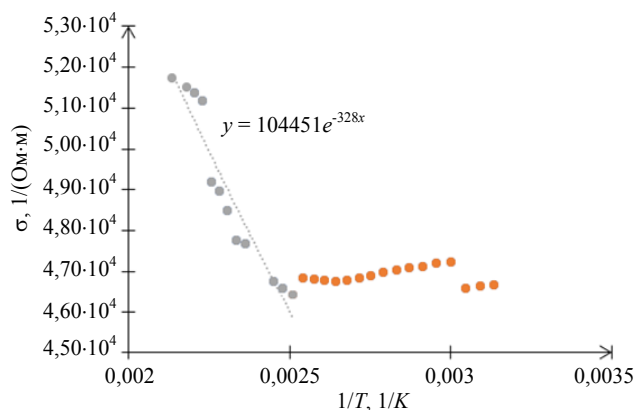


Рис. 4. Температурная зависимость электропроводности пленки ИТО

На зависимости хорошо прослеживаются два участка. На участке до 110 °С замечен металлический тип электропроводности, что свидетельствует о том, что при данных температурах пленка ИТО является вырожденным полупроводником, а электропроводность осуществляется по делокализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Более высокотемпературный участок соответствует прыжковой электропроводности по кислородным вакансиям, представляющим из себя F-центры. Каждый такой центр способствует захвату одного или двух электронов в зависимости от заряда вакансии. На данном участке температурная зависимость электропроводности имеет активационный характер с энергией активации электропроводности порядка 0,05 эВ, что характерно для прыжкового механизма переноса электронов.

Далее при помощи экспериментальной установки была снята зависимость термо-ЭДС от температуры и построена зависимость коэффициента Зеебека контакта вольфрам-ИТО от температуры, которая и представлена на рисунке 5.

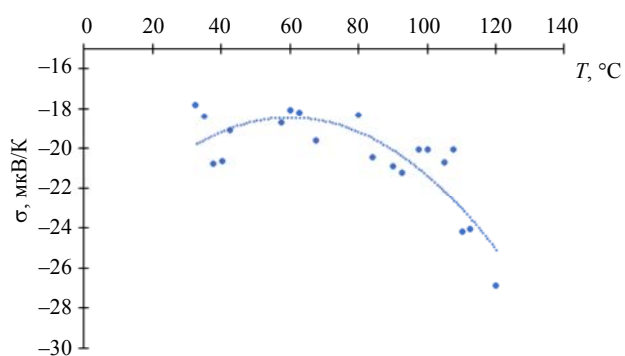


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента Зеебека контакта вольфрам – ИТО

Аппроксимируя экспериментальные значения, можно заметить, что в диапазоне температур 30–110 °С значения коэффициента Зеебека малы и практически не зависят от температуры, что характерно для металлов, т. к. основной вклад в возникновение термо-ЭДС в металлах дают электроны, концентрация которых постоянна, а энергия их близка к уровню Ферми, находящемуся зоне проводимости. При данных температурах изменения в распределении электронов на энергетических уровнях незначительны, а, следовательно, и разность потенциалов между двумя металлами, находящимися в соприкосновении, при градиенте температур незначительна и постоянна.

Рассчитанная по формуле 4 концентрация электронов в пленке ИТО при комнатной температуре составила $2,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Уровень Ферми при этом располагается выше дна зоны проводимости на 0,42 эВ.

При температурах выше 110 °С коэффициент Зеебека начинает увеличиваться по модулю и зависеть от температуры, что характерно для невырожденных полупроводников. В таких полупроводниках концентрация свободных носителей заряда зависит от температуры.

Можно заметить корреляцию между температурными зависимостями коэффициента Зеебека и электропроводности, которая при температурах до 110 °С имеет металлический характер, а при более высоких – полупроводниковый, обусловленный наличием кислородных вакансий [4].

Для расчета концентрации электронов в области прыжковой проводимости следует учитывать, что кислородные вакансии в пленках ИТО образуются как в процессе их напыления, так и во время отжига в вакууме. Пленки, исследуемые в данной работе, подвергались отжигу в вакууме в течение 30 минут при температуре 400 °С. Зная данные технологические параметры, можно вычислить концентрацию кислородных вакансий в пленке по следующей формуле:

$$N_v = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{св}}}{kT}\right), \quad (7)$$

где N_0 – концентрация атомов кислорода при стехиометрическом составе материала пленки,

$E_{\text{св}}$ – энергия связи атома кислорода с молекулой In_2O_3 , равная энергии образования кислородной вакансии.

Следует понимать, что не по всем кислородным вакансиям может осуществляться электропроводность, т. к. не все кислородные вакансии находятся в подходящей энергетической зоне для участия в переносе заряда. По этой причине кислородные вакансии, расположенные вдали от уровня Ферми, не могут эффективно участвовать в переносе заряда.

Как правило, в прыжковой проводимости участвуют электроны с энергиями порядка kT около уровня Ферми. Концентрация таких электронов равна:

$$n = kT \cdot N(E_F), \quad (8)$$

где $N(E_F)$ – плотность состояний на уровне Ферми, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$N(E_F) = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot E_a}, \quad (9)$$

где R – длина перескока электрона.

Рассчитанная концентрация кислородных вакансий в пленке составила $9,93 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, а концентрация электронов, участвующих в прыжковой проводимости – $1,8 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Несмотря на высокую концентрацию этих электронов, прирост величины электропроводности после отжига пленок в вакууме не превышает 20 %, что связано с их низкой подвижностью при прыжковом механизме – в данном случае не превышает $0,3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [3, 10].

Заключение

В работе были исследованы термоэлектрические и электрические свойства нанораз-

мерных пленок ИТО, полученных магнетронным распылением, и установлено, что их термо-ЭДС при температурах от 20 до 110 °С монотонно увеличивается (по модулю) и имеет величину от –15 до –25 мкВ/К. Установлена корреляция между температурной зависимостью электропроводности и температурной зависимостью термо-ЭДС. Продемонстрировано, что разработанный макет измерительной установки имеет перспективу для его использования в научных исследованиях

Работа выполнена по гранту № FEWM-2024-0004 «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng S., Baillargeat D., Ho H. P., Yong K. T. / Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43. P. 3426–3452.
2. Erickson D., Mandal S., Yang A. / J. Microfluid Nanofluid. 2008. Vol. 4. P. 33.
3. Момт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах. – М.: Мир, 1974.
4. Парфенов О. Е., Шклярчук Ф. А. / Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 9. С. 1041–1045.
5. Sytchkova A., Zola D., Bailey L. R., Mackenzie B., Proudfoot G., Tian M., Ulyashin A. / Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 178. № 9. P. 586–592.
6. Zhongkai Zhang, Zhaojun Liu, Jiaming Lei, Luntao Chen, Le Li, Na Zhao, Xudong Fang, Yong Ruan, Bian Tian, Libo Zhao / iScience. 2023. Vol. 26. P. 1–19.
7. Rafiq Mulla, Charles W. Dunnill / Carbon Trends. 2021. Vol. 4. P. 1–9.
8. Xiaohui Zhao, Hongmin Wang, Zixiang Zhao, Wanli Zhang / Nanoscale Research Letters. 2017. Vol. 4.
9. Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhidik K., Ynusov I., Trojn P. / Coatings. 2022. Vol. 12. № 12. P. 1868.
10. Смирнов С. В., Минин О. Н., Чистоедова А. А., Петрюк А. Е. / Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2019. Т. 11. № 1. С. 14–18.

Thermo-EMF of nanosized $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

A. S. Terekhova*, L. A. Zelensky, and S. V. Smirnov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

** E-mail tas18102004@mail.ru*

Received 27.10.2025; revised 21.11.2025; accepted 27.04.2026

The results of studies of differential thermo-EMF and Seebeck coefficient of nanosized $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$ (ITO) films obtained by magnetron sputtering of a compact target are presented. The dependence of the thermoelectric coefficient of films on temperature is shown, and its correlation with the temperature dependence of electrical conductivity is explained. An automated device for measuring the thermo-EMF of films and distributing it over the surface of the plate in the temperature range from 300 to 450 K has been designed. The results obtained allow us to predict the possibility of further use of ITO films in electronics.

Keywords: ITO films, thermo-EMF, Seebeck coefficient, Fermi level, charge carrier concentration.

REFERENCES

1. Zeng S., Baillargeat D., Ho H. P., and Yong K. T., Chemical Society Reviews **43**, 3426–3452 (2014).
2. Erickson D., Mandal S., and Yang A., J. Microfluid Nanofluid **4**, 33 (2008).
3. Mott N. Electronic processes in non-crystalline substances. Moscow: Mir, 1974.
4. Parfenov O. E. and Shklyaruk F. A., Physics and technology of semiconductors **41** (9), 1041–1045 (2007).
5. Sytchkova A., Zola D., Bailey L. R., Mackenzie B., Proudfoot G., Tian M., and Ulyashin A., Materials Science and Engineering **178** (9), 586–592 (2012).
6. Zhongkai Zhang, Zhaojun Liu, Jiaming Lei, Luntao Chen, Le Li, Na Zhao, Xudong Fang, Yong Ruan, Bian Tian, and Libo Zhao, iScience **26**, 1–19 (2023).
7. Rafiq Mulla and Charles W. Dunnill, Carbon Trends **4**, 1–9 (2021).
8. Xiaohui Zhao, Hongmin Wang, Zixiang Zhao, and Wanli Zhang, Nanoscale Research Letters **4** (2017).
9. Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhidik K., Ynusov I., and Trojn P., Coatings **12** (120), 1868 (2022).
10. Smirnov S. V., Minin O. N., Chistoedova A. A., and Petryuk A. E., Nanotechnologies: development, application – XXI century **11** (1), 14–18 (2019).

Об авторах

Терехова Александра Сергеевна, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: tas18102004@mail.ru

Зеленский Леонид Андреевич, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: leonidzelenskij22@mail.com

Смирнов Серафим Всеволодович, д.т.н., профессор, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: serafim.smirnov@mail.ru SPIN-код: 8284-0404, AuthorID: 438551

УДК 537.533.79: 621.384.6.01
EDN: XZMORO

PACS: 41.85.-p

Компрессия импульса тока сильноточного релятивистского электронного пучка на виртуальном катоде

© А. Е. Донец*, В. И. Рогожин, А. А. Раваев, А. Б. Булейко, О. Т. Лоза, Д. А. Адамянц, И. Р. Муфтахов

АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,
Москва, 108840 Россия
*E-mail: donets@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2025; после доработки 30.11.2025; принята к публикации 27.04.2026

Аналитически определено значение предельного тока транспортировки сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в коаксиальном лайнере с сильным магнитным полем. Потенциал центрального электрода в таком лайнере принят равным потенциалу катода, формирующего пучок. Найдены условия формирования виртуального катода в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с двойным катодом, в котором диаметр внутреннего проводника меняется по длине. Экспериментально продемонстрировано явление временной компрессии тока РЭП. Увеличение амплитуды тока в 1,5–2 раза при сокращении длительности его импульса от 2,5 нс до ~1 нс обусловлено появлением виртуального катода. Намечены пути дальнейшего изучения динамики РЭП, его временных и энергетических параметров, приводящих к формированию виртуального катода и, как следствие, временной компрессии РЭП.

Ключевые слова: взрывоэмиссионный катод, сильноточный электронный пучок, виртуальный катод, наносекундный импульс, магнитное поле.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-73-81

Введение

Для генерации сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) в ускорителях прямого действия при энергии электронов порядка 10^6 эВ и токах пучка $\sim 10^3$ А и более применяют взрывоэмиссионные катоды. Величина тока при этом ограничивается не эмиссионной способностью катода, а потенциалом РЭП, который определяется формой электродов и электронного потока. При фиксированной начальной энергии электронов с ростом тока потенциал электронного потока растет и при определенных условиях вырастет до напряжения катода, а скорость электронов падает практически до нуля. Такое электронное облако с потенциалом катода и

нулевой скоростью частиц получило название виртуального катода (ВК).

Виртуальные катоды, представляющие большой интерес для ускорения ионов, для генерации сильных электромагнитных волн (в частности, виркатор – это генератор микроволнового излучения на основе ВК) и ряда других приложений исследовались в течение многих лет и в разных конструкциях. Для многих целей РЭП формируют в сильном магнитном поле в виде электронного потока трубчатой формы, поэтому значительная часть исследований ВК проводилась именно в такой конфигурации. В настоящей работе мы также ограничимся аксиально-симметричным случаем формирования трубчатого РЭП и его транспортировки в сильном соленоидальном

магнитном поле в вакуумной камере круглого сечения с проводящими стенками – в полый металлической трубе.

В работе [1] было показано, что при фиксированном радиусе r_b тонкостенного трубчатого РЭП, распространяющегося вдоль оси камеры с радиусом R , его ток не может превышать предельного значения I_{lim} :

$$I_{lim} = I_0 \frac{\left(\Gamma^{2/3} - 1\right)^{3/2}}{2 \ln \frac{R}{r_b}}. \quad (1)$$

Здесь ток $I_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 mc^3}{e} \approx 17 \text{ кА}$, а фак-

тор Γ определяется разностью потенциалов U в диоде ускорителя:

$$\Gamma = 1 + \frac{eU}{mc^2}, \quad (2)$$

где величина $\frac{mc^2}{e} \approx 511 \text{ кВ}$.

Зависящий от скорости v электронов пучка релятивистский фактор $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$

для тока I_{lim} равен $\gamma = \Gamma^{1/3}$. Потенциал электронного потока определяется разностью между полной и кинетической энергией:

$$\Phi = (\Gamma - \gamma) \frac{mc^2}{e} = U - (\gamma - 1) \frac{mc^2}{e}. \quad (3)$$

При попытке инжектировать ток, превышающий значение I_{lim} , электронный пучок переходит в неустойчивое «сжатое» состояние [2], в котором $\gamma < \Gamma^{1/3}$ и которое быстро коллапсирует в сторону $\gamma \rightarrow 1$, превращаясь в ВК. Ток, который идет с ВК, остается в среднем равным I_{lim} [3], но становится нестационарным, а в спектре колебаний преобладают две основные группы частот. Так называемые «пролётные» частоты определяются временем движения электронов, запертых между двумя эквипотенциальными областями: катодом ускорителя и ВК. Вторая группа частот – это ленгмюровские частоты электронного облака

$\omega_{Le} = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}$ с переменной во времени и пространстве концентрацией n .

Наиболее популярный способ создания ВК с помощью РЭП, распространяющегося в сильном магнитном поле, – это инжекция его в камеру с переменным радиусом. Из формулы (1) видно, что с ростом диаметра камеры R величина предельного тока I_{lim} падает. Поэтому РЭП инжектируют в камеру с небольшим радиусом, где его ток не превышает предельного значения. Далее по мере распространения РЭП в однородном магнитном поле камера расширяется так, что величина I_{lim} оказывается ниже значения тока, и тогда в области перехода от меньшего радиуса к большему формируется ВК.

Описанная конфигурация не является единственно возможной для создания ВК. Наши предварительные расчеты [4] показали, что при определенной конфигурации электродов и длительности импульса РЭП до нескольких наносекунд образующийся ВК сначала тормозит процесс прохождения через него электронов, а затем быстро сбрасывает накопленный заряд. Тем самым длительность импульса тока РЭП уменьшается, а его амплитуда увеличивается.

Целью настоящей работы была экспериментальная демонстрация явления увеличения тока наносекундного релятивистского электронного пучка при сокращении длительности импульса РЭП, что можно назвать компрессией импульса тока электронного пучка или, более коротко – временной компрессией электронного пучка. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования транспортировки РЭП, формируемого в сильном магнитном поле, через область ВК в предложенной ранее конфигурации [4], а также аналитические оценки необходимых для этого условий. Конфигурация [4] позволяет легко реализовать в эксперименте варьирование предельного тока транспортировки I_{lim} при постоянстве параметров формируемого на катоде РЭП, а также расположения ВК в одном и том же сечении лайнера при постоянстве конфигурации его внешних стенок.

Аналитические расчеты

Способ формирования РЭП и образования виртуального катода показан на рис. 1. Вся конструкция обладает аксиальной симметрией и помещена в сильное однородное магнитное поле. На рис. 1 в цилиндрической камере **1** с радиусом R размещен катод **2** с бесконечной эмиссионной способностью на его эмитирующей кромке с радиусом r_c . На катоде с помощью стержня-держателя **3** с радиусом r_s закреплен цилиндр **4** с радиусом r . Труба **1**, играющая роль анода, заземлена, а катод **2**, стержень **3** и цилиндр **4** представляют собой единую проводящую конструкцию, находящуюся под одним отрицательным потенциалом U . В сильном однородном магнитном поле радиус трубчатого релятивистского электронного пучка **5** совпадает с радиусом кромки катода: $r_b = r_c$.

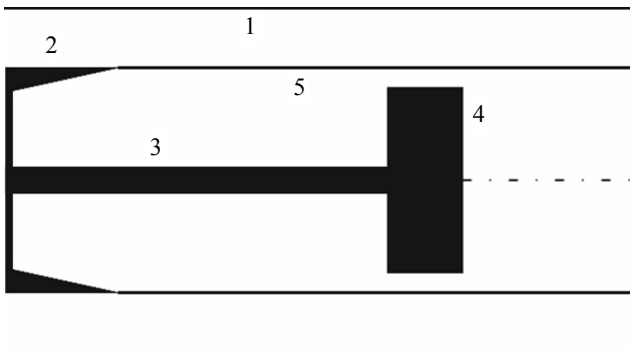


Рис. 1. Диод с виртуальным катодом:
1 – цилиндрическая камера (анод), 2 – кромка взрывоэмиссионного катода, 3 – стержень, 4 – цилиндр, 5 – траектория РЭП

В работе [5] был рассчитан ток внешнего катода, формируемый в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с двойным катодом, которому на рис. 1 соответствуют электроды **2** и **3**. Значение тока с катода **2** в присутствии эквипотенциального ему длинного проводящего стержня **3**, но без учета цилиндра **4** равно

$$I_N = \frac{I_0}{2 \ln \frac{R}{r_s}} \left[\frac{\Gamma - \gamma}{1 - \kappa} - \frac{\gamma - 1}{\kappa} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}, \quad (4)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{3}{2} \sqrt{1 + \frac{8}{9} \kappa (\Gamma - 1)} - \frac{1}{2}, \quad 0 < \kappa = \frac{\ln \left(\frac{r_b}{r_s} \right)}{\ln \left(\frac{R}{r_s} \right)} < 1,$$

индекс N указывает на первого автора статьи [5], а потенциал пучка определяется по формуле (3).

При $r_s \rightarrow 0$ ($\kappa \rightarrow 1$) значения тока электронного пучка по формуле (4) и фактора γ , определяющего потенциал Φ по формуле (3), принимают соответствующие значения федосовского тока I_F [6], и фактора γ трубчатого РЭП, формируемого коаксиальным диодом с магнитной изоляцией в полном волноводе круглого сечения:

$$I_F = I_0 \frac{1}{2 \ln \frac{R}{r_b}} \frac{(\Gamma - \gamma) \sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma},$$

$$\text{где } \gamma = \sqrt{\frac{1}{4} + 2\Gamma} - \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Цилиндр **4** на рис. 1 с радиусом $r > r_s$ и потенциалом U может стать причиной образования виртуального катода. Ток трубчатого РЭП за виртуальным катодом равен предельному току транспортировки электронного пучка [3]. Поэтому виртуальный катод образуется, если ток с катода при наличии стержня с радиусом r_s превышает предельный ток транспортировки электронного пучка в области расположения цилиндра **4**. Расчет тока бесконечно тонкого трубчатого РЭП в бесконечно сильном магнитном поле в указанных условиях не представляет трудностей в предположении, что продольные размеры системы существенно превышают поперечные.

Повторяя процедуры, аналогичные проделанным в работах [1, 5, 6], можно получить зависимость предельного тока транспортировки трубчатого тонкостенного электронного пучка в показанной на рис. 1 коаксиальной конфигурации от параметра γ :

$$I_{coax} = \frac{I_0}{2} \left[\frac{\Gamma - \gamma}{\ln \frac{R}{r_b}} - \frac{\gamma - 1}{\ln \frac{r_b}{r}} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}. \quad (6)$$

Максимум этой функции, то есть предельный ток транспортировки, достигается при:

$$\frac{dI_{coax}}{d\gamma} = 0, \quad \gamma = \sqrt[3]{\frac{\ln \frac{R}{r_b} + \Gamma \ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{R}{r_b} + \ln \frac{r_b}{r}}}. \quad (7)$$

При $r \rightarrow 0$ величина $\gamma \rightarrow \Gamma^{1/3}$, а ток по формуле (1) принимает значение предельного тока [1] транспортировки трубчатого РЭП в полом волноводе круглого сечения: I_{lim} .

На рис. 2 показаны две зависимости токов от радиусов. Обращаем внимание, что по оси абсцисс отложены значения радиусов разных электродов, но такое сравнение помогает лучше понять особенности процесса. Верхняя кривая 1 по формулам (6, 7) показывает зависимость предельного тока I_{coax} транспортировки РЭП от радиуса цилиндра r . В данном случае $R = 24$ мм, $r_b = 10$ мм и параметр $\Gamma = 1,5$. При $r = 0$, то есть в отсутствие цилиндра, ток равен предельному току [1] в полом волноводе: $I_{coax} = I_{lim}$.

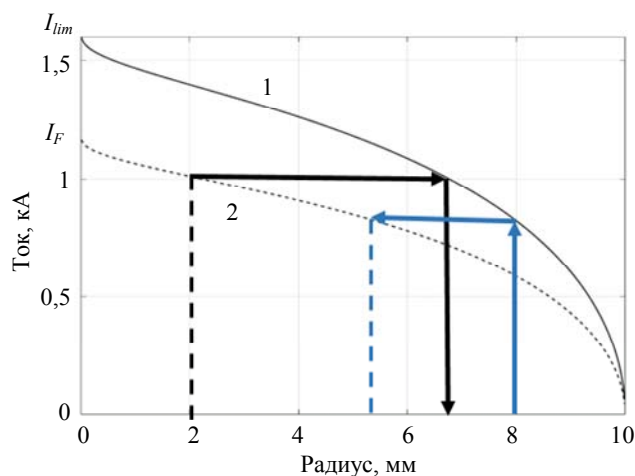


Рис. 2. Зависимости: 1 – предельного тока транспортировки РЭП в коаксиальной конфигурации $I_{coax}(r)$ по формуле (6); 2 – тока внешнего электрода двойного катода $I_N(r_s)$ по формуле (4)

Нижняя кривая 2 по формуле (4) иллюстрирует зависимость нечаевского тока I_N [5] с внешнего электрода двойного катода 2 на рис. 1 от радиуса стержня r_s . Применительно к рис. 1 это ток с катода 2 в зависимости от радиуса r_s стержня 3 при отсутствии цилиндра 4. При $r_s = 0$, то есть в отсутствие внутреннего электрода (стержня), этот ток (5) совпадает с федосовским током [6] с катода в полом волноводе: $I_N(r_s = 0) = I_F$. В обеих зависимостях $I_{coax}(r)$ и $I_N(r_s)$, при приближении радиусов внутренних электродов r и r_s к радиусам катода и электронного пучка ($r_c = r_b$) токи формируемого пучка I_N и транспортируемого пучка I_{coax} обращаются в нуль.

В зависимости $I_{coax}(r)$ по формуле (6) никак не участвует параметр r_s и, наоборот, в $I_N(r_s)$ по формуле (3) отсутствует зависимость тока от радиуса r , что дает возможность сравнивать эти зависимости на рис. 2, а также оптимизировать эксперимент по созданию ВК. Фиксируя размер цилиндра r , можно подбирать необходимый радиус стержня r_s , и наоборот. Примеры такого выбора показаны на рис. 2 стрелками. Кривая 2 показывает, что при радиусе стержня $r_s = 2$ мм ток с катода равен 1 кА. Горизонтальная линия от нее вправо и вертикальная линия от точки ее пересечения с кривой 1 обозначает радиус цилиндра $r \approx 6,7$ мм, при превышении которого транспортируемый ток становится меньше тока с катода. Иначе говоря, ВК образуется при $r_s = 2$ мм и $r > 6,7$ мм, то есть при расстоянии от РЭП до цилиндра $r_b - r < 3,3$ мм. В обратном случае вертикальная линия от $r = 8$ мм до пересечения с кривой 1 показывает, что цилиндр такого радиуса не пропускает ток выше 0,8 кА. Горизонтальная линия от этой точки к кривой 2 определяет максимальный радиус стержня для образования ВК при фиксированных размерах цилиндра: при $r = 8$ мм, то есть при $r_b - r = 2$ мм, радиус стержня $r_s < 5,3$ мм.

Описанная схема создания ВК представляет более простые способы изменения параметров эксперимента (изменения стержня и цилиндра) по сравнению с традиционной конфигурацией РЭП в трубе с расширяющи-

мися стенками. Однако, как будет показано ниже, можно оптимизировать параметры ВК вообще в течение одной серии экспериментов без замены деталей и даже их положения.

Экспериментальная установка

На рис. 3 показана схема использованной в работе аксиально-симметричной экспериментальной установки по исследованию ВК.

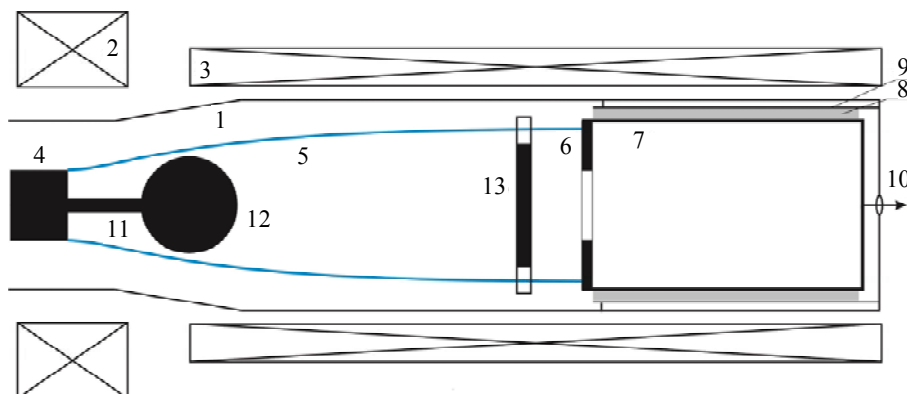


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования ВК: 1 – вакуумная камера; 2 – катушка; 3 – соленоид; 4 – катод; 5 – РЭП; 6 – коллектор; 7 – внутренний металлический цилиндр измерителя тока; 8 – диэлектрик; 9 – внешний металлический цилиндр измерителя тока; 10 – коаксиальный вакуумно-плотный разъем; 11 – стержень с резьбой; 12 – шарообразный электрод; 13 – щелевая диафрагма

Вакуумная камера 1 с системой вакуумной откачки обеспечивает давление не выше 0,1 Па. Катушка 2 и соленоид 3 с независимыми источниками питания создают квазистационарное магнитное поле: катушка – до 3,5 Тл, соленоид – до 1 Тл. В области сильного магнитного поля катушки 2 расположен взрывоэмиссионный катод графитовый 4 диаметром 20 мм, а камера 1 около катода имеет диаметр 48 мм. На катод приходит импульс отрицательного потенциала от генератора высоковольтных импульсов «Радан-303» [7] с дополнительным блоком формирования импульсов. Импульсы генератора после формирователя имеют длительность фронта 0,3 нс и плато в течение 2 нс с амплитудой 250 кВ при общей длительности 2,5 нс на полувысоте (см. Рис. 4). Калиброванный емкостной делитель (на рисунке не показан), измеряющий импульсное напряжение, расположен в заполненной маслом передающей коаксиальной линии с импедансом 50 Ом на расстоянии около ~ 60 см от катода.

Цилиндрический электронный пучок 5 распространяется вдоль линий магнитного поля из области катушки 2 в область соленоида 3, плавно увеличиваясь в диаметре от 20 до

~ 34 мм. Характерная длина области изменения магнитного поля составляет ~ 15 см. Вакуумная камера 1 также имеет переменный диаметр, меняющийся в соответствии с линиями магнитного поля и равный 60 мм в области соленоида 3. Электронный пучок 5 оседает на коллекторе 6, который одновременно является частью описанного ниже измерителя тока сильноточных РЭП пикосекундной длительности [8].

На катоде 4 закреплен стержень 11 диаметром 5 мм с резьбой, на который навинчивается электрод 12. Этот электрод имеет форму шара диаметром 30 мм, в отличие от функционально аналогичного ему цилиндрического электрода 4 на рис. 1. Шарообразная форма электрода, находящегося под потенциалом катода, и его полированная поверхность предотвращают электронную эмиссию с него в течение импульса с длительностью ~ 2 нс.

Из рис. 2 ясно, что возникновение ВК в нашем случае фактически определяется расстоянием от траектории РЭП до эквипотенциального катода шара 12. Грубая регулировка этого расстояния в эксперименте осуществляется изменением положения шара вдоль стержня 11. При изменении радиусов траектории РЭП при переходе из области сильного

в область слабого магнитного поля на 7 мм на характерной длине 15 см нетрудно осуществить такую регулировку с точностью не более 1 мм. Кроме того, независимые системы питания катушки 2 и соленоида 3 предоставляют дополнительные возможности для управления радиусом РЭП. Если положение шара 12 и ток пучка в соленоиде 3 фиксированы, то ослабление поля катушки 2, то есть магнитного поля на катоде, приводит к уменьшению расстояния от электронных траекторий до шара. Более того, эту оптимизацию расстояния можно осуществить при разных положениях шара (и связанном с ним положении ВК) вдоль оси, существенно изменяя дистанцию от него до катода.

Выбор способа измерения тока определила малая длительность импульса РЭП, делающая проблематичной использование традиционных шунтов и поясов Роговского. Показанный справа на рис. 3 измеритель тока [8] представляет собой длинный коаксиальный волновод и состоит из внутреннего 7 и внешнего 9 металлических цилиндров, разделенных диэлектриком 8. Внешний электрод волновода заземлен на камеру 1, внутренний электрод со стороны РЭП соединен с коллектором 6, а с противоположной стороны с центральным проводником коаксиального вакуумно-плотного разъема типа SMA 10. Ток РЭП с амплитудой ~ 1 кА индуцирует на измерительной линии с входным импедансом $\sim 1,5$ Ом напряжение около 1,5 кВ. Для передачи сигнала через коаксиальные разъемы SMA и аттенюаторы без угрозы пробоя измеряемый ток и результирующее напряжение на линии заранее уменьшались более, чем на порядок, для чего пучок 5 проходил на коллектор 6 через щелевую диафрагму 13. Длина измерителя тока 40 см позволяла уверенно регистрировать сигналы до появления переотражений в линии через ~ 4 нс. Регистрация сигналов потенциала на катоде и токов осуществлялась с помощью осциллографа с частотой дискретизации 50 Гвыб/с и рабочей полосой частот 10 ГГц.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 4 показаны осциллограммы потенциала катода (а) и токи: (б) – в класси-

ческой схеме без ВК, (в) – при формировании ВК. Предварительная точная синхронизация импульсов потенциала и токов была затруднена не только из-за большого расстояния между датчиками ~ 1 м. На этом пути скорость сигнала определялась скоростями распространения волны в передающей коаксиальной линии ускорителя и измерительной коаксиальной линии, а также скоростью электронов формируемого пучка, которая менялась постепенно от нуля до максимальной. Однако сигналы токов – рис. 4 (б) и (в) – получены с одного датчика, поэтому об их взаимной задержке можно судить уверенно.

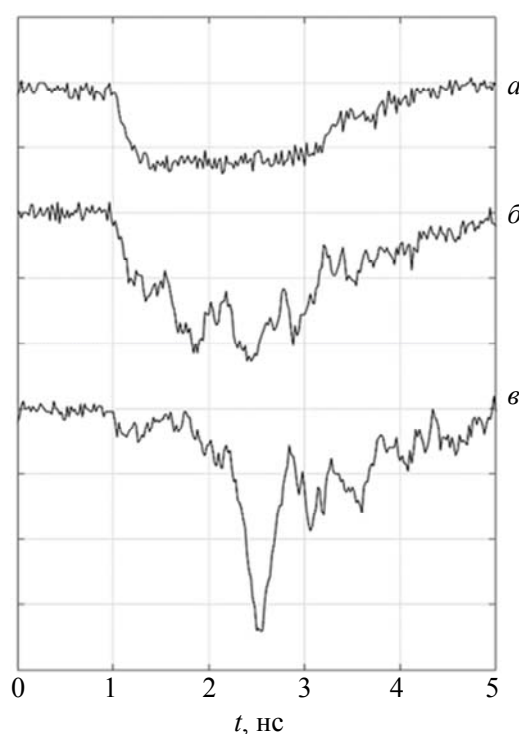


Рис. 4. Осциллограммы: а – потенциал катода; б – ток РЭП при отсутствии стержня и шарообразного электрода на катоде; в – ток РЭП после ВК

В отсутствие на катоде стержня и шарообразного электрода, то есть при формировании РЭП в классическом коаксиальном диоде с магнитной изоляцией [6], импульсы напряжения (Рис. 4а) и тока (Рис. 4б) совпадают по длительности и равны приблизительно 2 нс от начала фронта до начала спада импульсов. Схожесть формы этих импульсов после 2 нс – резкий спад примерно до половины амплитуды в течение $\sim 0,4$ нс и более плавный спад после этого позволяет предположить, что им-

пульсы напряжения и тока начинаются одновременно с точностью до 0,2 нс.

Осцилляции тока с периодом 0,6 нс, видимые на осциллограммах, могут иметь, как минимум, две причины происхождения. Во-первых, они могут быть следствием работы взрывоэмиссионного катода на начальной стадии развития эмиссии электронов с рождающихся и исчезающих катодных микрофакелов. Во-вторых, причиной может быть использование щелевой диафрагмы, ограничивающей полный ток РЭП. Известно, что в замагниченных трубчатых РЭП развивается конвективная диокотронная неустойчивость [9], которая на нелинейной стадии развития проявляется в виде филаментации пучка. Число филаментов (нитей) тем больше, чем тоньше трубка тока. В условиях описываемого эксперимента при толщине стенки РЭП до 1 мм после прохождения расстояния $\sim 0,5$ м от катода до измерителя тока число филаментов составляло несколько десятков: «автограф» на мишени отчетливо демонстрировал неоднородности тока с шагом ~ 1 мм по периметру. Несколько таких токовых филаментов проходило через щелевую диафрагму. В скрещенных полях – аксиальном магнитном поле и радиальном электростатическом поле заряда электронного потока – нити тока имеют форму спиралей, угол закрутки которых линейно зависит от тока РЭП. При небольших флуктуациях тока с катода через щелевые диафрагмы проходит разное число токовых нитей, поэтому регистрируемый ток после диафрагмы меняется намного сильнее. Эту картину ранее наблюдали авторы [8], поэтому для регистрации полного тока РЭП без щелевых диафрагм применяли более сложные методы ослабления электрического сигнала с измерителя тока непосредственно в вакуумной камере.

При сближении траектории распространения электронов пучка **5** и электрода **12** на определенное расстояние формировался ВК. Сигнал с датчика тока (Рис. 4в) начинался с задержкой более 1 нс по сравнению со случаем отсутствия ВК, но его амплитуда в $\sim 1,5$ раза превышала показанную на Рис. 4б без ВК. Примерно такой же эффект наблюдали в расчетах с помощью программного кода CST [4] в конфигурации диода с однородным магнитным полем, как на рис. 1, но с электродом шарообразной формы, как на рис. 3.

Можно предположить следующую последовательность событий. Вначале потенциал шарообразного электрода задерживает на определенное время прохождение электронов РЭП, и происходит накопление объемного заряда в пространстве между катодом и шаром. При запирании тока потенциал катода увеличивается до более высоких значений, чем в отсутствии электрода (12), поскольку сигнал с передающей линии ускорителя с импедансом 45 Ом встречает нагрузку с большим импедансом. В определенной степени такое простое объяснение согласуется с результатами численного моделирования рассматриваемого процесса [4].

Заключение

Целью настоящей работы была экспериментальная демонстрация явления увеличения тока наносекундного релятивистского электронного пучка при сокращении длительности импульса РЭП, что можно назвать временной компрессией электронного пучка. Конструкция реализует в эксперименте варьирование предельного тока транспортировки I_{lim} при постоянстве параметров формируемого на катоде РЭП, что немаловажно, и что отличает работу от предшествующих – ВК образуется или не образуется в одном и том же сечении лайнера при постоянстве конфигурации его внешних стенок и соленоидов, создающих магнитное поле. Кроме того, предложены способы грубой и тонкой регулировки для подбора параметров образования ВК. Грубая настройка осуществлялась передвижением центрального электрода с помощью резьбового соединения при развакуумации установки, а тонкая подстройка – при небольшом изменении профиля магнитного поля путем изменения тока в одном из двух соленоидов в течение одной серии экспериментов.

Обоснование и последовательное объяснение физических процессов, происходящих в диоде с описанной конфигурацией электродов, требует дополнительных экспериментов и 3D численного моделирования. В частности, во-первых, необходимо получение более достоверных экспериментальных результатов, в которых будет исключено влияние щелевой диафрагмы (и диокотронной неустойчивости

РЭП) на результаты измерений полного тока пучка. Во-вторых, необходимо численное моделирование процессов в диоде с параметрами, не только повторяющими условия проводимого эксперимента, но и при использовании преимуществ численного эксперимента, не ограниченного рамками возможной непосредственной реализации.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.25.1066 от 20.05.2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. / УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609–640.
2. Ignatov A. M., Tarakanov V. P. / Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1. № 3. P. 741–744.
3. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Рыжов В. В. / Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 2. С. 22–26.
4. Донец А. Е., Рогожин В. И., Раваев А. А. / Всероссийская молодежная конференция по управлению термоядерному синтезу, плазменным технологиям и высокотехнологичной медицине ВМКТ-2925. – Москва, г. Троицк. 2025. С. 161–162. ISBN 978-5-521-24626-7. https://www.triniti.ru/upload/pdf/vmkt_theses_web.pdf
5. Нечаев В. И., Солуянов Е. И., Фукс М. И. / Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 2. С. 113–117.
6. Федосов А. И., Литвинов Е. А., Беломытцев С. Я., Бугаев С. П. / Известия вузов СССР. Сер. Физика. 1977. № 10. С. 124–135.
7. Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И., Дядьков А. Н. / ПТЭ. 1993. № 1. С. 149.
8. Месяц Г. А., Яландин М. И., Реутова А. Г., Шарыпов К. А., Шпак В. Г., Шунайлов С. А. / Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34–51.
9. Еремеев А. И., Кабанов В. С., Стрелков П. С., Федотов А. В., Шкварунец А. Г. / Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 8. С. 958–964.

PACS: 41.85.-p

Pulse current compression of high-current relativistic electron beam on a virtual cathode

A. E. Donets*, V. I. Rogozhin, A. A. Ravaev, A. B. Buleyko, O. T. Loza, D. A. Adamyants, and I. R. Muftakhov

Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (JSC SRC RF TRINITI), Moscow, Troitsk, 108840 Russia

**E-mail: donets@triniti.ru*

Received 18.11.2025; revised 30.11.2025; accepted 27.04.2026

The limit transport current of a high-current relativistic electron beam (REB) in a strong magnetic field in a coaxial liner with the potential of the central electrode equal to the potential of the cathode forming the REB has been analytically calculated. The conditions for the virtual cathode formation in a coaxial diode with magnetic isolation and a double cathode, in which the diameter of the inner conductor changes along its length, have been found. The phenomenon of temporal compression of the REB current has been experimentally demonstrated. The current amplitude increase by 1.5–2 times with pulse duration decrease from 2.5 ns to ~1 ns is due to the appearance of the virtual cathode. The directions for further study of the REB dynamics, its temporal and energy parameters contributing to the virtual cathode formation and, as a result, temporal compression of the REB, have been outlined.

Keywords: Explosive emission cathode, high-current electron beam, virtual cathode, nanosecond pulse, magnetic field.

REFERENCES

1. Bogdankevich L. S. and Rukhadze A. A., *Sov. Phys. Usp.* **14**, 163–179 (1971).
2. Ignatov A. M. and Tarakanov V. P., *Phys. Plasmas*. **1** (3), 741–744 (1994).
3. Belomytsev S. Ya., Grishkov A. A., Kitsanov S. A., Korovin S. D., Polevin S. D., and Ryzhov V. V., *Technical Physics Letters* **31** (1), 55–57 (2005). <https://doi.org/10.1134/1.1859500>
4. Donecz A. E., Rogozhin V. I., and Ravaev A. A. *Vserossiyskaya molodezhnaya konferenciya po upravlyаемому termoyadernomu sintezu, plazmennym texnologiyam i vy`sokotexnologichnoj medicine VMKT-2925*. Moscow, g. Troiczk, 2025. pp. 161–162. ISBN 978-5-521-24626-7. https://www.triniti.ru/upload/pdf/vmkt_theses_web.pdf
5. Nechaev V. I., Soluyanov E. I., and Fuks M. I., *Pis'ma v ZhTF* **5** (2), 113–117 (1979).
6. Fedosov A. I., Litvinov E. A., Belomytsev S. Y. et al., *Soviet Physics Journal* **20**, 1367–1368 (1977). <https://doi.org/10.1007/BF00898924>
7. Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I., and Dyadkov A. N., *Instruments and Experimental Techniques* **36** (1), 106–111 (1993).
8. Mesyats G. A., Yalandin M. I., Reutova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., and Shunailov S. A., *Plasma Physics Reports* **38** (1), 29–45 (2012).
9. Eremeev A. I., Kabanov V. S., Strelkov P. S., Fedotov A. V., and Shkvarunets A. G., *Sov. J. Plasma Phys.* **14** (8), 958–964 (1988).

Об авторах

Донец Александра Евгеньевна, младший научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: donets@triniti.ru, SPIN-код: 7676-9276

Рогожин Василий Ильич, младший научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: rogozhin@triniti.ru

Раваев Александр Александрович, ведущий научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: aravaev@mrtiran.ru SPIN-код: 9461-0294, AuthorID: 123902

Булейко Алла Борисовна, начальник лаборатории, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: buleyko@triniti.ru SPIN-код: 5470-6692, AuthorID: 1092022

Лоза Олег Тимофеевич, научный консультант, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: OTLoza@triniti.ru SPIN-код: 3536-2581, AuthorID: 25260

Адамянц Диана Ануаровна, стажер, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: daadamyants@triniti.ru

Муфтахов Ильяс Рашидович, стажер, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: irmuftakhov@triniti.ru

УДК 681.7.068
EDN: MRKKXJ

PACS: 42.30.Va, 42.79.Bh, 07.05.Mh

Автофокусировка изображения в оптико-электронных системах на основе нечеткого ПИД-регулятора

© А. А. Берилло

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия
E-mail: berillo.andrey@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; после доработки 3.04.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 2.2.6

Рассматривается задача повышения точности и быстродействия систем автоматической фокусировки в оптико-электронных системах (ОЭС). Показано, что применение классических ПИД-регуляторов ограничено нелинейностями приводов и нестационарностью наблюдаемых сцен. Предложена структура адаптивной системы, использующей нечеткую логику для динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора. Обоснован выбор функции оценки контрастности методом Тененграда и аппаратной платформы Orange Pi 6 Plus для реализации алгоритмов в реальном времени. Прогнозируется снижение перерегулирования на 20–30 % и времени переходного процесса на 25–35 % при замене классического ПИД-регулятора на нечеткий.

Ключевые слова: автофокусировка, оптико-электронная система, нечеткий регулятор, ПИД-регулятор, функция оценки фокуса, обработка изображений, Orange Pi, адаптивное управление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-82-85

Введение

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) предъявляют высокие требования к качеству изображения, ключевым условием которого является точная настройка на резкость (автофокусировка). Задача осложняется нелинейностями привода объектива (люфт, сухое трение) и изменчивостью характеристик наблюдаемых сцен (освещенность, контраст), что делает объект управления нестационарным. Перспективным направлением для работы в таких условиях является применение адаптивных методов управления [1, 2].

Традиционные ПИД-регуляторы, настроенные на одну рабочую точку, теряют эффективность при изменении динамики объекта. Экстремальные регуляторы склонны к колебаниям вблизи точки фокуса и обладают низким быстродействием. Перспективным направлением является применение нечетких

ПИД-регуляторов (Fuzzy PID) [3], которые позволяют адаптировать параметры управления в реальном времени, обеспечивая робастность к нелинейностям и внешним возмущениям. Эффективность такого подхода для задач автофокусировки подтверждена экспериментально [2].

Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка структуры системы автофокусировки на основе нечеткого ПИД-регулятора с использованием современной элементной базы для обработки видеоданных.

Постановка задачи и выбор функции оценки фокуса

Процесс автофокусировки можно представить как задачу поиска положения объектива x^* , при котором функция оценки резкости $F(x)$ максимальна: $x^* = \arg \max F(x)$.

Ошибка управления $e(t)$ косвенно определяется через отклонение от этого максимума. Динамика привода, например, двигателя постоянного тока, может быть описана передаточной функцией $W(s) = \frac{k}{s(T_m s + 1)}$, где k – коэффициент передачи, T_m – электромеханическая постоянная времени. Эта модель не учитывает нелинейности – такие, как люфт, что требует применения более сложных алгоритмов управления [2, 4].

Качество работы системы напрямую зависит от выбора $F(x)$. Сравнительный анализ методов показал, что для задач реального времени наиболее применим градиентный **метод Тененграда (Tenengrad)**, который обеспечивает хороший компромисс между точностью и вычислительной сложностью. Фундаментальное обоснование этого метода представлено в работе [5]. Его эффективность для изображений, близких по природе к получаемым в ОЭС, подтверждена в более поздних исследованиях [6]. Алгоритм заключается в свертке изображения $I(x, y)$ с операторами

Собела для получения горизонтальной $G(x)$ и вертикальной $G(y)$ составляющих градиента, для вычисления модуля градиента $S(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}$ и его суммирования по области анализа $M \times N$:

$$F_{Tenengrad} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N S(x, y).$$

Разработка нечеткого ПИД-регулятора

Предлагаемая система (рис. 1) построена по двухуровневой схеме. Нижний уровень – классический ПИД-регулятор, формирующий сигнал $u(t)$ на привод. Верхний уровень – нечеткий корректор, который динамически изменяет коэффициенты ПИД-регулятора: ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d . Результирующие коэффициенты: $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$ и т. д., где K_{p0} – базовые значения. Теоретические основы нечеткого управления изложены в [3], а успешное применение подобной структуры для задач автофокусировки продемонстрировано в [2, 4].

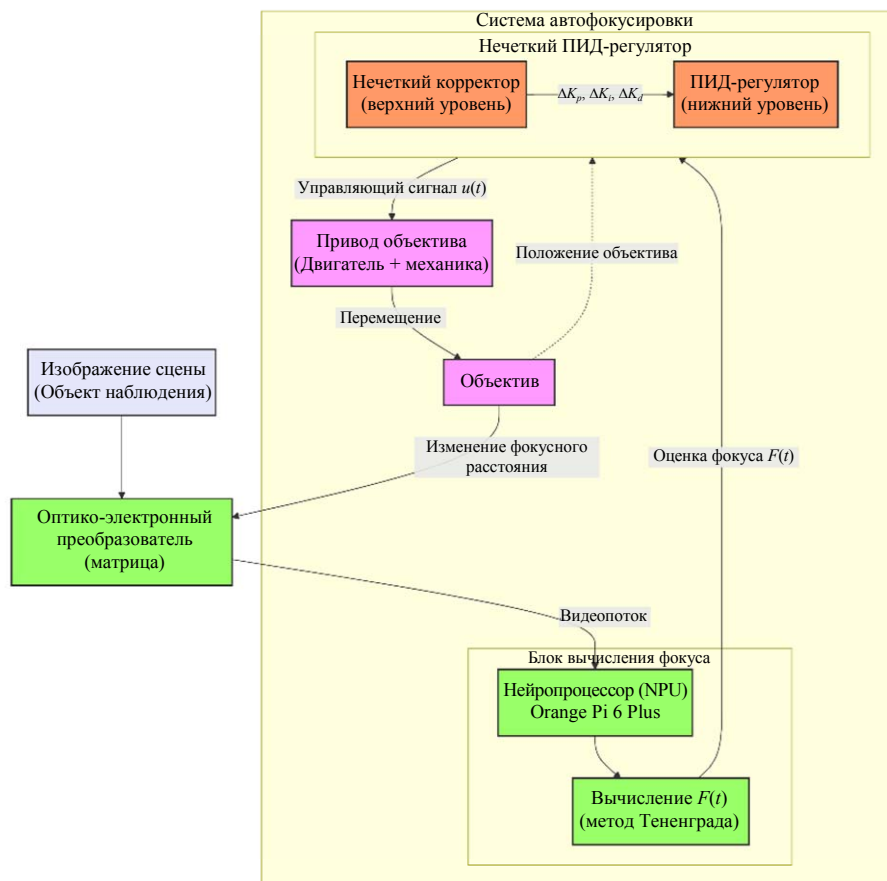


Рис. 1. Структурная схема системы автофокусировки с нечетким ПИД-регулятором

Входные четкие переменные – ошибка e и скорость ее изменения $\dot{e}$ – преобразуются в лингвистические переменные с семью термами: NB (отрицательное большое), NM, NS, Z, PS, PM, PB (положительное большое). Функции принадлежности выбраны треугольной формы. База нечетких правил (таблица) разработана на основе эмпирических знаний о настройке ПИД-регуляторов, адаптированных для задачи автофокусировки. Для получения четких значений корректирующих коэффициентов используется метод центра тяжести (Centroid). Аналогичный подход к формированию базы правил использован в [2].

Таблица

Фрагмент базы правил для коррекции ΔK_p

$e/\dot{e}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PB	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB

Аппаратная реализация и ожидаемые результаты

Для реализации системы предлагается использовать одноплатный компьютер Orange Pi 6 Plus с SoC CIX CD8180. Ключевым преимуществом является встроенный нейропроцессор (NPU) производительностью $28,8 \times 10^{12}$ операций в секунду, позволяющий аппаратно ускорить вычисление функции Тененграда (свертка с ядрами Собела). Планируется следующее распределение нагрузки: NPU – предобработка и вычисление $F(t)$; CPU (высокопроизводительные ядра) – работа нечеткого регулятора.

Ввиду того, что работа находится на стадии теоретической проработки, количественные показатели эффективности оцениваются как прогнозируемые. Планируется проведение имитационного моделирования в MATLAB/Simulink для модели привода с нелинейностью типа «люфт». Ожидается, что по сравнению с классическим ПИД-регулятором нечеткий ПИД-регулятор позволит снизить перерегулирование на 20–30 % и уменьшить время переходного процесса на 25–35 % (рис. 2), что согласуется с результатами, полученными в [2, 4].

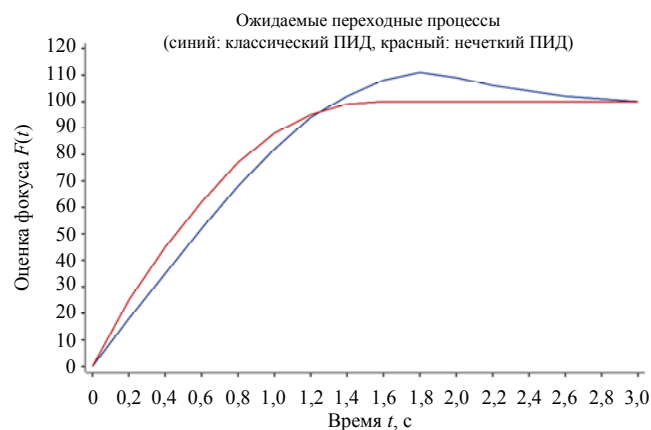


Рис. 2. Ожидаемые переходные процессы для классического и нечеткого ПИД-регуляторов

Заключение

В работе проведен анализ проблемы автофокусировки и обоснована целесообразность применения адаптивных методов управления [1, 2]. Выбрана функция оценки контрастности (метод Тененграда), базирующаяся на фундаментальных [5] и современных [6] исследованиях, и разработана структура нечеткого ПИД-регулятора [2, 3]. Обоснован выбор аппаратной платформы Orange Pi 6 Plus, использование которой позволит реализовать алгоритмы в реальном времени. Сформулированы прогнозируемые показатели эффективности. Дальнейшие исследования будут направлены на имитационное моделирование и экспериментальную апробацию на разработанном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. Подвесовского А. Г., Тюменцева Ю. В. Изд. 4-е. – М.: Лаборатория знаний, 2020.
2. Zhou J., Xue L., Li Y., Cao L., Chen C. / Sensors. 2022. Vol. 22. № 22. P. 8657.
3. Ali R., Peng Y., Ali A., Ali H., Akhter N., Ahmed J., Jalil A. / IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 130014–130026.
4. Wang D. J., Ding X., Zhang T., Kuang H. / Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 45. P. 190–197.
5. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J., Fernandez-Valdivia J. / Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. – Barcelona, 2000. Vol. 3. P. 314–317.
6. Ma C., Zhang M., Dai Z., Zhang Q., Ma J., Niu X., Yan Y. / PLoS ONE. 2025. Vol. 20. № 11. P. e0336810.

Image autofocusing in optoelectronic systems based on a fuzzy PID controller

A. A. Berillo

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

E-mail: berillo.andrey@yandex.ru

Received 16.03.2026; revised 3.04.2026; accepted 27.04.2026

The problem of improving the accuracy and speed of automatic focusing systems in optoelectronic systems (OES) is considered. It is shown that the application of classical PID controllers is limited by nonlinearities of drives and non-stationarity of observed scenes. A structure of an adaptive system using fuzzy logic for dynamic tuning of the PID controller coefficients is proposed. The choice of the Tenengrad contrast measure function and the Orange Pi 6 Plus hardware platform for real-time algorithm implementation is substantiated. The expected performance indicators of the proposed approach are given.

Keywords: autofocus, optoelectronic system, fuzzy controller, PID controller, focus measure function, image processing, Orange Pi, adaptive control.

REFERENCES

1. Pegat A. Fuzzy Modeling and Control. Moscow: Laboratoriya znaniy Publ., 2020 [in Russian].
2. Zhou J., Xue L., Li Y., Cao L., and Chen C., Sensors **22** (22), 8657 (2022).
3. Ali R., Peng Y., Ali A., Ali H., Akhter N., Ahmed J., and Jalil A., IEEE Access **8**, 130014–130026 (2020).
4. Wang D. J., Ding X., Zhang T., and Kuang H., Optics & Laser Technology **45**, 190–197 (2013).
5. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J., and Fernandez-Valdivia J. Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition, Barcelona, **3**, 2000, pp. 314–317.
6. Ma C., Zhang M., Dai Z., Zhang Q., Ma J., Niu X., and Yan Y., PLoS ONE **20** (11), e0336810 (2025).

Об авторе

Берилло Андрей Анатольевич, ведущий инженер-программист, магистр, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: berillo.andrey@yandex.ru

УДК 534.134, 534.143, 534.442.1, 534.6.08, 621.3.019.1
EDN: YTDHXB

PACS: 43.30.-k, 43.30.+m

Характеристики компактного гидроакустического преобразователя высокой удельной мощности в режимах излучения и приёма

© А. К. Бритенков^{1,2*}, Б. Н. Боголюбов¹, Р. В. Травин¹, В. А. Фарфель¹, И. И. Леонов¹,
Д. А. Костеев¹¹ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, 603951 Россия

* E-mail: britenkov@ipfran.ru

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, 603022, РоссияСтатья поступила в редакцию 5.11.2025; после доработки 27.11.2025; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.4

Представлены результаты электроакустических измерений компактного преобразователя со сложной формой цельнометаллического корпуса, как в режиме излучения, так и приёма гидроакустических сигналов. Излучаемая таким преобразователем акустическая мощность превышает 38 Вт для квазигармонических сигналов и достигает 12 Вт для сложных импульсных сигналов. Амплитуда напряжения на выходе преобразователя, работающего в режиме приёма, находится на уровне около 1500 мВ в рабочей полосе частот и 200–400 мВ – вне его рабочей полосы, что в несколько раз выше показателей существующих обратимых гидрофонов при аналогичных значениях принимаемого звукового давления. Применение обратимых компактных преобразователей в составе гидроакустических ретрансляторов, предназначенных для использования на расстояниях до нескольких десятков километров, позволяет снизить массу и габариты таких устройств.

Ключевые слова: гидроакустика, звукоподводная связь, пьезоэлектрический преобразователь, гидроакустический излучатель, гидроакустический ретранслятор, обратимый гидрофон, электроакустика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-86-93

Введение

Особенностью гидроакустических измерений в морских условиях является зависимость от погрешностей позиционирования компонентов измерительной системы, что наряду с влиянием на распространение звука флуктуаций параметров среды снижает точность измерений. Применение ретрансляторов (маяков-ответчиков), излучающих после регистрации такой же или заранее заданный сигнал, снижает ошибки позиционирования и зависимость от изменений параметров среды. Маяки-ответчики получили распространение в

навигации [1], в том числе беспилотных судов [2], управлении автономными подводными аппаратами и передаче телеметрической информации, а также для маркировки подводного оборудования с целью облегчения поисковых работ [3] и в других приложениях гидроакустики.

К приборам такого типа предъявляются взаимоисключающие требования повышения длительности автономной работы и энергии излучаемых сигналов. Для удовлетворения подобных требований прибор должен содержать излучатель с высоким КПД наряду с энергоэффективным трактом возбуждения.

Ввиду этого разработка излучателей малого волнового размера высокой удельной мощности [4] является одной из актуальных задач инженерного обеспечения гидроакустических измерений.

Компактный 3D НЧИ – преобразователь высокой удельной мощности

Компактными низкочастотными, как правило, называются преобразователи, удовлетворяющие соотношению $\lambda > 2\pi D$ (λ – длина звуковой волны, D – характерный размер излучателя), если $D < 0,5$ м, а частота основного резонанса не превышает 2 кГц. При малых волновых размерах излучающей поверхности компактные преобразователи в низкочастотном диапазоне обычно имеют невысокую эффективность и незначительную ширину рабочей полосы частот. Для большей эффективности и повышения уровня создаваемого излучателем звукового давления используются технические решения, в первую очередь направленные на увеличение амплитуды колебаний и площади излучающей по-

верхности. Удачным примером компромисса между развиваемой акустической мощностью, КПД, шириной рабочей полосы частот и частотой основного резонанса можно считать 3D НЧИ – гидроакустический преобразователь продольно-изгибного типа с цельнометаллическим корпусом со сложной геометрией [5].

Описанный в работе [6] компактный 3D НЧИ размером 96×130 (диаметр×длина) мм и весом менее 1,5 кг при конструктивном объеме 735 см³ имеет основной резонанс в диапазоне до 2 кГц и при относительной ширине рабочей полосы частот 25–30 %, что позволяет использовать его для излучения до 40 Вт акустической мощности тональными и ЛЧМ сигналами (более 2,0 кПа приведенного к 1 м эффективного значения звукового давления). Для сложных сигналов излучаемая таким преобразователем акустическая мощность достигает 12 Вт. На рис. 1а приведена излучаемая акустическая мощность для импульсных сигналов с фазовой модуляцией, коэффициентом амплитуды до 1,6 при близком к 100 % коэффициенте заполнения и эффективном значении подводимого к излучателю напряжения возбуждения около 700 В (рис. 1б).

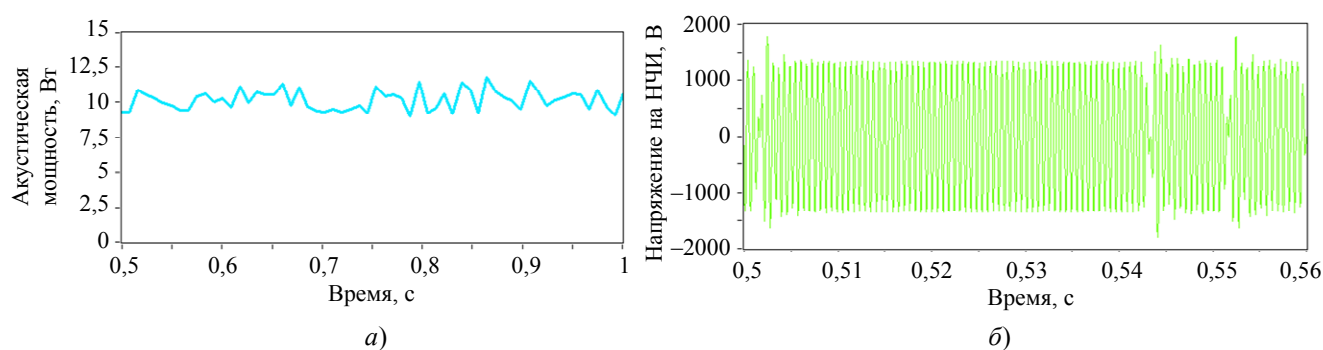


Рис. 1. Излучаемая акустическая мощность и напряжение возбуждения на 3D НЧИ для сложных импульсных сигналов малой скважности

Акустическая мощность излучения сложных сигналов ниже, чем для квазинепрерывных квазигармонических сигналов, так как при быстрых изменениях фазы сигнала 3D НЧИ, как колебательной системе с высокой добротностью, требуется некоторое время для выхода на режим с максимальной амплитудой. На рис. 1б видно, что амплитуда напряжения возбуждения в отдельные моменты времени при изменениях фазы сигнала несущей частоты достигает 1800 В. Различие уровней излучаемой акустической мощности для непре-

рывных и сложных сигналов напрямую зависит от скорости передачи информации [7], так как число передаваемых элементов алфавита определяет количество переключений колебательной системы преобразователя в единицу времени, и соответственно, общую продолжительность излучения с максимальной мощностью.

Излучаемая акустическая мощность выпускаемых маяков-ответчиков и гидроакустических модемов составляет 10–20 Вт для расстояний от нескольких тысяч м до нескольких

десятков км. Например, максимальный уровень акустической мощности гидроакустического модема Evo Logics S2CR 12/24 составляет 57 Вт в полосе частот 13–24 кГц, при этом для передачи информации со скоростью до 9,2 кбит/с на дистанции 6 км устройство излучает до 15 Вт акустической мощности. Аналогичную дальность действия ретранслятора можно обеспечить при использовании компактного 3D НЧИ в диапазоне до 2 кГц с учётом меньшего затухания на подобных расстояниях при увеличении длины волны излучаемого звука [8]. С учётом экспериментальных данных (см. рис. 1), можно повысить средний уровень излучаемой подобным 3D НЧИ акустической мощности на сложных сигналах до 15–20 Вт, что в сочетании с высоким КПД (более 60 %) позволяет использовать такие преобразователи в автономных системах [9].

Измерение характеристик компактного 3D НЧИ как приёмника

Чувствительность по напряжению работающего на приём преобразователя определяется сравнением чувствительности эталонного излучателя, приведённого к 1 м:

$$\xi = \frac{U_r L_r}{\gamma_r(f) U_{\text{НЧИ}}^r}, \quad (1)$$

где L_r – расстояние от измерительного гидрофона до контрольного НЧИ, U_r – напряжение на измерительном гидрофоне, $\gamma_r(f)$ – чувствительность измерительного гидрофона, $U_{\text{НЧИ}}^r$ – напряжение сигнала возбуждения на эталонном излучателе с аналогичной зависимостью, снятой при помощи 3D НЧИ, работающего на приём. Нормировка такой зависимости соотношением расстояний от контрольного НЧИ приёмников и чувствительности измерительного гидрофона позволяет получить зависимость по напряжению от частоты чувствительности преобразователя на приём:

$$\gamma_{\text{3ДНЧИ}} = \gamma_r(f) \frac{U_{\text{3ДНЧИ}} L_{\text{3ДНЧИ}}}{U_r L_r} \text{ [В/Па]}, \quad (2)$$

где $L_{\text{3ДНЧИ}}$ – расстояние от приёмника (3D НЧИ) до эталонного излучателя, $U_{\text{3ДНЧИ}}$ – напряже-

ние на 3D НЧИ. Следует отметить, что для уменьшения влияния аппаратных погрешностей при измерениях устанавливаются одинаковые амплитуды напряжений возбуждения на эталонном излучателе при регистрации звукового давления контрольным измерительным гидрофоном и 3D НЧИ, что исключает необходимость учёта соотношения этих величин в правой части формулы (2). Согласно некоторым работам [10, 11], коэффициент взаимности, равный отношению чувствительности преобразователя по напряжению на излучение к его чувствительности на приём, не зависит от конструкции, а определяется условиями излучения, приёма и свойствами акустической среды. Однако на практике для оценки коэффициента взаимности необходимы измерения в натуральных условиях именно из-за конструктивного устройства преобразователя, условий излучения и приёма.

Определение электроакустических характеристик на излучение и приём проведено на открытой воде в эшелоне глубин от 5 до 70 м. Преобразователь, закреплённый на акустической штанге длиной 3 м в 1 м от контрольного гидрофона и 2 м от эталонного излучателя, опускался в воду при помощи оснастки, конструктивно соединяющей эталонный излучатель, 3D НЧИ и гидрофон (рис. 2).

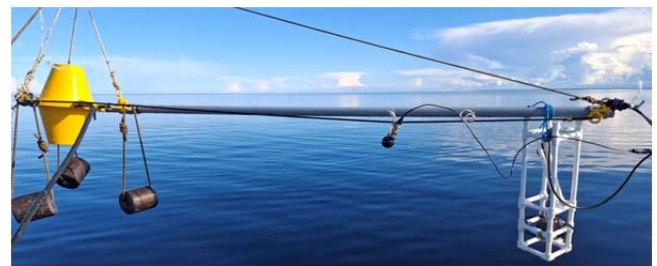


Рис. 2. Оснастка для измерения электроакустических характеристик 3D НЧИ

Для измерений и регистрации данных использовались модули АЦП NI 9215 и ЦАП NI 9263 в комплекте с шасси «National Instruments» NI cRIO-9031, гидрофон Г61Н и дифференциальный пробник напряжения 4241А «Probe Master». В качестве эталонного применялся НЧИ встречно-поршневого типа Бикон (акустический монополюс) [4]. В соответствии с методикой измерений [12], излучаемый сигнал, ток, напряжение на эталонном излучателе, а также напряжение с гидрофона и 3D НЧИ синхронно регистрировались

при помощи системы сбора данных на базе LabView 2015.

Характеристики чувствительности компактного 3D НЧИ как приёмника гидроакустических сигналов превышают характеристики чувствительности гидрофона. Характер зависимости снимаемого с работающего в режиме приёмника 3D НЧИ напряжения от частоты практически совпадает с характеристикой его чувствительности по напряжению на излучение [6]. Незначительное различие частот максимумов характеристик, построенных

для приёма и излучения, связано с различием типов резонансных явлений в колебательной системе преобразователя 3D НЧИ и не превышает диапазона инструментальных погрешностей электроакустических измерений. На рис. 3 приведены зависимости напряжения на выходе 3D НЧИ в режиме приёма от волнового размера kr , где k – волновое число, r – эквивалентный радиус излучателя, определяемый как радиус сферы объёмом, равным вытесняемому конструкцией 3D НЧИ объёму воды.

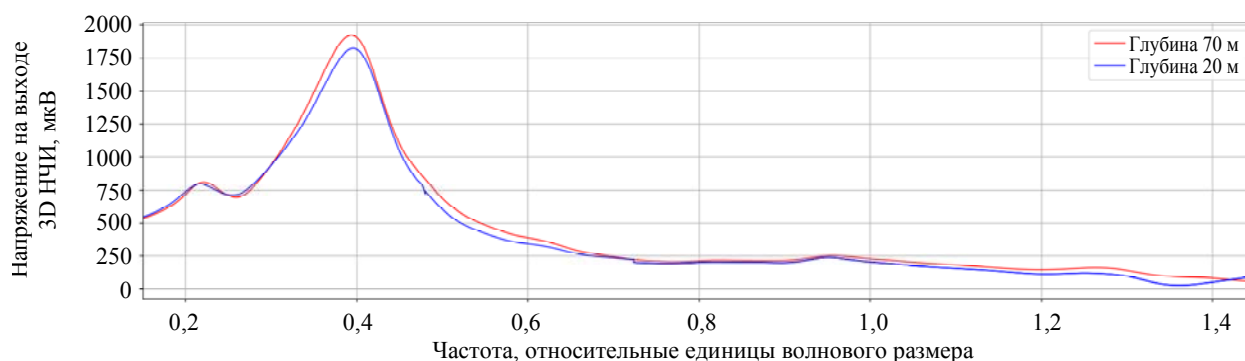


Рис. 3. Напряжение на выходе расположенного на глубине 20 и 70 м компактного 3D НЧИ при использовании его в качестве приёмного гидрофона

Благодаря специальной геометрии корпуса 3D НЧИ кривые его чувствительности как приёмника практически не меняются в эшелоне глубин до 100 м. Учитывая характеристики компактного 3D НЧИ при работе на приём, сопоставимые с параметрами серийно выпускаемых гидрофонов (например, Г61Н, Г3301, ZET 311 и т. д.), применение такого преобразователя в составе ретранслятора [13] вполне обоснованно.

Использование компактного 3D НЧИ в составе ретранслятора

Высокий коэффициент механической трансформации компактного 3D НЧИ и развитая поверхность корпуса обеспечивает за пределами его рабочей полосы частот в 5–10 раз большую чувствительность по сравнению с обратимыми гидрофонами. Для большинства обратимых гидрофонов, например, ZETLAB ZET 351 (выпускаемого компанией «Электронные технологии и метрологические системы»), максимальная акустическая мощность излучения составляет менее 1,0 Вт

(чувствительность на приём 160 мкВ/Па, рабочая полоса частот от 3 до 2500 Гц). Таким образом, 3D НЧИ в качестве гидроакустического приёмника позволит обеспечить полудуплексный режим работы ретранслятора, когда излучение ответного сигнала на другой частоте выполняется с задержкой относительно входящей посылки. Совмещение приёмника и излучателя в одном устройстве снижает габариты гидроакустического маяка, работающего в таком режиме и использующего 3D НЧИ в полосе частот за пределами основного резонанса.

Для работы в дуплексном режиме из-за высокой амплитуды напряжения на излучателе, во избежание повреждения приёмного тракта ретранслятора, необходимо использование фильтров с разделением между полосами около 120 дБ. Подобная характеристика может быть реализована на основе модели активного фильтра [14], состоящего из нескольких каскадов на операционных усилителях (рис. 4).

Ввиду ограничений существующей элементной базы по максимальным уровням входного напряжения, обеспечение работы ретранслятора в дуплексном режиме сопряже-

но с заменой интегральных микросхем первых каскадов разделительного фильтра на схемы из дискретных элементов с требуемой электрической прочностью. Таким образом, с учётом параметров существующих высоковольт-

ных транзисторов (таких, как 2SC5411, IHW30N160R5XKSA1 или 2T839A/ИМ), реализация фильтра с разделением между полосами не менее 120 дБ представляется технически возможной.

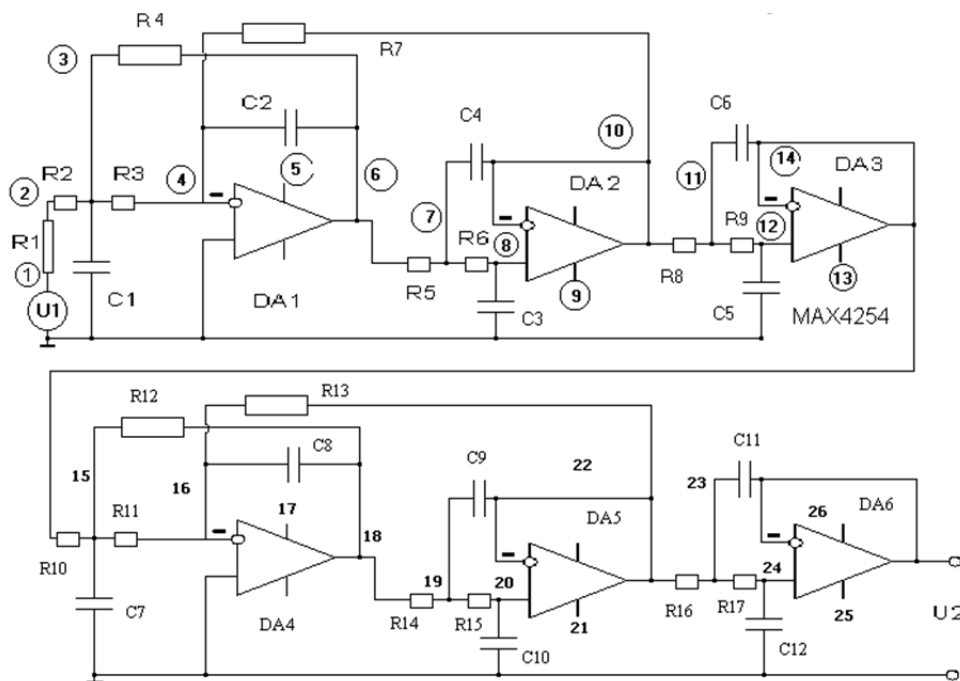


Рис. 4. Схема активного полиномиального фильтра 12-го порядка с крутизной спада более 120 дБ на октаву

Влияние глубины на характеристики излучателя

Электроакустические характеристики излучателя зависят от множества факторов, в частности – от внешнего гидростатического давления. Ввиду особой геометрии корпуса 3D НЧИ в диапазоне глубин 10–70 м жёсткость колебательной системы практически не меняется. Однако при увеличении глубины погружения под влиянием внешнего гидро-

статического давления корпус излучателя испытывает некоторую деформацию. С уменьшением прогиба оболочки незначительно падает добротность преобразователя и снижается его резонансная частота f_p , вызывая увеличение ширины частотной характеристики с 16 % (от f_p) на глубине 10 м до 20–24 % на 70 м. Дрейф f_p составляет менее 2,5 % на 100 м (рис. 5), что ниже показателей традиционных излучателей аналогичного размера продольно-изгибного типа силовой конструкции [15].

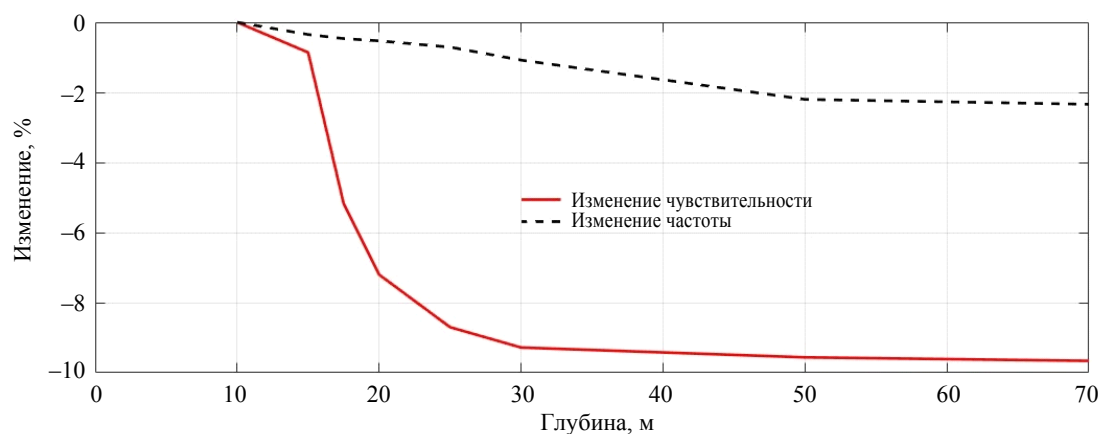


Рис. 5. Зависимость электроакустических параметров компактного 3D НЧИ от глубины

В известных преобразователях [16] с ростом глубины частота основного резонанса обычно возрастает из-за совокупного увеличения жёсткости колебательной системы преобразователя. Так, резонансная частота компактного НЧИ продольно-изгибного типа традиционной конструкции с компенсатором гидростатического давления на 200 м может подниматься на 10 % и более от f_p на глубине 30–50 м, возрастая с увеличением глубины более, чем на 3,5 % за 100 м [17].

Снижение чувствительности 3D НЧИ по напряжению, вызванное ростом сопротивления излучению при увеличении глубины, составляет около 5 % на 100 м (рис. 5), что не выходит за пределы погрешности измерений. Относительная погрешность измерения напряжения в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 и погрешностями АЦП $\delta_{\text{АЦП}} = \pm 1\%$, гидрофона – $\delta_r = \pm 12\%$, дифференциального высоковольтного пробника – $\delta_U = \pm 2\%$ и измерения расстояния до излучателя – $\delta_L = \pm 0,5\%$, определяется по формуле

$$\delta_{\gamma_{3D \text{ НЧИ}}} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2}, \quad (3)$$

где δ_i – относительные погрешности измерений, включающие погрешности измерения напряжения возбуждения (погрешности дифференциального пробника δ_U и АЦП $\delta_{\text{АЦП}}$), погрешности измерения напряжения на гидрофоне (δ_r и $\delta_{\text{АЦП}}$), расстояния от НЧИ до гидрофона δ_L и т. д. Таким образом, результирующая погрешность измерений чувствительности находится в пределах $\pm 14\text{--}15\%$ (приём) и $\pm 10\text{--}12\%$ (излучение).

Как видно из рис. 5, влияние внешнего гидростатического давления в эшелоне глубин от 20 до 50 м на параметры излучателя несущественно, однако в некоторых приложениях его нужно учитывать из-за требований к уровню развиваемого звукового давления при ограниченных энергетических ресурсах системы возбуждения.

Заключение

3D НЧИ обладает достаточной электрической прочностью, позволяющей излучать сложные сигналы с коэффициентом амплиту-

ды 1,6 и более на уровне 10–15 Вт. Неравномерность частотной характеристики работающего в режиме приёмника компактного 3D НЧИ в низкочастотном диапазоне не играет существенной роли для акустического ретранслятора ввиду возможности частотной коррекции в предварительном усилителе, а приём сигналов определённого вида не связан с требованиями высокой степени линейности частотной характеристики приёмного тракта. Сочетание компактных размеров с электроакустическими характеристиками, в частности, с высокой удельной излучаемой акустической мощностью и широкой полосой частот для приёма акустических сигналов позволяют использовать подобные 3D НЧИ в различных приложениях гидроакустики: модемах, системах звукоподводной связи, маяках-ответчиках, в том числе работающих в дуплексном режиме.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры радиотехники радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского В. Н. Бугрову, ведущему программисту отдела автоматизации научных исследований А. И. Черновой, заведующему лабораторией экспериментальной электроники В. А. Перфилову, заведующему лабораторией виброакустики М. Б. Салину и руководителю центра гидроакустики П. И. Коротину за внимание к работе, помощь в подготовке организации и проведении исследований, а также замечания при обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИППФ РАН «Распространение акустических волн в морской среде и верхнем слое земной коры» (проект FFUF-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович М. Л., Бородин М. А., Коваленко Ю. А., Хаматов Р. К. / Гидроакустика. 2020. № 44 (4). С. 37–44.
2. Зайцев А. И., Каретников В. В., Сикарев А. А. / Морская радиоэлектроника. 2017. № 3 (61). С. 6–9.
3. Каралюн В. Ю. Гидроакустический маяк-ответчик. Патент на изобретение № 2125733 С1 (РФ). 1999.
4. Бритенков А. К., Фарфель В. А., Боголюбов Б. Н. / Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72–77.
5. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А. Продольно-изгибный гидроакустический пре-

образователь. Патент на изобретение № 2681268 (РФ). 2019.

6. Бритенков А. К., Норкин М. С., Стуленков А. В., Травин Р. В. / Научное приборостроение. 2023. Т. 33. № 4. С. 28–39.

7. Шавенько Н. К. Основы теории информации и кодирования. – М.: МИИГАиК, 2012.

8. Sheehy M. J., Halley M. R. / J. Acoust. Soc. Amer. 1957. Vol. 29. № 4. P. 464–469.

9. Вершинин А. С. / Молодой учёный. 2015. № 12 (92). С. 156–161.

10. Белоусов Ю. И., Римский-Корсаков А. В. / Акустический журнал. 1975. Т. 21. № 2. С. 161–172.

11. Колесников А. Е. Акустические измерения. – Л.: Судостроение, 1983.

12. Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Фарфель В. А. / Учёные записки физического факультета Московского университета. 2020. № 1. С. 2010106.

13. Костеев Д. А., Бритенков А. К., Землюков Н. Е., Львов А. В., Салин М. Б. / Научное приборостроение. 2024. Т. 34. № 3. С. 54–63.

14. Бугров Б. Н., Макарова Ю. М. / Современная электроника и технологии автоматизации. 2017. № 1. С. 76–81.

15. Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. / Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51–55.

16. Евтютов А. П., Ляликов А. П., Митько В. Б., Пономаренко В. И., Простаков А. Л., Свердлин Г. М., Смаришев М. Д., Тарасюк Ю. Ф., Колесников А. Е. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982.

17. Бритенков А. К., Захаров С. Б., Травин Р. В., Фарфель В. А. Моделирование управляемого электрического эквивалента мощного гидроакустического излучателя со сложным импедансным спектром на основе гиратора / Тр. XXXVI сессии РАО. – Москва, 2024. С. 649–655.

PACS: 43.30.-k, 43.30.+m

Characteristics of a compact hydroacoustic transducer with high power density in transmission and reception modes

A. K. Britenkov^{1,2*}, B. N. Bogolyubov¹, R. V. Travin¹, V. A. Farfel¹,
I. I. Leonov¹, and D. A. Kosteev¹

¹ A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, 603951 Russia
* E-mail: britenkov@ipfran.ru

² National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603022 Russia

Received 5.11.2025; revised 27.11.2025; accepted 27.04.2026

The use of reversible compact low-frequency transducers in hydroacoustic repeaters designed for use at distances of up to several tens of kilometers allows reducing the mass and dimensions of such devices. The paper presents the results of electroacoustic measurements of a compact transducer with a complex shape of an all-metal case both in the emission and reception modes of hydroacoustic signals. The acoustic power emitted by such a transducer exceeds 38 W for quasi-harmonic signals and reaches 12 W for complex pulse signals. The voltage amplitude at the output of the transducer operating in the reception mode is at a level of about 1500 mV in the operating frequency band and 200–400 mV outside its operating band, which is several times higher than the indicators of existing reversible hydrophones at similar values of the received sound pressure.

Keywords: hydroacoustics; underwater sonar communication; piezoelectric transducer; hydroacoustic emitter; hydroacoustic repeater, reversible hydrophone, electroacoustics.

REFERENCES

1. Bogdanovich M. L., Borodin M. A., Kovalenko Yu. A., and Khametov R. K., Hydroacoustics, № 44 (4), 37–44 (2020) [in Russian].
2. Zaitsev A. I., Karetnikov V. V., and Sikarev A. A., Marine Radioelectronics, № 3 (61), 6–9 (2017) [in Russian].

3. Karalyun V. Yu. Underwater acoustic beacon-responder. Patent for invention № 2125733 C1 (RF). 1999.
4. Britenkov A. K., Farfel V. A., and Bogolyubov B. N., Applied Physics, № 3, 72–77 (2021) [in Russian].
5. Britenkov A. K., Bogolyubov B. N., and Smirnov S. A. Longitudinal-bending hydroacoustic transducer. Patent for invention № 2681268 (RF). 2019.
6. Britenkov A. K., Norkin M. S., Stulnikov A. V., and Travin R. V. Nauchnoe Priborostroenie **33** (4), 28–39 (2023).
7. Shavenko N. K. Fundamentals of information theory and coding. MIIGAiK, 2012 [in Russian].
8. Sheehy M. J. and Halley M. R., J. Acoust. Soc. Amer. **29** (4), 464–469 (1957).
9. Vershinin A. S., Molodoy uchenyy, № 12 (92), 156–161 (2015) [in Russian].
10. Belousov Yu. I. and Rimsky-Korsakov A. V., Acoustical Physics **21** (2), 161–172 (1975) [in Russian].
11. Kolesnikov A. E. Acoustic measurements. Sudostroenie, 1983 [in Russian].
12. Britenkov A. K., Bogolyubov B. N., and Farfel V. A., Memoirs of the Faculty of Physics. Lomonosov Moscow State University, № 1, 2010106 (2020) [in Russian].
13. Kosteev D. A., Britenkov A. K., Zemnyukov N. E., Lvov A. V., and Salin M. B. Nauchnoe Priborostroenie **34** (3), 54–63 (2024) [in Russian].
14. Bugrov B. N. and Makarova Yu. M., Sovremennaya elektronika i tekhnologii avtomatizatsii, № 1, 76–81 (2017) [in Russian].
15. Andreev M. Ya., Bogolyubov B. N., Klyushin V. V., and Rubanov I. L., Sensors and systems, № 12, 51–55 (2010) [in Russian].
16. Evtuytov A. P., Lyalikov A. P., Mitko V. B., Ponomarenko V. I., Prostakov A. L., Sverdlin G. M., Smaryshev M. D., Tarasyuk Yu. F., and Kolesnikov A. E., Handbook of hydroacoustics. Sudostroenie, 1982 [in Russian].
17. Britenkov A. K., Zakharov S. B., Travin R. V., and Farfel V. A. Proc. of the XXXVI session of the Russian Acoustic Society (RAO). Moscow, 2024, pp. 649–655 [in Russian].

Об авторах

Бритенков Александр Константинович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела акустики океана, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46); доцент кафедры радиотехники РФФ, ННГУ им. Н. И. Лобачевского. E-mail: britenkov@ipfran.ru SPIN-код: 9041-7248, AuthorID: 117978 WoS ID: AAF-4262-2022, ORCID ID: 0000-0002-0885-2510, Scopus Author ID: 57224398205

Боголюбов Борис Николаевич, к.т.н., заведующий лабораторией прикладной гидроакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: boris@ipfran.ru AuthorID: 33193

Травин Роман Вадимович, старший лаборант-исследователь лаборатории прикладной гидроакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: r.travin@ipfran.ru SPIN-код: 3323-6940, AuthorID: 1199264

Фарфель Виктор Александрович, научный сотрудник отдела акустики океана, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: vicfar@ipfran.ru AuthorID: 27023

Леонов Игорь Иванович, заведующий сектором программного обеспечения, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: leonov@ipfran.ru AuthorID: 36697

Костеев Дмитрий Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории виброакустики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46). E-mail: dkosteev@ipfran.ru SPIN-код: 5368-6339, AuthorID: 1048062

УДК 577.15, 543.55
EDN: ZCPITV

PACS: 87.15.R-

**Наносенсоры для наблюдения за единичными молекулами
цитохрома P450 BM3**

© И. Д. Шумов^{1*}, В. С. Зиборов^{1,2}, А. Н. Аблеев¹, А. В. Виноградова¹, О. Н. Афонин¹,
Н. С. Бухарина¹, Н. В. Ваулин³, Д. В. Лебедев³, А. С. Букатин³, И. С. Мухин³,
И. Н. Сараева⁴, А. И. Арчаков¹, Ю. Д. Иванов^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт
биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича», Москва, 119121 Россия

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких
температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет),
Санкт-Петербург, 194021 Россия

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, 119333 Россия

Статья поступила в редакцию 25.12.2025; после доработки 30.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13

Наблюдение за поведением одиночных молекул цитохрома P450 BM3 проводили с помощью двух наносенсоров — электрического нанопорового детектора (ЭНПД) и атомно-силового микроскопа (АСМ). ЭНПД на базе твердотельной нанопоры, сформированной в неорганической подложке на основе нитрида кремния, использовали для регистрации функциональной активности P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии NADPH. Функциональная активность исследованного фермента подтверждена методом спектрофотометрии (СФ). С помощью АСМ визуализировали динамику поведения молекул фермента на поверхности неорганической подложки. Полученные результаты наглядно демонстрируют перспективность использования нанотехнологических детекторов для определения физико-химических свойств ферментов на уровне единичных молекул с целью более глубокого понимания фундаментальных принципов функционирования ферментных систем.

Ключевые слова: цитохром P450, твердотельная нанопора, ферментативная активность, атомно-силовая микроскопия, спектрофотометрия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-94-100

Введение

Устройства с наноразмерными чувствительными элементами, сопоставимыми по геометрическим размерам с единичными макромолекулами белков и нуклеиновых кислот, все шире используются в фундаментальных исследованиях. Так, атомно-силовой микроскоп

(АСМ) позволяет визуализировать единичные макромолекулы белков, включая ферменты [1, 2], адсорбированных на твердой поверхности; в свою очередь, электрические детекторы (ЭНПД) на базе твердотельных нанопор позволяют регистрировать единичные макромолекулы ферментов [3, 4] и проводить мониторинг ферментативных процессов [5, 6].

Процессы в живых организмах катализируются ферментами [7], поэтому для понимания какого-либо процесса необходимо иметь детальное представление о механизме и кинетике функционирования регулирующих его ферментов. В настоящий момент для изучения кинетики ферментативных процессов в подавляющем большинстве случаев используют макроскопические методы; в этих методах регистрируют усредненный сигнал, поступающий от ансамбля из большого числа молекул изучаемого фермента [8]. Анализ кинетики ферментативного каталитического процесса на уровне единичных молекул является более глубоким и информативным и исключительно полезен для понимания процессов, протекающих в живых клетках [8]. В этой связи очевидна перспективность использования ЭНПД для изучения ферментативных процессов на уровне единичных молекул. Принцип работы ЭНПД заключается в регистрации ионного тока, протекающего через нанопору, сформированную в неорганической мембране, которая разделяет две камеры с раствором электролита [4–6]. Макромолекула исследуемого фермента, которую встраивают в нанопору, частично перекрывает нанопору, модулируя протекающий через нанопору ионный ток. В процессе ферментативного катализа происходят изменения структуры макромолекулы фермента в нанопоре, что, соответственно, вызывает флуктуации ионного тока, которые и регистрируются.

Следует также отметить важность использования АСМ для изучения физико-химических свойств единичных макромолекул ферментов – таких, как адсорбционные [2], диффузионные свойства [9] и ферментативная активность [1]. Так, ранее было продемонстрировано успешное использование АСМ для определения активности единичных молекул фермента цитохрома P450 BM3 [1].

В представленной работе предложено использование ЭНПД на базе твердотельной нанопоры для регистрации ферментативной активности единичной молекулы цитохрома P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии NADPH. Твердотельную нанопору формировали в мембране из нитрида кремния (Si_3N_4 , далее SiN). Взаимодействие молекулы фермента с поверхностью неорганической мембраны может оказывать влияние

на процесс встраивания этой молекулы в нанопору. В этой связи нами предложено параллельно с ЭНПД и спектрофотометрией (далее СФ) использование АСМ для изучения поведения исследуемого фермента на твердой поверхности неорганической кремнийсодержащей подложки. Учитывая позитивный опыт комбинированного использования нанотехнологических (атомно-силовая микроскопия) и макроскопических (СФ) методов исследования физико-химических свойств ферментов [2], в настоящей работе предложено использование этого подхода применительно к цитохрому P450 BM3. Использование классического метода СФ [10] позволяет подтвердить функциональную активность исследуемого фермента [2].

В качестве объекта исследования в наших экспериментах использован цитохром P450 BM3, принадлежащий к суперсемейству гем-содержащих монооксигеназ – цитохромов P450 – и катализирующий монооксигенацию жирных кислот [11]. Этот фермент является каталитически самодостаточным [11], то есть для его функционирования не требуются белки-партнеры. Этот факт делает цитохром P450 BM3 очень удобным модельным объектом для изучения системы цитохрома P450, играющей ключевую роль в метаболизме ксенобиотиков [12].

Цель настоящей работы — исследование динамики поведения единичной молекулы цитохрома P450 BM3 на неорганической подложке как до, так и в процессе ферментативной реакции.

Материалы и методы

Постановка работы. Для изучения функционирования единичной молекулы P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата в присутствии восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотидфосфата (NADPH) использовали ЭНПД на базе твердотельной нанопоры, сформированной в мембране из SiN. Параллельно подтверждали функциональную активность фермента в этой реакции классическим методом СФ [12]. Для визуализации поведения молекул исследуемого фермента на поверхности неорганической кремнийсодержащей подложки эти молекулы визуализировали при помощи АСМ в жидкости.

Реактивы и фермент. В работе использовали цитохром CYP102A1 дикого типа который был любезно предоставлен профессором А. В. Манро (A. W. Munro; Университет Манчестера, Великобритания); фермент был экспрессирован и препаратирован, как описано Neeli et al. [10]. Фермент был также экспрессирован А. В. Грудю (Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь). Лаурат натрия (чистота $\geq 99\%$) и NADPH были закуплены у фирмы Sigma (США). Гидроокись калия (ч.д.а.) и однозамещенный фосфат натрия (Na_2HPO_4 , ч.д.а.) были приобретены в Реахим (Москва). Хлористый калий (KCl) был закуплен у фирмы Fluka (ФРГ). Фосфатно-солевой буфер в модификации Дульбекко (буфер ФСБ-Д, pH 7,4; 8 ммоль/л NaHPO_4 , 2 ммоль/л KH_2PO_4 , 140 ммоль/л NaCl, 10 ммоль/л KCl) готовили из смеси солей, приобретенных у компании Pierce (США). Все растворы, использованные в экспериментах, были приготовлены с использованием деионизированной ультрачистой воды (18,2 МОм·см), полученной с помощью установки Simplicity UV (Millipore, Франция).

Измерения при помощи ЭНПД. ЭНПД включал в себя жидкостную измерительную ячейку с двумя камерами объемом 700 мкл каждая, отделенными друг от друга SiN мембраной толщиной 40 нм. В этой мембране методом электронно-лучевого сверления при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEM-2000F (JEOL, Япония) была сформирована нанопора диаметром ~ 5 нм. Перед экспериментами обе камеры заполняли ультрачистой водой, которую в экспериментах заменяли на чистый 2 ммоль/л ФСБ-Д, содержащий 0,6 моль/л KCl. В одну из камер добавляли раствор цитохрома P450 BM3, лаурат натрия и NADPH до достижения конечных концентраций 10 ммоль/л, 500 мкмоль/л и 200 мкмоль/л, соответственно. После каждого измерения чип промывали ультрачистой водой. В измерениях между объемами камер прикладывали постоянное напряжение – 400 мВ с использованием электродов Ag/AgCl. Ионный ток измеряли в частотном диапазоне 1000 Гц с помощью усилителя с уровнем внутреннего шума $\sim 0,3$ пА и регистрировали с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя

(АЦП). Сигнал обрабатывали с помощью фильтра Баттерворта с частотой 1 кГц. Детектор был экранирован посредством ячейки Фарадея для предотвращения воздействия на него внешних электромагнитных помех.

Измерения при помощи АСМ. Для исследования поведения цитохрома P450 BM3 на поверхности неорганической подложки фермент адсорбировали на поверхность подложки из свежесколотой слюды из 2 мкл 0,25 мкмоль/л раствора фермента в 10 ммоль/л ФСБ-Д с pH 7,4, который инкубировали на поверхности подложки в течение 3 мин, после чего смывали ультрачистой водой. Подготовленную таким образом подложку помещали в измерительную ячейку высокоскоростного АСМ RIBM (изготовлен проф. Т. Андо, Япония), содержащую 2,5 ммоль/л ФСБ-Д с pH 7,4. АСМ-сканирование проводили в жидкости с использованием зондов NanoWorld с радиусом кривизны менее 10 нм и золотым покрытием (длина балки зонда 2,5 мкм; резонансная частота кантилевера в воздухе и в жидкости $\sim 1,5$ МГц и 0,9 МГц, соответственно; константа жесткости $\sim 0,6$ Н/м).

Спектрофотометрические измерения. Активность цитохром P450 BM3 в реакции гидроксирования лаурата определяли по методике, разработанной Neeli et al. [10], при помощи спектрофотометра модели 8453 (Agilent Deutschland GmbH, ФРГ). В экспериментах 2 мкл 50 мкмоль/л сток-раствора фермента пипетировали в кварцевую кювету объемом 3 мл с длиной оптического пути 1 см, содержащую 500 мкмоль/л лаурата натрия в 50 ммоль/л фосфатном буферном растворе с pH 7,0, и тщательно перемешивали. После этого в кювету пипетировали раствор NADPH в том же буферном растворе так, что конечная концентрация NADPH в кювете составляла 200 мкмоль/л [10], и сразу же начинали регистрацию зависимости поглощения раствора в кювете от времени. Измерения проводили при длине волны 340 нм в течение 600 с при температуре 25 °С.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим поведение фермента в процессе катализируемой им реакции. На рис. 1 представлены типичные зависимости поглощения реакционного раствора при длине волны 340 нм (A_{340}) (слева) и ионного тока (I)

(справа) от времени (t), полученные при наблюдении за процессом ферментативной реакции методом СФ и при помощи ЭНПД, соответственно.

Зависимость $A_{340}(t)$, иллюстрирующая кинетику расходования NADPH в процессе ферментативной реакции [10] и показанная на рис. 1, подтверждает, что в экспериментальных условиях функциональная активность исследуемого фермента была вполне достаточной для осуществления ферментативного процесса. В самом деле, значение активности цитохрома P450 BM3, определенное по результатам наших экспериментов, составило 20 с^{-1} . Это значение хорошо соотносится с таковым, полученным Neeli et al. в тех же экспериментальных условиях ($50 \pm 2 \text{ с}^{-1}$ [10]). Необходимо подчеркнуть, что ферментативная реакция гидроксилирования лаурата в присутствии цитохрома P450 BM3 протекает лишь в присутствии донора электронов – NADPH [10]. Характерные пики с амплитудой

2–3 пА, свидетельствующие о флуктуациях встроенной в нанопору макромолекулы фермента в процессе катализа [6], наблюдаются на кривой зависимости $I(t)$ лишь при условии присутствия в камере измерительной ячейки всех компонентов реакционной смеси и не наблюдаются в отсутствие NADPH. Отметим, что характерные пики наблюдаются на кривой $I(t)$ в течение не менее 1200 с, что свидетельствует о сохранении этой молекулой активности в течение этого периода времени.

Как отмечено во введении, АСМ позволяет наблюдать за поведением биологических макромолекул на поверхности твердых неорганических подложек [13]. В наших экспериментах на АСМ при сканировании в жидкости (буферном растворе с pH 7,4) было обнаружено, что макромолекулы фермента перемещаются вдоль поверхности подложки, т. е. наблюдался процесс поверхностной диффузии [13]. АСМ-изображения, представленные на рис. 2, иллюстрируют этот факт.

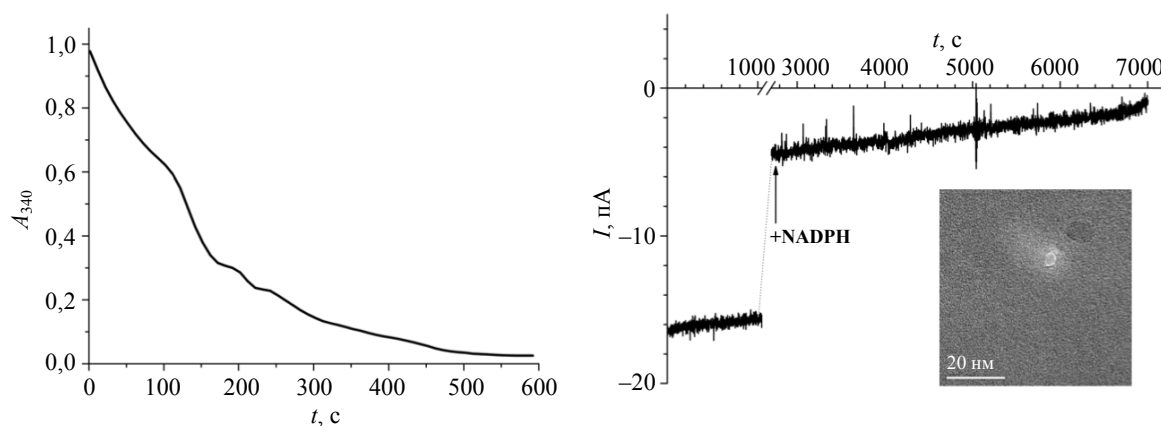


Рис. 1. Зависимости $A_{340}(t)$ (слева) и $I(t)$ (справа), полученные при наблюдении за процессом ферментативной реакции методом СФ и при помощи ЭНПД, соответственно. На вставке представлено ПЭМ-изображение нанопоры ЭНПД



Рис. 2. АСМ-изображения макромолекул BM3 в жидкости, последовательно полученные на высокоскоростном АСМ. Время на кадр 1 с. Область сканирования $200 \times 200 \text{ нм}$. Шкала высот от 0 до 4,5 нм. Кадры получены в моменты времени 0 с (слева), 23 с (в центре) и 60 с (справа)

Отметим, что на поверхности слюды экспонированы силанольные (Si-OH) группы [14]. Эти же группы присутствуют на поверхности материала мембраны (Si_3N_4) [15]. Следовательно, можно ожидать, что поведение молекул исследуемого фермента на поверхности мембраны с нанопорой сходно с его поведением на поверхности слюды, визуализированным посредством АСМ в растворе с тем же значением pH, при котором проводили эксперименты на ЭНПД. Из этого можно сделать вывод о том, что процесс поверхностной диффузии молекул фермента может оказывать влияние на их транспорт по направлению к нанопоре и встраивание в нее.

Заключение

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность использования ЭНПД для наблюдения за поведением единичной молекулы цитохрома P450 BM3 в процессе реакции гидроксирования лаурата, катализируемой этой молекулой. Активность фермента в исследуемой реакции подтверждена методом СФ. Методом АСМ визуализирован процесс поверхностной диффузии молекул фермента на неорганической подложке, который может оказывать влияние на их транспорт по направлению к нанопоре и встраивание в нее.

Измерения на ЭНПД и АСМ выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (№ 122030100168-2). Эксперименты методом СФ

выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov Y. D., Bukharina N. S., Shumov I. D., Afonin O. N., Tatur V. Y., Grudo A. V., Archakov A. I. / Biosensors 2025. Vol. 15. № 5. P. 303.
2. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D., Kozlov A. F., Ivanova I. A., Valueva A. A., Tatur V. Y., Smelov M. V., Ivanova N. D., Ziborov V. S. / Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 9022.
3. Meyer N., Abrao-Nemeir I., Janot J.-M., Torrent J., Lepoitevin M., Balme S. // Adv. Colloid. Interface Sci. 2021. Vol. 298. P. 102561.
4. Tan S. W., Gu D. J., Liu H., Liu Q. J. / Nanotechnology 2016. Vol. 27. P. 155502.
5. Chau C. C. C., Weckman N. E., Thomson E., Actis P. / ACS Nano. 2025. Vol. 19. P. 3839–3851.
6. Ivanov Y. D., Ableev A. N., Shumov I. D., Ivanova I. A., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., Archakov A. I. / Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24. P. 15636.
7. Мецлер Д. Биохимия. – М.: Мир, 1980.
8. Xie X. S., Lu H. P. / J. Biol. Chem. 1999. Vol. 274. № 23. P. 15967–15970.
9. Castronovo M., Lucesoli A., Parisse P., Kurnikova A., Malhotra A., Grassi M., Grassi G., Scaggiante B., Casalis L., Scoles G. / Nat. Commun. 2010. Vol. 2. P. 297.
10. Neeli R., Girvan H. M., Lawrence A., Warren M. J., Leys D., Scrutton N. S., Munro A. W. / FEBS Lett. 2005. Vol. 579. P. 5582–5588.
11. Narhi L. O., Fulco A. J. / J. Biol. Chem. 1986. Vol. 261. № 16. P. 7160–7169.
12. Esteves F., Rueff J., Kranendonk M. / J. Xenobiot. 2021. Vol. 11. P. 94–114.
13. Yamamoto D., Uchihashi T., Kodera N., Yamashita H., Nishikori S., Ogura T., Shibata M., Ando T. / Meth. Enzymol. 2010. Vol. 475. P. 541–564.
14. Shinohara K., Makida Y. / Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 13982.
15. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., Kakabakos S. E. / Med. Devices Sens. 2020. Vol. 3. P. e10072.

Nanotechnology-based sensors for monitoring single molecules of cytochrome P450 BM3

I. D. Shumov^{1*}, V. S. Ziborov^{1,2}, A. N. Ableev¹, A. V. Vinogradova¹, O. N. Afonin¹, N. S. Bukharina¹, N. V. Vaulin³, D. V. Lebedev³, A. S. Bukatin³, I. S. Mukhin³, I. N. Saraeva⁴, A. I. Archakov¹, and Yu. D. Ivanov^{1,2}

¹ Institute of Biomedical Chemistry (IBMC), Moscow, 119121 Russia

* E-mail: shum230988@yandex.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences (JIHT), Moscow, 125412 Russia

³ Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

⁴ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

Received 25.12.2025; revised 30.01.2026; accepted 27.04.2026

Nanotechnology-based sensors – an electrical nanopore detector (ENPD) and an atomic force microscope (AFM) – were used to monitor the behaviour of single molecules of cytochrome P450 BM3 enzyme. An ENPD, based on a solid-state nanopore formed in silicon nitride, has been used to monitor the functional activity of P450 BM3 in the reaction of laurate hydroxylation in the presence of NADPH. The functional activity of the studied enzyme has been confirmed by spectrophotometry. Using AFM, the dynamics of the enzyme molecules on the surface of an inorganic substrate has been visualized. The obtained results clearly demonstrate the potential of using nanotechnology-based detectors to determine the physicochemical properties of enzymes at the single-molecule level, thus gaining a deeper understanding of the fundamental principles of functioning of enzyme systems.

Keywords: cytochrome P450, solid-state nanopore, enzymatic activity, atomic force microscopy, spectrophotometry.

REFERENCES

1. Ivanov Y. D., Bukharina N. S., Shumov I. D., Afonin O. N., Tatur V. Y., Grudo A. V., and Archakov A. I., *Bio-sensors* **15** (5), 303 (2025).
2. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D., Kozlov A. F., Ivanova I. A., Valueva A. A., Tatur V. Y., Sme-lov M. V., Ivanova N. D., and Ziborov V. S., *Sci. Rep.* **10**, 9022 (2020).
3. Meyer N., Abrao-Nemeir I., Janot J.-M., Torrent J., Lepoitevin M., and Balme S., *Adv. Colloid. Interface Sci.* **298**, 102561 (2021).
4. Tan S. W., Gu D. J., Liu H., and Liu Q. J., *Nanotechnology* **27**, 155502 (2016).
5. Chau C. C. C., Weckman N. E., Thomson E., and Actis P., *ACS Nano* **19**, 3839–3851 (2025).
6. Ivanov Y. D., Ableev A. N., Shumov I. D., Ivanova I. A., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., and Archakov A. I., *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 15636 (2023).
7. Metzler D. E. *Biochemistry, the Chemical Reactions of Living Cells*, 1st ed., Academic Press, Cambridge, UK, 1977; Moscow, Mir, 1980.
8. Xie X. S. and Lu H. P., *J. Biol. Chem.* **274** (23), 15967–15970 (1999).
9. Castronovo M., Lucesoli A., Parisse P., Kurnikova A., Malhotra A., Grassi M., Grassi G., Scaggiante B., Casal-is L., and Scoles G., *Nat. Commun.* **2**, 297 (2010).
10. Neeli R., Girvan H. M., Lawrence A., Warren M. J., Leys D., Scrutton N. S., and Munro A. W., *FEBS Lett.* **579**, 5582–5588 (2005).
11. Narhi L. O. and Fulco A. J., *J. Biol. Chem.* **261** (16), 7160–7169 (1986).
12. Esteves F., Rueff J., and Kranendonk M. J., *Xenobiot.* **11**, 94–114 (2021).
13. Yamamoto D., Uchihashi T., Kodera N., Yamashita H., Nishikori S., Ogura T., Shibata M., and Ando T., *Meth. Enzymol.* **475**, 541–564 (2010).

14. Shinohara K. and Makida Y., Sci. Rep. **8**, 13982 (2018).

15. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., and Kakabakos S. E., Med. Devices Sens. **3**, e10072 (2020).

Об авторах

Шумов Иван Дмитриевич, к.б.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: shum230988@yandex.ru SPIN-код: 3827-1620, AuthorID: 484732, ORCID: 0000-0002-9795-7065

Зиборов Вадим Серафимович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: ziborov.vs@yandex.ru AuthorID: 31839, ORCID: 0000-0001-7942-3337

Аблеев Александр Нариманович, ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: ableev@mail.ru SPIN-код: 1193-5666; AuthorID: 1293547, ORCID: 0009-0004-3096-107X

Виноградова Ангелина Владимировна, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: angeluna1234@bk.ru SPIN-код: 3979-1650, AuthorID: 1217129, ORCID: 0009-0001-6044-3490

Афонин Олег Николаевич, к.т.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: sunweb@mail.ru SPIN-код: 1767-5835, AuthorID: 167545, ORCID: 0009-0008-7947-3674

Бухарина Наталья Сергеевна, к.б.н., младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: natalia.bukho@gmail.com SPIN-код: 8280-6076, AuthorID: 609294

Ваулин Никита Васильевич, лаборант, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: nikitavaylin@mail.ru SPIN-код: 7466-5599, AuthorID: 1212356, ORCID: 0000-0001-6080-0729

Лебедев Денис Владимирович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: denis.v.lebedev@gmail.com SPIN-код: 8079-9286, AuthorID: 751908, ORCID: 0000-0001-5389-2899

Букатин Антон Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: antbuk.fiztek@gmail.com SPIN-код: 4604-0330, AuthorID: 744078 ORCID: 0000-0002-5459-1438

Мухин Иван Сергеевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: imukhin@yandex.ru SPIN-код: 3242-8122, AuthorID: 546023, ORCID: 0000-0001-9792-045X

Сараева Ирина Николаевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) (119333, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: saraevain@lebedev.ru SPIN-код: 1795-7758, AuthorID: 889405, ORCID: 0000-0003-2362-023X

Арчаков Александр Иванович, д.б.н., Академик РАН, профессор, научный руководитель, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: alexander.archakov@ibmc.msk.ru SPIN-код: 9412-0222, AuthorID: 78435, ORCID: 0000-0002-2290-8090

Иванов Юрий Дмитриевич, д.б.н., профессор, зав. лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com SPIN-код: 7935-0461, AuthorID: 78445, ORCID: 0000-0001-5041-1914

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 A4 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 (полужирным 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, $\tan$, $\log$, $\sin$, $\exp$ 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.

Прикладная физика: Научно-технический журнал / ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2026. № 2. С. 1–104.

Подписано в печать 27.04.2026

Формат А4. Бумага офсетная.

Печать цифровая.

Тираж 140 экз. Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ».

Адрес: 119071, Москва, ул. Малая Калужская, 15.

Тел. (495) 749-45-84