

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

**ПРИКЛАДНАЯ
ФИЗИКА**

6` 25

**APPLIED
PHYSICS**

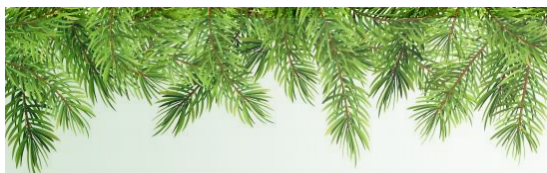


Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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



**Уважаемые читатели, авторы,
члены редакционной коллегии
журнала «Прикладная физика»!**

От всей души поздравляю всех с наступающим Новым 2026 годом и выражаю глубокую признательность за вклад каждого из вас в развитие нашего журнала!

Мы многое сделали вместе в уходящем году!

Подготовка и рецензирование статей, редакторская работа, активное общение – все это было интенсивным и содержательным. Очень надеюсь, что и в дальнейшем мы будем так же активно сотрудничать. Это прежде всего будет способствовать росту востребованности нашего издания. Пусть ваши научные труды принесут большую пользу стране и обществу, а наш журнал будет авторитетной площадкой для партнерства, дискуссий, обмена опытом, плодотворного сотрудничества!

Выражаю искреннюю благодарность дружной команде журнала за созидательный труд, профессионализм, упорство и преданность общему делу, которые доставляют удовольствие от проделанной работы!

Позвольте пожелать вам крепкого здоровья, творческого вдохновения, энергии и оптимизма в реализации всех ваших идей и проектов!

Пусть наступающий Новый год станет годом новых достижений и наполнит вашу жизнь актуальными и востребованными результатами исследований.

Счастья и успехов в новом году!

Главный редактор журнала И. Д. Бурлаков

СОДЕРЖАНИЕ

ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

Влияние локальных дефектов в окисных слоях на вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов

Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А., Попов К. А., Жукович-Гардеева А. А., Егоров А. В. 7

Управление качеством полупроводниковых монокристаллов на основе анализа данных производственного контроля

Комаровский Н. Ю., Князев С. Н., Трофимов А. А., Савиных Е. А., Соколовская Э. А., Кудря А. В. 14

Конформные тепловые метаматериалы – новые возможности управления тепловыми потоками в электронике

Сакуненко Ю. И., Кондратенко В. С., Трофимов А. А. 21

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

Обеззараживание семян подсолнечника при воздействии отрицательного коронного разряда

Бычков В. Л., Логунов А. А., Ваулин Д. Н., Шваров А. П., Изотов А. М., Тарасенко Б. А., Дударев Д. П. 26

Особенности формирования импульсного разряда в предварительно ионизированном гелии

Курбанисмаилов В. С., Рагимханов Г. Б., Терешонок Д. В., Халикова З. Р., Майоров С. А., Абакарова Х. М. 31

Направленный электрический разряд в воде по каналу с ионами соли NaCl
Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. 38

О среднеквадратичном смещении активной броуновской частицы с инерцией вращения в гармонической ловушке
Лисин Е. А., Лисина И. И. 44

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок, осажденных электронно-лучевым испарением карбида кремния в газовой среде
Бурдовицин В. А., Нгон А Кики Л. Ж., Окс Е. М., Суховольский Ф. А. 50

Исследования полиамидных мембран, модифицированных наночастицами нитрида бора, для фильтрации наночастиц серебра
Локтионова И. В., Абакумов П. В., Кузьменко А. П., Колпаков А. И., Новиков Е. А., Мамонтов В. А., Петрова Л. П. 56

ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

Исследование свойств вакуумно-плотных паяных соединений, применяемых для изготовления держателей матричных фотоприёмных устройств
Кортаев Е. Д., Гурьев Д. И., Гурьев А. И., Зиньковский А. А., Морозов Д. И., Шаров А. А. 63

Исследование эффективности канальной системы охлаждения воздуха с использованием электрогидродинамических потоков
Воеводин В. В., Жарков Я. Е., Кириллов А. С., Коржова О. И., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. 69

Оптико-акустические приемники со свободно подвешенной мембраной
Котляр П. Е. 75

ИНФОРМАЦИЯ

Сводный перечень статей, опубликованных в журнале «Прикладная физика» в 2025 г. 82

Правила для авторов 89

APPLIED PHYSICS [in Russian]

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

2025, No. 6

Founded in 1994

Moscow

CONTENTS

PHOTOELECTRONICS

The effect of defects in oxide layers on the performance of silicon photodiodes

Boltar K. O., Vildyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Molchanov D. S., Makarova E. A., Popov K. A., Zhukovich-Gardeeva A. A. and Egorov A. V.

7

Application of retrospective analysis of production control databases for quality control of GaAs single crystals

Komarovskiy N. Y., Knyazev S. N., Trofimov A. A., Savinykh E. A., Sokolovskaya E. A. and Kudrya A. V.

14

Conformal thermal metamaterials – new opportunities for managing heat flows in electronics

Sakunenko Yu. I., Kondratenko V. S. and Trofimov A. A.

21

PLASMA PHYSICS AND PLASMA METHODS

Effect of negative corona discharge on the contamination of sunflower seeds

Bychkov V. L., Logunov A. A., Vaulin D. N., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P.

26

Features of pulsed discharge formation in pre-ionized helium

Kurbanismailov V. S., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Khalikova Z. R., Maiorov S. A. and Abakarova Kh. M.

31

Guided discharge in water with the aid of NaCl crystals

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

38

On the mean square displacement of an active Brownian particle with rotational inertia in a harmonic trap

Lisin E. A. and Lisina I. I.

44

PHYSICAL SCIENCE OF MATERIALS

Electrical and optical properties of silicon-carbon films deposited by electron beam evaporation of silicon carbide in gas environment

Burdovitsin V. A., Ngon A Kiki L. J., Oks E. M. and Sukhovolsky F. A.

50

Enhanced permeability of polyamide fabrics for silver nanoparticles via modification with boron nitride

Loktionova I. V., Abakumov P. V., Kuzmenko A. P., Kolpakov A. I., Mamontov V. A., Novikov E. A. and Petrova L. P.

56

PHYSICAL EQUIPMENT AND ITS ELEMENTS

Investigation of vacuum-tight cooled assemblies for FPAs

Korotaev E. D., Guryev D. I., Guryev A. I., Zinkovsky A. A., Morozov D. I. and Sharov A. A.

63

Performance study of a channel cooling system with EHD flows

Voevodin V. V., Zharkov Ya. E., Kirillov A. S., Korzhova O. I., Moshkunov S. I. and Khomich V. U.

69

Optical-acoustic radiation receivers with a freely suspended membrane

Kotlyar P. E.

75

INFORMATION

The summary list of the articles published in Applied Physics (Prikladnaya Fizika) in 2025

82

Rules for authors

89

УДК 621.315.5:621.383
EDN: RZJFSO

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

Влияние локальных дефектов в окисных слоях на вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов© К. О. Болтарь^{1,2}, М. Н. Вильдяева¹, С. С. Демидов¹, Е. А. Климанов^{1,3,*},
Д. С. Молчанов¹, Э. А. Макарова¹, К. А. Попов¹, А. А. Жукович-Гардеева¹, А. В. Егоров¹¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: klimanov3@mail.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 РоссияСтатья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 18.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.11

Исследован механизма образования тока утечки в p^+ - n -переходах фотодиодов при наличии локальных дефектов. Рассмотрены закономерности образования локальных дефектов в диэлектрических слоях с целью определения условий, снижающих их плотность. На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n -типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались элементы (ФЧЭ) с размером площадок 1,4×1,4 мм². Технологический цикл изготовления включал операции окисления в парах H₂O + HCl, фотолитографии, загонок (осаждения) бора из BN, диффузии бора и диффузии фосфора в различных режимах. В качестве источника диффузанта при диффузии фосфора использовались как жидкие источники POCl₃ и PCl₃, так и твердый источник – пластины метафосфата алюминия (МФА) (Al₂O₃, 3P₂O₅). Установлено, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) кремниевых фотодиодов с аномальными «мягкими» характеристиками определяется туннельным механизмом протекания тока. Применение оптимальных режимов геттерирования приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с аномальными ВАХ.

Ключевые слова: кремниевые фотодиоды; монокристаллический кремний; дефекты; вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-7-13

Введение

Цикл изготовления кремниевых фотодиодов обычно включает в себя диффузию бора и фосфора с высокой концентрацией для формирования p - n -переходов и легированных областей. При этом процесс диффузии фосфора часто приводит к образованию локальных дефектов в диэлектрических слоях, служащих защитной маской [1–3]. Указанные дефекты могут приводить к образованию локальных n^+ -каналов в p^+ - n -переходах и дефекты на поверхности кремния, вызывая токи утечки

(«мягкие» вольт-амперные характеристики), приводящие к увеличению шумов фотодиодов, в том числе низкочастотных со спектром типа $1/f$.

В работе [4] были рассмотрены закономерности образования указанных дефектов с целью определения условий, снижающих их плотность.

Целью настоящей работы является исследование механизма образования тока утечки в p^+ - n -переходах фотодиодов при наличии указанных дефектов.

Эксперимент

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) *n*-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались элементы (ФЧЭ) с размером площадок $1,4 \times 1,4 \text{ мм}^2$. Технологический цикл изготовления включал операции окисления в парах $\text{H}_2\text{O} + \text{HCl}$, фотолитографии, загонки (осаждения) бора из BN, диффузии бора и диффузии фосфора в различных режимах.

В качестве источника диффузанта при диффузии фосфора использовались как жидкие источники POCl_3 и PCL_3 , так и твердый источник – пластины метафосфата алюминия (МФА) ($\text{Al}_2\text{O}_3/3\text{P}_2\text{O}_5$).

На изготовленных образцах определялась концентрация и распределение по пластине локальных дефектов с помощью оптического микроскопа. Для определения размеров и формы дефектов использовались оптический, атомно-силовой микроскопы и РЭМ. На изготовленных образцах проводились измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) ФЧЭ в диапазоне температур от $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$ и обратных напряжений от 0,01 В до 20 В.

Результаты

На части образцов наблюдалось значительное увеличение темновых токов (I_d) с ростом обратного смещения («мягкие» ВАХ). С целью определения причин указанного явления на ФЧЭ с такими характеристиками проводились измерения ВАХ в диапазоне температур от $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$ и обратных напряжений от 0,01 В до 20 В, результаты которых приведены на рис. 1. Полученные результаты показывают ослабление температурной зависимости темнового тока с ростом обратного напряжения и ее практически отсутствие при больших токах утечки (напряжение 20 В).

Для определения характера изменения I_d от обратного напряжения строилась ВАХ в координатах I_d/V от $V^{-1/2}$ (рис. 2), на которой наблюдается переход от участка с зависимостью $I_d \sim V^{1/2}$, характерной для генерационного тока, к участку с экспоненциальным ростом тока.

На рис. 3 приведены ВАХ на участке «мягкой» характеристики при двух температурах ($-60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $25 \text{ }^\circ\text{C}$), подтверждающие экспоненциальную зависимость тока от напряжения и ее слабую зависимость от температуры.

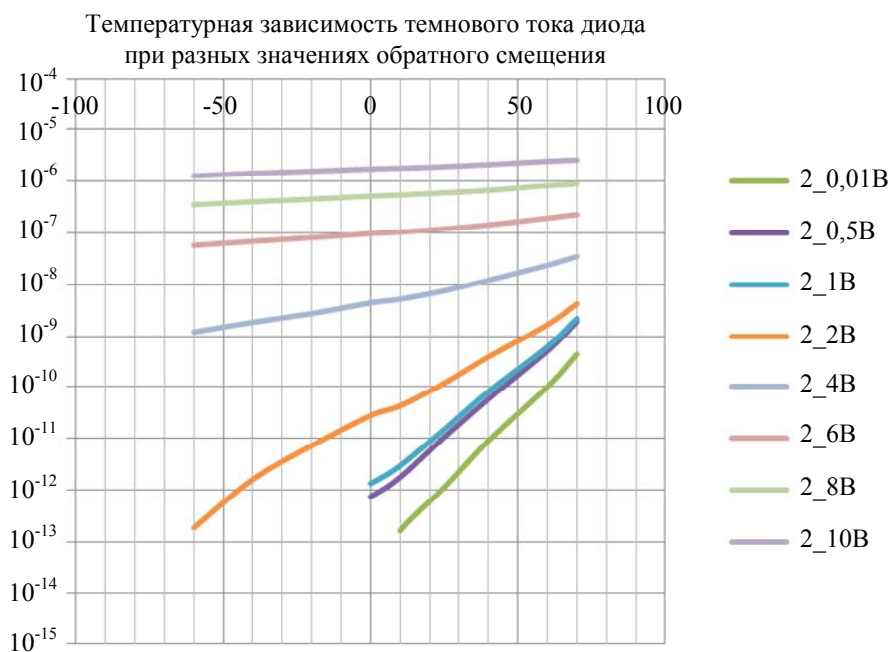


Рис. 1. Температурные зависимости тока при различных напряжениях смещения

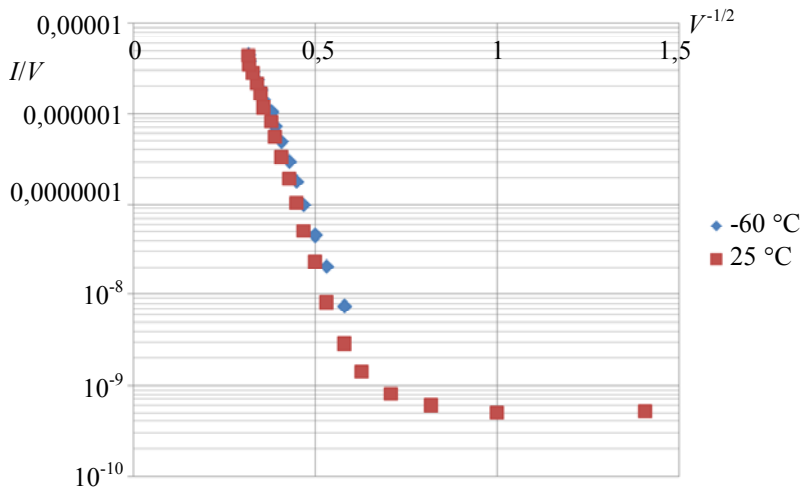
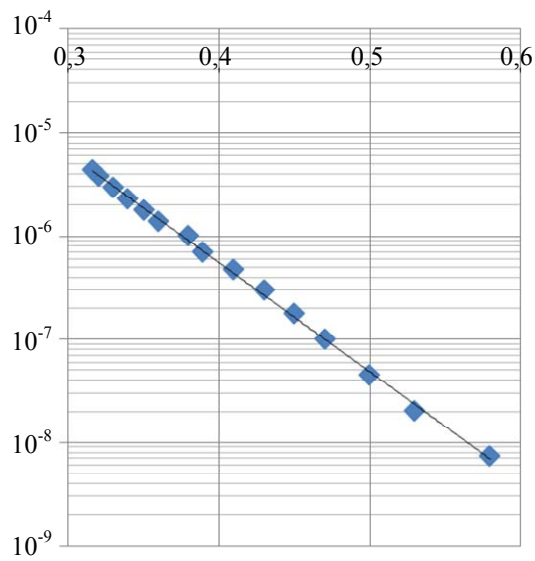


Рис. 2. Зависимость тока от напряжения при температурах $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне напряжений $0,4\text{--}10\text{ В}$



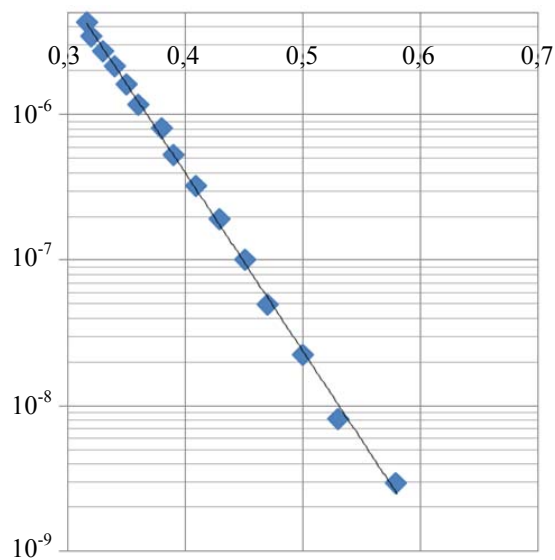
$T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$y = 0,0095e^{-24,37x}$$

$$R^2 = 0,9985$$

- ◆ 2,65E-0,9
- Экспоненциальная (2,65E-0,9)

а)



$T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$y = 0,0312e^{-28,19x}$$

$$R^2 = 0,998$$

- ◆ Ряд 1
- Экспоненциальная (Ряд 1)

б)

Рис. 3. Зависимость туннельного тока от напряжения при температурах $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне напряжений $3\text{--}10\text{ В}$

Обсуждение результатов

Полученные зависимости темнового тока от обратного напряжения на участке его экспоненциального роста свидетельствуют о туннельном механизме протекания тока.

Действительно, известное выражение для туннельного тока имеет вид [5]:

$$I = AE^2 \exp(-B/E) \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля; A , B – коэффициенты, слабо зависящие от электрического поля.

Зависимость электрического поля в резком p^+n -переходе E от приложенного напряжения V при наличии локальных областей с повышенной напряженностью поля можно представить в виде [6]:

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

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.

С учетом (1, 2) зависимость тока от напряжения можно выразить следующим образом:

$$\ln \left(\frac{I}{V} \right) = \ln a - b(V_b + V)^{-1/2} \quad (3)$$

где [5]:

$$a = \frac{(2m^*)^{1/2} q^3 EV}{4\pi^2 \left(\frac{h}{\pi} \right)^2 E_g^{1/2}}, \quad (4a)$$

$$b = \frac{4(2m^*)^{1/2} E_g^{3/2}}{3q \left(\frac{h}{\pi} \right) \beta \left(\frac{2qN_d}{\epsilon_s} \right)^{1/2} (V_b + V)^{1/2}} \quad (4b)$$

где m^* – эффективная масса электрона; E_g – ширина запрещенной зоны кремния.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, с высокой достоверностью подтверждают наличие указанной зависимости между величиной тока и приложенным напряжением при значениях β в выражении (4б) равных 184,6 и 211,8 для температур – 60 °С и 25 °С соответственно. Полученные значения β в соответствии с (2) приводят к значениям электрического поля в дефектной области $(3,1-3,6) \times 10^6$ В/см при напряжении $V = 1$ В и $(0,98-1,15) \times 10^7$ В/см при 10 В, что существенно превышает величину напряженности поля при лавинном пробое в кремнии ($\sim 5 \times 10^5$ В/см) и согласуется с литературными данными для туннельного пробоя [5, 6]. Дополнительным аргументом, подтверждающим туннельный механизм протекания тока, является его слабая температурная зависимость с отрицательным температурным коэффициентом ($dI/dT < 0$) (рис. 1).

Используя выражение (4а) и экспериментально полученные зависимости туннельного тока от напряжения (рис. 3):

$$I/V = 0,0095 \exp(-24,37V^{-1/2}) \text{ при } -60 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (5a)$$

$$I/V = 0,031 \exp(-28,18V^{-1/2}) \text{ при } 25 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (5b)$$

можно определить отношение туннельного тока к его плотности J_t и, соответственно, площадь эмитирующей области A_t из соотношения $A_t = I/J_t$. Полученные значения $A_t = 350-650$ А свидетельствуют о наличии локальных областей протекания тока, составляющих $5 \times 10^{-10} - 2 \times 10^{-9}$ от площади $p-n$ -перехода при температурах -60 °С и 25 °С соответственно.

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 [6]. 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 микрон. Сквозные дефекты указанного типа могут приводить к туннельному

пробую паразитных $p^+ - n^+$ -переходов из-за высокой концентрации легирующих примесей, а также образованию локальных дефектных областей на поверхности кремния (рис. 4), содержащих примеси кислорода, углерода [6] и тяжелых металлов (примесные преципитаты), вокруг которых увеличивается напряженность электрического поля.

Влияние указанных локальных дефектов на образование ФЧЭ с аномальными «мягкими» ВАХ подтверждается наличием корреляции между числом ФЧЭ с низкой плотностью

дефектов на пластине ($< 5 \text{ см}^{-2}$), обнаруживаемых с помощью оптического микроскопа ($N_{\text{деф}}$), и числом ФЧЭ с низкими темновыми токами ($N_{\text{фэп}}$) (рис. 5). Приведены данные для 100 пластин из разных партий изделий, на каждой из которых размещены 70 линеек по 16 ФЧЭ. 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, 4].

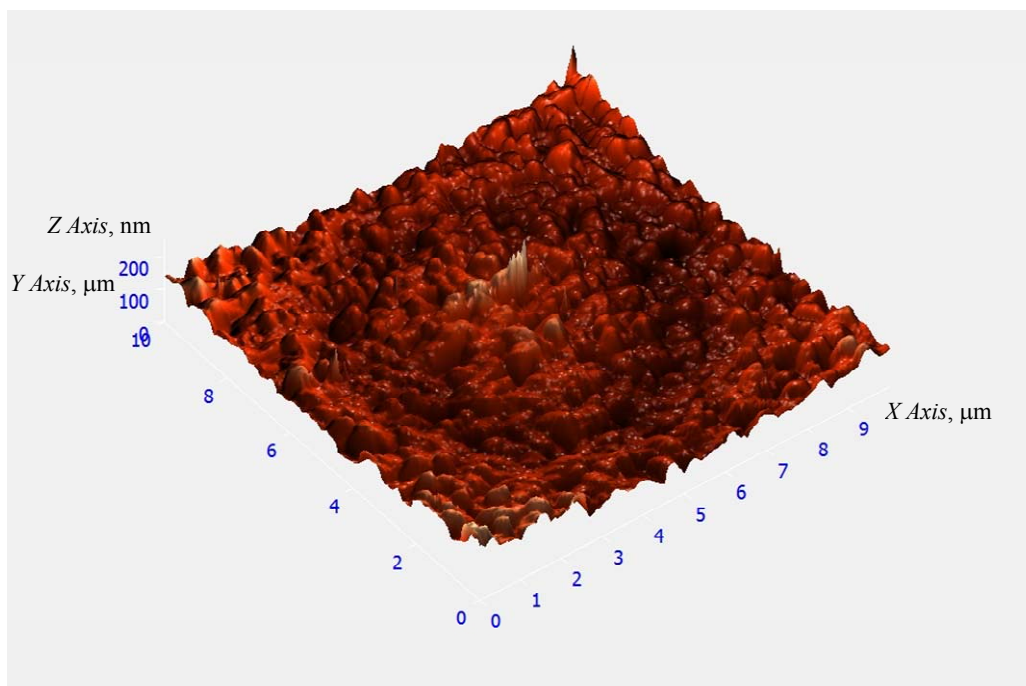


Рис. 4. Изображение дефекта в кремнии в атомно-силовом микроскопе

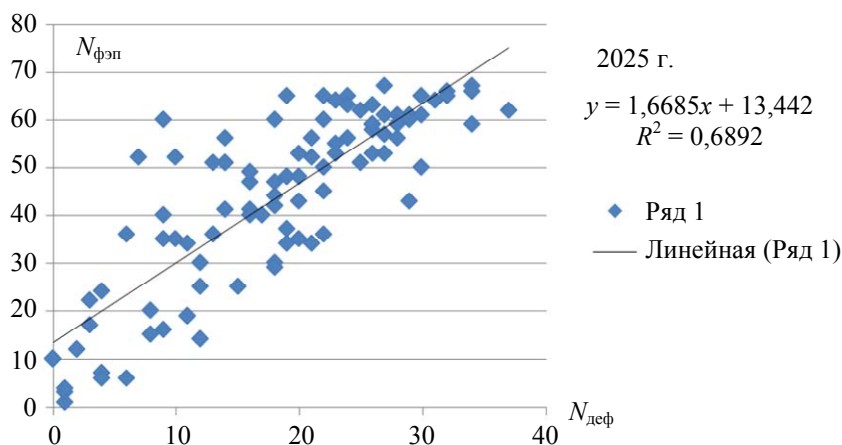


Рис. 5. Зависимость числа ФЧЭ с $I_d < 1 \times 10^{-11} \text{ А}$ при 10 мВ от числа ФЧЭ с плотностью дефектов меньше 5 см^{-2}

Из двух рассмотренных причин возникновения туннельных токов более вероятным является образование примесных преципитатов в области дефектов. Действительно, следующие за диффузией фосфора термические операции не могут удалить образовавшийся n^+ -канал. В тоже время подбором оптимальных режимов последующей операции геттерирования, приводящей к удалению загрязняющих примесей из объема кремния, в том числе и примесных преципитатов, удается практически полностью исключить образование ФЧЭ с аномальными характеристиками.

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

Выводы

1. Установлено, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) кремниевых фотодиодов с аномальными «мягкими» характеристиками определяется туннельным механизмом протекания тока.

2. Причиной возникновения туннельных токов являются локальные области небольшой

площади с напряженностью электрического поля $3 \times 10^6 - 10^7$ В/см. Причиной образования указанных областей могут быть примесные преципитаты, образующиеся на поверхности кремния при формировании дефектов в окисле.

3. Применение оптимальных режимов геттерирования примесей приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с аномальными ВАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L., Fisher A. W. / Journal of Electrochemical Society. 1982. Vol. 3. P. 667–668.
2. Storch W., Mohr U., Elstner L., Leihkauf R. / Phys. Stat. Sol. (a). 1992. Vol. 132. P. K109.
3. Miyashita M., Fukui H., Kubota A., Samata S., Hiratsuka H., Matsushita Y. / International Conference on Solid State Devices and Materials. – Yocohama, 1991. P. 568–570.
4. 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.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
6. Busta H. H., Waggner H. A. / Journal of Electrochemical Society. 1977. Vol. 124. № 9. P. 1424–1429.

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

The effect of defects in oxide layers on the performance of silicon photodiodes

K. O. Boltar^{1,2}, M. N. Vildyaeva¹, S. S. Demidov¹, E. A. Klimanov^{1,3,*}, D. S. Molchanov¹, E. A. Makarova¹, K. A. Popov¹, A. A. Zhukovich-Gardeeva¹ and A. V. Egorov¹

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 6.11.2025; revised 18.11.2025; accepted 11.12.2025

The mechanism of leakage current formation in p+-n junctions of photodiodes in the presence of local defects is investigated. The patterns of formation of local defects in dielectric layers are considered in order to determine the conditions that reduce their density. On n-type monocrystalline silicon (Cz-Si) wafers with a diameter of 100 mm and a resistivity of 4–5 ohms.cm and orientation (100) were used to produce elements with a pad size of 1.4×1.4 mm². The manufacturing process cycle included the operations of oxidation in H₂O + HCl vapors, photolithography, corraling (precipitation) of boron from BN, boron diffusion and phosphorus diffusion in

various modes. Both liquid sources POCl₃ and PCl₃ and solid sources – aluminum metaphosphate (MFA) (Al₂O₃, 3P₂O₅) plates were used as a diffusant source during phosphorus diffusion. It has been established that the current-voltage characteristic of silicon photodiodes with anomalous "soft" characteristics is determined by the tunneling current flow mechanism. The use of optimal gettering modes leads to a sharp decrease in the number of photosensitive elements with anomalous current-voltage characteristic.

Keywords: silicon photodiodes; monocrystalline silicon; defects; current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L. and Fisher A. W., Journal of Electrochemical Society **3**, 667–668 (1982).
2. Storch W., Mohr U., Elstner L. and Leihkauf R., Phys. Stat. Sol. (a) **132**, K109 (1992).
3. Miyashita M., Fukui H., Kubota A., Samata S., Hiratsuka H. and Matsushita Y., International Conference on Solid State Devices and Materials. Yocohama, 1991, pp. 568–570.
4. 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).
5. Zi S., Physics of Semiconductor Devices. Moscow, Mir, 1984.
6. Busta H. H. and Waggener H. A., Journal of Electrochemical Society **124** (9), 1424–1429 (1977).

Об авторах

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК, д.ф.-м.н., 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 РИНЦ 9249-2720, Author ID 171355

Вильдяева Мария Николаевна, инженер 1 кат., 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, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н., 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 РИНЦ 7697-4688, Author ID 171375

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

Макарова Элина Алексеевна, инженер 2 кат., 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

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

Егоров Александр Васильевич, ученый секретарь, доцент, к.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

УДК 621.315.592
EDN: VABRKA

PACS: 81.10-h

**Управление качеством полупроводниковых монокристаллов
на основе анализа данных производственного контроля**© Н. Ю. Комаровский^{1,2,*}, С. Н. Князев¹, А. А. Трофимов³, Е. А. Савиных²,
Э. А. Соколовская², А. В. Кудря²¹АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия

* E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049 Россия³АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 5.11.2025; после доработки 14.11.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 2.2.3, 2.6.1

Проведен анализ данных контроля легированных теллуrom монокристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского. Оценка соответствия распределения параметров материала и процесса выращивания монокристаллов GaAs нормальному распределению Гаусса проведена в соответствии с критериями асимметрии и Смирнова. Характеристика степени зависимости в системе «параметры материала-параметры процесса» оценивалась на основе градации величин парного коэффициента корреляции ($|r_{xy}| \in 0,013-0,420$). Между фактическими и прогнозируемыми результатами наблюдалось существенное расхождение, коэффициент корреляции R варьировался в диапазоне 0,23–0,47. Показано, что для получения высокой подвижности свободных носителей заряда при низкой плотности структурных дефектов ($N_d < 1,8 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$) необходимо обеспечить конвективное перемешивание расплава при плоском фронте кристаллизации.

Ключевые слова: метод Чохральского, $A^{III}B^V$, GaAs, анализ баз данных производственного контроля, статистика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-14-20

Введение

Монокристаллический арсенид галлия (GaAs) является одним из наиболее перспективных и востребованных полупроводниковых материалов [1]. С увеличением спроса на полупроводниковые монокристаллы GaAs повышаются требования к их качеству.

Ранее, на примере монокристаллов InSb, легированных Te, показано [2], что за счет выбора эффективного режима выращивания монокристаллов можно оптимизировать электрофизические и структурные свойства материала.

В процессе роста монокристаллов с помощью цифровых электронных средств кон-

троля проводилась промежуточная оценка структурных, электрофизических и ростовых параметров, что позволило получить массивы данных, соответствующие выбранному режиму выращивания. Сравнивая полученные данные в различных режимах и условиях технологического процесса, выявлялись критические факторы технологии, определяющие качество выпускаемой продукции [3, 4].

Под ретроспективным анализом понимается пассивный эксперимент в K -мерном пространстве параметров производственного процесса (ξ_k) или, другими словами, сквозной анализ технологии – от исходного материала до конечного продукта [5]. Эффективность такого подхода конкурирует с активным экс-

периментом (поиск зависимости качества материала γ от ξ_k , в пределах поля допуска $[\xi_k^{\min}; \xi_k^{\max}]$, по отклику $\delta\gamma_i$), при этом различный порядок материальных затрат определяет интерес к анализу информации и закономерностей из больших массивов данных (так называемые «раскопки» данных (data mining)) [6].

Целью настоящей работы явилось разработка методики управления качеством полупроводниковых монокристаллов путем поиска критических факторов технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава на основе ретроспективного анализа баз данных производственного контроля.

Объект исследования

Объектом исследования в работе являлась база данных производственного контроля штатной технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава (LEC) в кристаллографическом направлении [100]. База данных представляла собой матрицу, количество строк в которой соответствовало количеству выращенных монокристаллов (168 штук), а число столбцов – числу фиксируемых параметров процесса (V_3 , V_T – скорости перемещения затравки и тигля; W_3 , W_T – скорости вращения затравки и тигля с расплавом; $T_{он}$, $I_{фн}$ – температура основного нагревателя и ток на фоновом) и материала (плотность дислокаций и подвижность свободных носителей – $N_{дн}$ и μ).

В соответствии с принятым регламентом аттестация качества проводилась на пластинах, отрезанных перпендикулярно направлению выращивания от начала и конца монокристалла [7]. Величина градиента электрофизических параметров (концентрации свободных носителей заряда (КСНЗ)) была оценена оптическим методом по спектрам отражения в дальней и средней инфракрасной областях [8].

Процедура анализа баз данных производственного контроля включала в себя построение корреляционных и регрессионных моделей, гистограмм, разрядность (k) которых определялась минимумом среднеквадратичного отклонения найденного распределения от истинного, что достигается при $k \approx N^{1/3}$, где N – объем экспериментальной выборки [9]. Вид

распределений значений параметров технологии и продукта оценивали по величинам коэффициентов асимметрии A_s и эксцесса E_s соответствие нормальном виду распределения – по критерию согласия Смирнова, степень связи между двумя переменными γ_i и ξ_k на основе парного коэффициента корреляции $|r_{xy}|$ – по шкале Чеддока [10].

Результаты и их обсуждение

Корреляционный анализ показал, что в парах «технологические факторы-параметры качества», согласно [11], теснота взаимосвязи слабая ($|r_{xy}| < 0,3$), исключая влияние V_T , $T_{он}$, W_T , на плотность дислокаций в начале (0,37, 0,41, 0,42, соответственно) и $I_{фн}$ (-0,32) на подвижность свободных носителей заряда в конце монокристалла, что соответствовало умеренной силе связи. Такой результат может быть следствием совместного влияния температурных и динамических параметров на уровень качества и брака, что обычно описывают уравнением линейной регрессии $\gamma_i(\xi_k)$ [12]. Прогноз плотности дислокаций (N_d) и подвижности свободных носителей заряда (μ) относительно температурных и динамических параметров процесса выращивания монокристалла GaAs – W_T , V_T , W_3 , V_3 , $T_{он}$, $I_{фн}$ в рамках регрессионной модели выявил высокое расхождение фактических и прогнозируемых результатов (рис. 1) – коэффициент корреляции R варьировался в диапазоне 0,23–0,47.

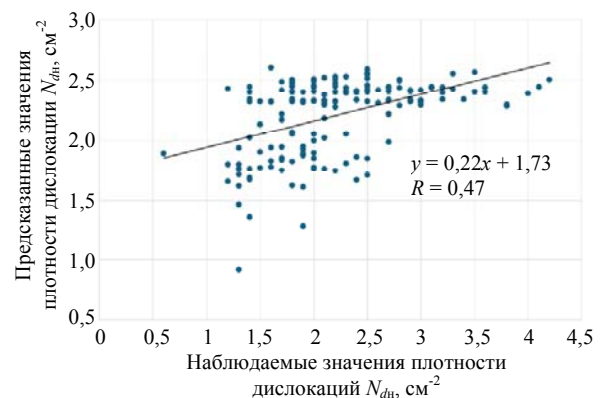


Рис. 1. Соответствие наблюдаемых и предсказанных значений плотности дислокаций

Одним из условий выполнения регрессии является соответствие вида распределения управляющих параметров нормальному зако-

ну. Однако в нашем случае, распределения значений W_3 и $T_{он}$ являются бимодальными и имеют две выраженные моды в интервалах 988–1078; 1257–1347 °С и 11,6–12,6; 14,8–15,8 об/мин (рис. 2). Для распределения значений V_3 , V_T была характерна левосторонняя асимметрия A_s (-5,4 и -2,86) при остром его пике ($E_s = 46,99$ и $15,62$), тогда как для величин W_T , $I_{фн}$ – правосторонняя (1,26 и 0,87) и значения коэффициента эксцесса E_s (1,11 и 0,87), соответственно. Аналогичная ситуация наблю-

дается и при анализе распределения значений показателей качества монокристалла GaAs: значения коэффициентов асимметрии и эксцесса для μ и N_{dk} составили 1,31–2,06 и 0,39–0,70; 11,67–14,26 и -0,33–0,34, соответственно. И если для характеристики качества для N_{dk} гипотеза о нормально распределении не отвергается (при $A_s = 0,39 < A_{скр} = 0,48$, с риском $\alpha < 0,01$ [12]), это прежде всего отражает симметричность распределения значений, но не всегда – соответствие нормальному закону.

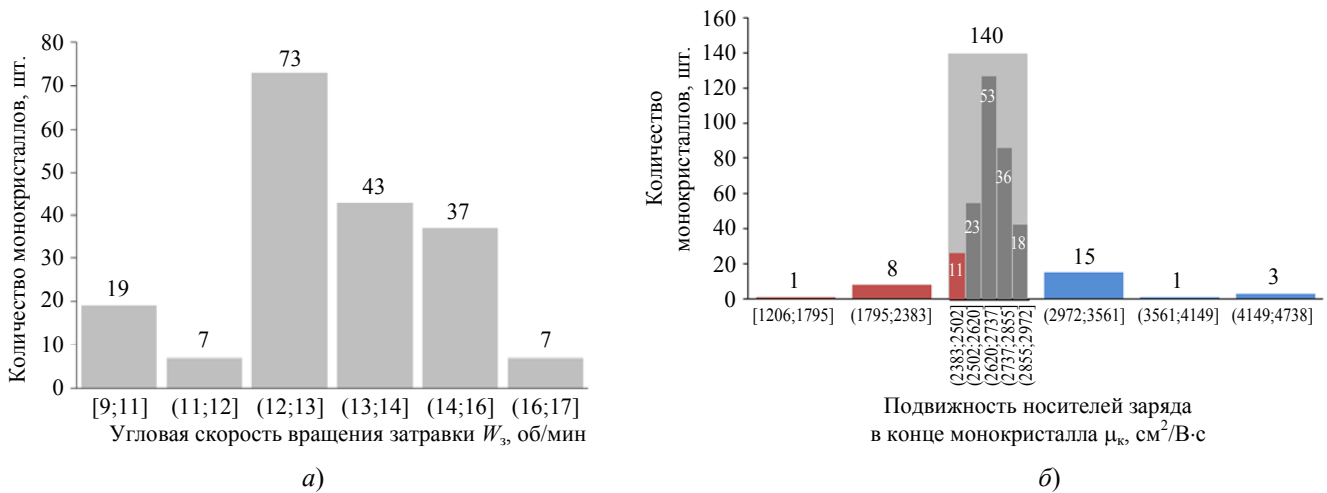


Рис. 2. Гистограммы распределений скорости вращения тигля (а), а также подвижности свободных носителей заряда в конце (б) монокристалла GaAs

В нашем случае применение непараметрического критерия Смирнова показало, что распределение значений плотности дислокаций в конце монокристаллов GaAs подчиняется нормальному закону – $t_{экр} = 0,1$ при $t_{табл} = 1,36$ $\alpha = 0,05$. В этой связи может быть полезно определение влияния технологических параметров на качество продукции, оцениваемой по совокупности значений её характеристик на верхнем и нижнем пределах их распределений (хвосты соответствующих гистограмм распределения (рис. 2б) [5].

Оценку совместного влияния параметров процесса на предельные значения характеристик качества материала проводили на основе поиска и разделения «плотных» облаков точек при отображении зависимости $\gamma_i(\xi_k)$ на разные плоскости $\xi_k - \xi_m$. При выборе оптимальной плоскости $\xi_k - \xi_m$ учитывали действующие физические закономерности. В частности, что для снижения уровня напряжений и улучшения дислокационной структуры GaAs необхо-

димо снижение неоднородности теплового поля (снижение осевого $\nabla T_o \downarrow$ и радиального $\nabla T_r \downarrow$ градиентов температур), — спрямление фронта кристаллизации. К более плоскому фронту кристаллизации и ярко выраженной огранке монокристалла приводит также повышение скорости вращения затравки W_3 и снижение скорости вращения тигля W_T [13], что подтверждает отображение зависимости $\gamma_i(\xi_k)$ на плоскость $W_3 - W_T$ (рис. 3).

Установлено, что в диапазоне скоростей вращения $W_3 = 13-17$ и $W_T = 5,5-7$ об/мин возможно получить низкий уровень плотности дислокаций в начале монокристалла, при практически нулевой вероятности получения высокой плотности дефектов кристаллической решетки ($N_{dk} > 3,0$ см⁻²). Однако получить при этом низкую плотность дислокаций в конце монокристалла ($N_{dk} \leq 1,8$ см⁻²) с риском $\alpha = 0,29$, удалось только лишь при максимальной скорости вращения кристалла $W_3 = 17$ об/мин, что также обеспечило и высокую подвижность свободных носителей в конце монокристалла.

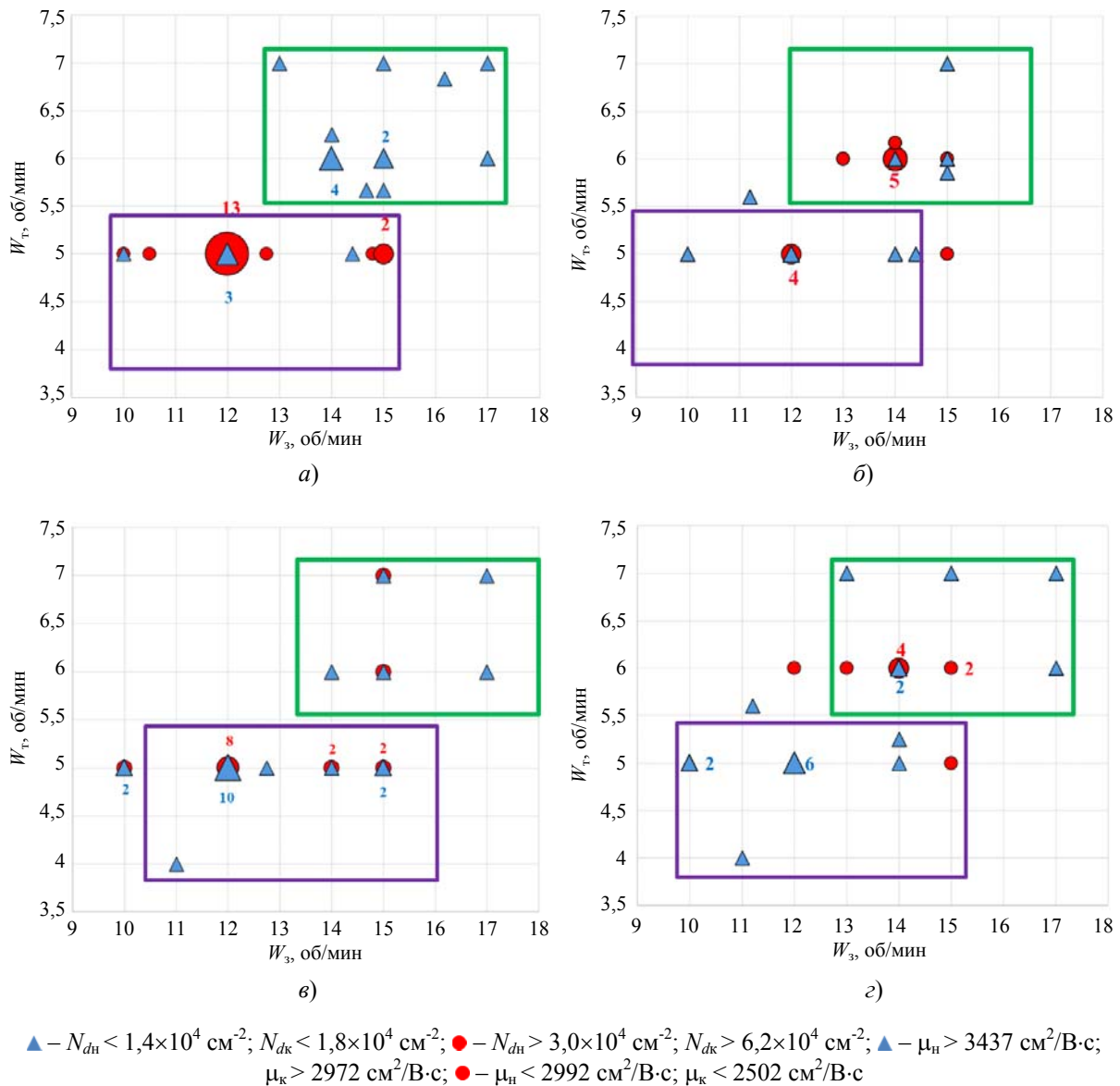


Рис. 3. Совместное влияние скоростей вращения тигля с расплавом W_m и затравки W_3 на плотность дислокаций (N_d) и подвижность свободных носителей заряда (μ) в начале (а, б) и в конце (в, г) монокристалла GaAs, соответственно

Установлено, что при $W_3 = 13$ об/мин и $W_T = 5$ об/мин в конце монокристалла с риском $\alpha = 0,25$ формируется канальная неоднородность (facet effect – эффект грани), выраженная в виде отдельных сегментов на его периферии. Область обогащенной теллуром, из-за активного захвата его атомов плоскостями $\{111\}$, не являлась существенной в масштабах пластины и составляла $\sim 4 \text{ мм}^2$ при размахе значений КСНЗ $\sim 0,7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что, однако может снизить сопротивление материала хрупкому разрушению – снижению вязкости разрушения (величины K_{IC}) [14]

Для тех процессов, где не соблюдались выявленные закономерности, проводился последовательный поштучный анализ траекторий

технологии, который позволил в ряде случаев выделить причины, этого. На этой основе была сформирована блок-схема сценариев прохождения технологического процесса выращивания GaAs с оценкой риска получения продукции с приемлемым уровнем качества (рис. 4).

Наличие такой блок-схемы позволяет оптимизировать прохождение технологического процесса – ограничивая, в частности, диапазоны изменения тех или иных технологических параметров. Так, например, снижение скорости вращения тигля с расплавом ниже 5 об/мин закономерно (за счет снижения его конвективного перемешивания), привело к увеличению количества структурных несовершенств и снижению подвижности свобод-

ных носителей заряд. Скомпенсировать влияние такого возмущения на подвижность свободных носителей μ_n оказалось возможным за счет установления следующих температурных и динамических условий – $T_{он} > 1000$ °С, $I_{фн} > 90$ А, $W_3 > 14$ об/мин, а на $\mu_k N_{dk}$ при скорости вращения затравки < 15 об/мин. В свою очередь, эффект, связанный с повышением плот-

ности дислокаций N_{dk} при пониженной скорости вращения затравки ($W_3 < 17$ об/мин) был нивелирован изменением величины соотношения $T_{он}/I_{фн}$ с 10,69 до 10,58 °С/А, например, за счет повышения тока на фоновом нагревателе, что вероятно связано с изменением осевого радиального градиента на фронте кристаллизации [15].

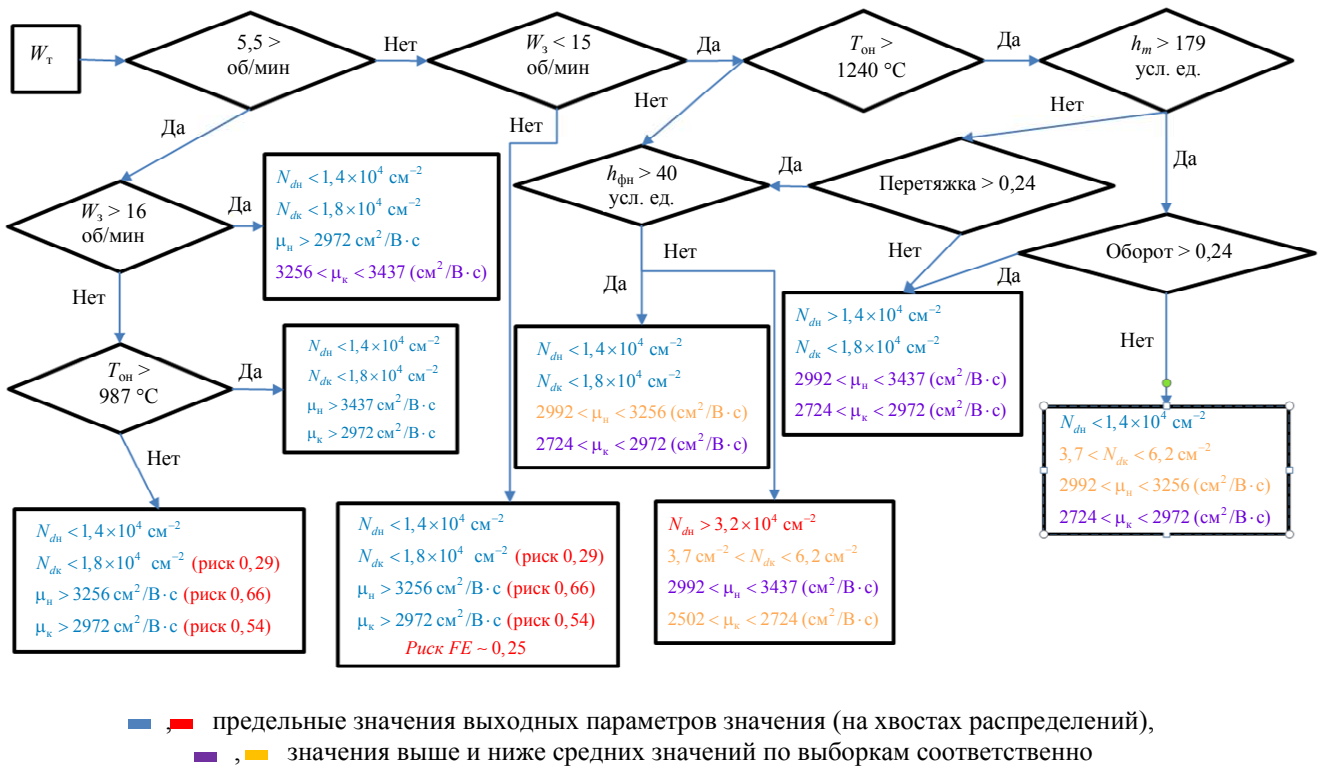


Рис. 4. Фрагмент блок-схемы сценариев прохождения процесса выращивания GaAs

Установлено также, что обеспечить предельный уровень качества монокристаллов GaAs ($N_{дн} < 1,4 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$; $N_{дк} < 1,8 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$; $\mu_n > 3437 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_k > 2972 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) становится возможным при следующем сочетании параметров процесса выращивания: $W_T > 6$ об/мин, $W_3 < 16$ об/мин, $T_{он} > 987$, $I_{фн} > 90$ А.

Выводы

1. Установлено, что распределение значений параметров технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского и его продукта не подчиняется нормальному закону, исключая распределение значений плотности дислокаций в конце монокристалла GaAs – экспериментальные значения критерия Смирнова $t_{эксп} = 0,1$ при $t_{табл} = 1,36$ и уровне риска $\alpha = 0,05$. Коэффициенты асимметрии и

экссесса экспериментальных выборок изменялись в диапазонах $-0,95-46,99$ и $-5,44-0,87$, соответственно.

2. Корреляционный анализ показал, что в системе «входные – выходные параметры» наблюдается низкая теснота связи по шкале Чеддока $|r_{xy}| = 0,0125-0,298$, исключая влияние скорости движения V_T и вращения тигля W_T , а также температуры основного нагревателя $T_{он}$, на плотность дислокаций и тока на фоновом нагревателе $I_{фн}$ на подвижность свободных носителей заряда для которых характерна умеренная теснота связи – $|r_{xy}| = 0,37, 0,41, 0,42$ и $0,32$, соответственно.

4. Между фактическими и прогнозируемыми, в рамках регрессионной модели, результатами наблюдалось существенное расхождение (коэффициент корреляции R варьировался в диапазоне $0,23-0,47$). Это свя-

зано как с отклонением вида распределения значений параметров материала и процесса от нормального закона, так и с в связи с наличием неучтенных данных о прохождении технологического процесса.

5. Подтверждена эффективность приемов когнитивной графики [4, 16, 17] для выявления критических параметров технологии (и зон их риска в пределах поля допуска), что было использовано при составлении блок-схемы сценариев прохождения процесса выращивания монокристаллов GaAs. Её наличие – основа для корректировки технологии выращивания с целью повышения качества монокристаллов GaAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маянов Е., Гасанов А., Князев С., Наумов А. / Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 2. С. 172–184. doi: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184
2. Komarovskiy N. Y., Parkhomenko Y. N., Molodtsova E. V. et al. / Russ Microelectron. 2024. Vol. 53. P. 827–834. <https://doi.org/10.1134/S1063739724701038>
3. Мачиев А. В. / Инновационная наука. 2021. № 12-2. С. 41–44.
4. Босов Е. В. Оценка возможности повышения эффективности ретроспективного анализа массивов данных производственного контроля процесса и продукта для задач управления качеством металлопродукции: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСИС, 2025.

5. Кудря А. В., Соколовская Э. А. / Качество и жизнь. 2017. № 1. С. 27–35.
6. Налимов В. В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971.
7. Book of semi standards 0600 – USA California – 2000, p. 4837
8. Комаровский Н. Ю. и др. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 54. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-54-59
9. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. – М., 1972.
10. Орлов А. А., Орлов А. И. / Контроллинг. 2024. № 4. С. 30
11. Эддоус М., Стэнсфилд Р. Методы принятия решений / Пер. с англ. под ред. член-корр. РАН И. И. Елисейевой. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.
12. Мельниченко А. С. Анализ данных в материаловедении. Часть 2. Регрессионный анализ. – М.: Издательский Дом МИ-СиС, 2014.
13. Faiez R., Asadian M. / Journal of crystal growth. 2009. Vol. 311. № 3. P. 688–694.
14. Богданова В. А. и др. / Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 2. С. 236.
15. Faiez R., Najafi F., Rezaei Y. / Intern. J. of Computational Eng. Res. 2015
16. Чебанов С. В. Когнитивная графика как способ изображения идей // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: сб. науч. тр. / РАН. ИНИОН. Центр перспект. методологий социал. и гуманит. исслед.; ред. кол.: Ильин М. В. (гл. ред.) и др. – М., 2020. Вып. 10: Вслед за Декартом. Идеальная чистота и материальная основа мышления, познания и научных методов. С. 309–376. Режим доступа: <http://www.doi.org/10.31249/metod/2020.10.16>
17. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Траченко В. А., Коротнева К. В. / Вектор науки ТГУ. 2013. № 3. С. 202–204.

PACS: 81.10-h

On the possibility of quality control of semiconductor single crystals based on retrospective analysis of production control databases

N. Y. Komarovskiy^{1,2,*}, S. N. Knyazev², A. A. Trofimov³, E. A. Savinykh²,
E. A. Sokolovskaya¹, and A. V. Kudrya¹

¹ Sazhin Giredmet JSC, Moscow, 111524 Russia

* E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

² University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

³ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 5.11.2025; revised 14.11.2025; accepted 11.12.2025

A retrospective analysis of a production control database for growing tellurium-doped GaAs single crystals using the Czochralski method was conducted. The asymmetry and Smirnov criteria were used to evaluate the normal distribution of material and process parameters. The strength of the relationship between material parameters and process parameters was assessed using the gradation of the paired correlation coefficient $|r_{xy}| \in 0.013–0.420$). A significant discrepan-

cy was observed between the actual and predicted results within the regression model (the correlation coefficient R varied in the range of 0.23–0.47). Using cognitive graphics techniques, it was shown that convective mixing of the melt with a flat crystallization front is necessary to achieve high free carrier mobility at a low density of structural defects ($N_d < 1.8 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$).

Keywords: Czochralski method, III–V, GaAs, retrospective analysis of industrial control databases, cognitive graphics techniques, statistics.

REFERENCES

1. Mayanov E., Gasanov A., Knyazev S. and Naumov A., *E'lektronika: nauka, texnologiya, biznes*, № 2, 172–184 (2018). doi: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184
2. Komarovskiy N. Y., Parkhomenko Y. N., Molodtsova E. V. et al., *Russ Microelectron* **53**, 827–834 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063739724701038>
3. Machiev A. V., *Innovative Science*, № 12-2, 41–44 (2021).
4. Bosov E. V. Evaluation of the possibility of increasing the efficiency of retrospective analysis of industrial process and product control data arrays for metal product quality management tasks: dissertation abstract, MISIS, 2025.
5. Kudrya A. V. and Sokolovskaya E. A., *Kachestvo i zhizn'*, № 1, 27–35 (2017).
6. Nalimov V. V. *Teoriya eksperimenta*. Moscow, Nauka, 1971.
7. Book of semi standards 0600 – USA California – 2000 p.4837
8. Komarovskiy N. Yu. et al., *Applied Physics*, № 6, 54 (2023) [in Russian]. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-54-59
9. Chentsov N. N. *Statistical decision rules and optimal inferences*. Moscow, 1972.
10. Orlov A. A. and Orlov A. I., *Kontrolling*, № 4, 30 (2024).
11. Eddowes M. and Stansfield R. *Methods of decision-making / Translated from English under the editorship of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Eliseeva I. I.* Moscow: Audit, UNITY, 1997.
12. Melnichenko A. S. *Data Analysis in Materials Science. Part 2. Regression Analysis*. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS, 2014.
13. Faiez R. and Asadian M., *Journal of crystal growth* **311** (3), 688–694 (2009).
14. Bogdanova V. A. et al., *Fizika tverdogo tela* **50** (2), 236 (2008).
15. Faiez R., Najafi F. and Rezaei Y., *Intern. J. of Computational Eng. Res.* 2015
16. Chebanov S. V. *Cognitive graphics as a way of depicting ideas // METHOD: Moscow yearbook of works from social science disciplines: Sat. of scientific works / RAS. INION. Center for advanced methodologies in social and humanit. research; ed. team: Ilyin M. V. (editor-in-chief) and others. Moscow, 2020. Iss. 10: Following Descartes. Ideal purity and material basis of thinking, cognition, and scientific methods, pp. 309–376. Access mode: <http://www.doi.org/10.31249/metod/2020.10.16>*
17. Kudrya A. V., Sokolovskaya E. A., Trachenko V. A., and Korotneva K. V., *Vector of Science TSU*, № 3, 202–204 (2013).

Об авторах

Комаровский Никита Юрьевич, руководитель направления лаборатории высокотемпературных полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, АО «Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru, NYKomarovskiy@rosatom.ru <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>, Scopus Author ID 58510893300, Web of Science Researcher ID NRX-9045-2025, SPIN-код: 9642-8920

Князев Станислав Николаевич, к.т.н., начальник лаборатории, АО «Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1).

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., заместитель начальника серийного производства, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

Савиных Екатерина Александровна, студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: swa.ekaterina@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0005-0748-7629>

Соколовская Элина Александровна, к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: sokolovskaya@misis.ru ORCID 0000-0001-9381-9223, Web of Science Researcher ID AAM-6419-2021, Scopus Author ID 15077468100, SPIN-код: 2633-6344, AuthorID: 185426

Кудря Александр Викторович, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: AVKudrya@misis.ru ORCID: 0000-0002-0339-2391, Web of Science Researcher ID GWZ-8579-2022, Scopus Author ID 6603628218, SPIN-код: 6497-2109, AuthorID: 11030

УДК 621.315.592:536.2
EDN: WLOPLD

PACS: 66.70.-f, 81.05.-t, 85.35.-p

Конформные тепловые метаматериалы – новые возможности управления тепловыми потоками в электронике© Ю. И. Сакуненко^{1,*}, В. С. Кондратенко², А. А. Трофимов³¹ ООО «Термоинтерфейсы», фонд Сколково, Москва, 121205 Россия

* E-mail: teplostok.plastic@gmail.com

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия³ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; после доработки 2.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.8

Представлены результаты разработки и валидации нового класса материалов – конформных тепловых метаматериалов (КТМ), обладающих уникальной триадой свойств: выраженной анизотропией теплопроводности ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20-30$, где $\lambda_{xy} = 60-80$ Вт/(м·К), $\lambda_z = 2-4$ Вт/(м·К)), обеспечивающей «тепловой разворот»; конформностью – способностью точно воспроизводить рельеф поверхностей и изгибаться до 180° для «геометрического» управления потоками; автоэффектом улучшения теплового контакта за счет микроэкструзии внутренней теплопроводящей пасты. КТМ занимают промежуточное положение между жесткими анизотропными пластинами и тепловыми трубами, сочетая их преимущества при меньшей стоимости. Валидационные эксперименты на светодиодных лентах, точечных LED-источниках и мощных резисторах показали снижение температуры кристалла на $28-45^\circ\text{C}$, что эквивалентно увеличению срока службы в $2-3$ раза. Доказана возможность замены традиционных Ш-образных радиаторов на покрытия КТМ и связанного с этим радикального улучшения массогабаритных характеристик электронных устройств.

Ключевые слова: тепловые метаматериалы; анизотропия теплопроводности; конформные материалы; тепловая маршрутизация; светодиоды.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-21-25

Введение

Проблема утилизации избыточного тепла сопровождает развитие любой техники, но в электронике она особенно критична. С ростом удельной мощности (например, в светодиодных системах до $10-15$ Вт/мм² и в процессорах до 200 Вт/см²) растет и тепловыделение, что приводит к перегреву, снижению эффективности и надежности компонентов. Традиционные решения – массивные изотропные радиаторы и термоинтерфейсы – исчерпали свой потенциал, сталкиваясь с ограничениями по неполному контакту, жесткой

геометрии и изотропной теплопроводности. Поэтому поиск альтернативных материалов для отвода тепла стал одной из главных задач индустрии. Одним из таких перспективных решений по отводу тепла является применение синтетических алмазов, выращенных методом химического осаждения из углеродной плазмы с последующим полированием до идеальной кристаллической структуры, что позволяет им максимально плотно прилегать к поверхности кристалла и эффективно отводить тепло от горячих зон [1]. Однако, стоимость такого решения остаётся высокой из-за сложности производства. Параллельно ведут-

ся разработки гибридных решений – алмазно-медных радиаторов [2]. В условиях, когда ведущие мировые производители осваивают выпуск чипов по технологическим нормам 2 нм и внедряют все более сложные упаковки чипов, поиск новых решений, обеспечивающих эффективное теплоотведение и управление тепловыми потоками становится актуальной задачей [3].

Одним из таких принципиально новых подходов является применение тепловых метаматериалов [4], свойства которых определяются не химическим составом, а специально спроектированной микроархитектурой. Такие материалы обладают особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества [5], и состоят из множества элементарных ячеек определенной формы и размера, расположенных в периодическом узоре [6].

В настоящей работе представлены результаты создания и экспериментальной валидации конформных тепловых метаматериалов (КТМ) – нового класса материалов, сочетающих сильную анизотропию теплопроводности с геометрической гибкостью и технологичностью.

Материалы и методы

Основу КТМ составляет [7, 8] металлическая матрица-каркас, представляющая собой совокупность особым образом скрепленных микропрофилированных и микроперфорированных листов алюминиевой фольги (см. рис. 1). Эта матрица полностью пропитана высоковязкой теплопроводящей пастой на основе оксидов цинка. Толщина листовых образцов составляет 1–1,5 мм.

Представленные на рис. 1 КТМ обладают уникальной триадой характеристик, отсутствующей в природных материалах.

Одной такой характеристикой тепловых свойств КТМ является анизотропия теплопроводности. Разработанная архитектура обеспечивает технически значимую анизотропию. Поперечная теплопроводность (λ_z) составляет 2–4 Вт/(м·К) (измерения проводились в лабораториях LG и Foxconn), а продольная (λ_{xy}) – 60–80 Вт/(м·К) (измерения проводились в лабораториях в Швеции и Германии). Коэффициент

анизотропии достигает 20–30, что позволяет эффективно реализовывать эффект «разворота» теплового потока и его транспортировку в плоскости материала.

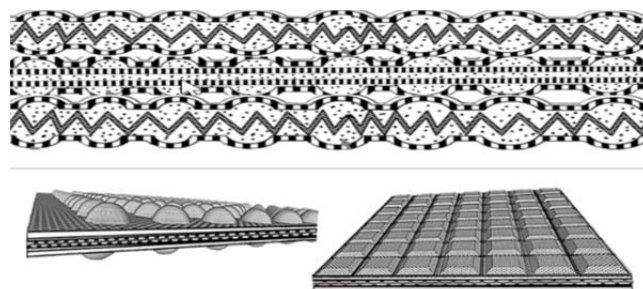


Рис. 1. Варианты топологии конформных тепловых метаматериалов

Другой ключевой характеристикой (механической) является конформность и гибкость представленного КТМ. Наличие множества микроячеек и использование тонкой пластичной фольги позволяет КТМ при минимальном давлении принимать и точно копировать (реплицировать) форму практически любых контактирующих с ними поверхностей – от прямоугольного чипа на поверхности печатной платы до цилиндрического лазера. Материал легко изгибается в любом направлении (вплоть до 180°), что открывает принципиально новые возможности геометрического управления тепловыми потоками, например, обход препятствий простым сгибом КТМ, что недостижимо для жестких графеновых пластин.

Третья особенность (технологическая) заключается в автоэффекте улучшения теплового контакта (автотермоконтакт). При монтаже теплопроводящая паста выдавливается через микроперфорацию на поверхность (реализуется «эффект пчелиных сот»), что приводит к вытеснению воздуха – основного врага теплопередачи – и обеспечивает в сочетании с пластичностью матрицы практически идеальный контакт.

Если рассматривать КТМ с точки зрения способности манипуляции тепловыми потоками (сбор тепла в области А (коллектор), его концентрация, транспортировка и выгрузка в области В (эмиттер)), то для систематизации возможностей КТМ можно ввести понятие тепловой маршрутизации, которое позволяет

классифицировать существующие решения по следующим уровням:

- L0 (отсутствие маршрутизации) – изотропные материалы (металлы, пластмассы, керамика), где направление потоков диктуется внешними градиентами;

- L1 (жесткая планарная 2D маршрутизация) – анизотропные материалы (графены), проводящие тепло вследствие их жёсткости прямолинейно;

- L2 (3D маршрутизация) – тепловые трубы, эффективно перебрасывающие тепло из точки А в точку В, но дорогие и требующие дополнительно громоздких коллекторов и радиаторов.

КТМ занимают в такой классификации промежуточное положение, обозначаемое как L1+ (гибкая планарная 2D+ маршрутизация). Они не только собирают и транспортируют тепло, как графены, но и, благодаря конформности и гибкости, способны легко изменять траекторию и конечный пункт доставки тепла, обходя препятствия и адаптируясь к реальной трехмерной геометрии устройства.

Экспериментальная валидация тепловых характеристик КТМ проводилась на светодиодных лентах, точечных LED-модулях и мощных резисторах. Температурные поля регистрировались тепловизором Testo 873 в режиме Super Resolution.

Экспериментальная часть

Для оценки эффективности КТМ для распределенных тепловых источников проводился эксперимент по охлаждению светодиодной (LED) ленты. Лента была закреплена в пластиковом профиле: одна половина охлаждалась пассивно, другая – со вставкой из КТМ (англ. СТММ) (см. рис. 2).

Как видно из рис. 2 светодиодная лента при напряжении 15 В нагрелась до 126 °С при пассивном охлаждении и до 86 °С при охлаждении со вставкой из КТМ. Таким образом, разница температур на линзах (индикатор температуры кристалла) составила ~ 40 °С в пользу участка с КТМ. Снижение температуры на 40 °С может увеличить срок службы LED в несколько раз или позволить существенно повысить световой поток.

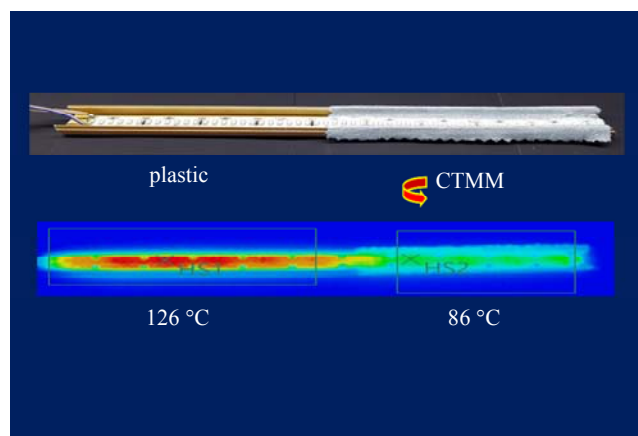


Рис. 2. Сравнение температурных полей светодиодной ленты при стандартном охлаждении (пластиковый профиль) и с применением КТМ (англ. СТММ)

Для демонстрации эффекта «теплового разворота» показана возможность перенаправления теплового потока на 180° на мощных точечных светодиодах. Один LED охлаждался традиционным Ш-образным радиатором, второй – «тюльпаном» из КТМ, охватывающим боковые и тыльную стороны и перенаправляющим тепло вперед (рис. 3).

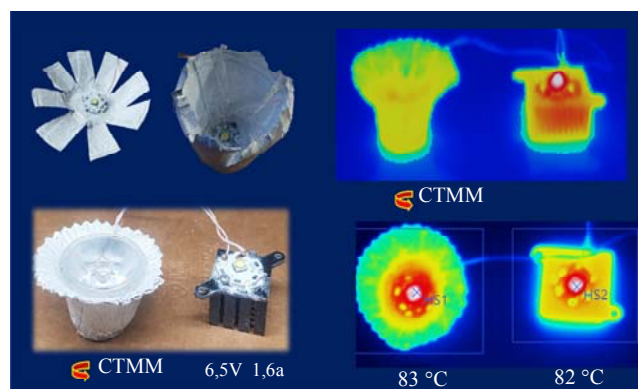


Рис. 3. Сравнение температур мощных точечных светодиодов при традиционном (тыловом) охлаждении (Ш-образный алюминиевый радиатор) и с применением КТМ (СТММ) «тюльпана» (фронтальное охлаждение)

Установившиеся температуры кристаллов, как показано на рис. 3, оказались практически идентичными, что подтверждает возможность реализации фронтального охлаждения и разворота теплового потока.

Для сравнения эффективности КТМ со стандартными радиаторами проводился эксперимент по охлаждению мощных резисторов. Применено несколько вариантов охлаждения (рис. 4): базовый, в котором охлаждение

реализовано только теплопроводящей пастой; традиционный, в котором для охлаждения применялся Ш-образный радиатор; а также

вариант с применением КТМ, в котором двумя пластинами КТМ сформирована замкнутая «кокон»-оболочка вокруг резистора.

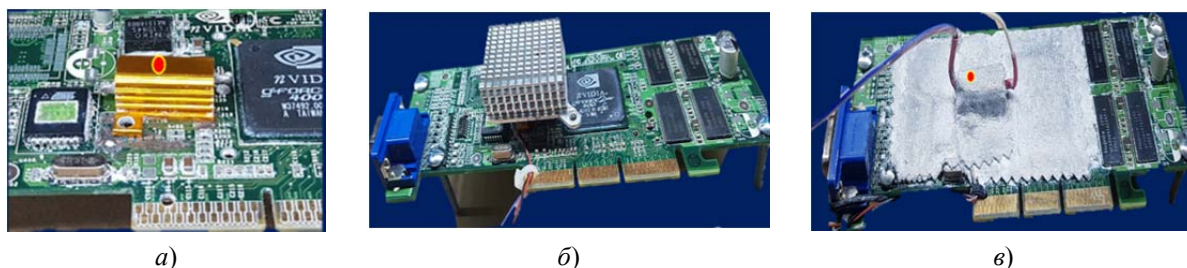


Рис. 4. Варианты охлаждения мощного резистора: а) – только термопаста; б) – стандартный алюминиевый радиатор; в) – охлаждение КТМ (конфигурация «кокон»)

Зависимость температуры мощных резисторов от рассеиваемой электрической мощности для всех трех вариантов охлаждения приведена на рис. 5.

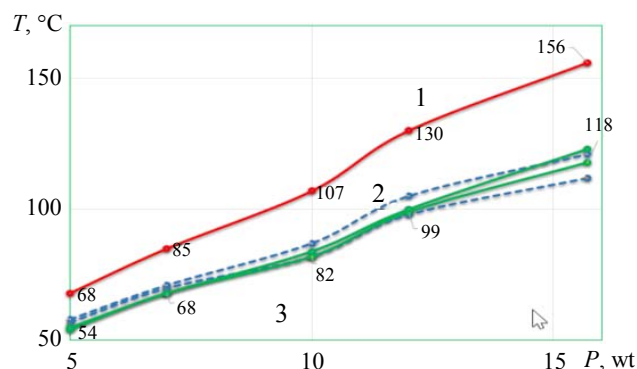


Рис. 5. Зависимость температуры мощных резисторов от рассеиваемой электрической мощности при охлаждении: 1 – только термопастой; 2 – стандартным алюминиевым радиатором; в) – КТМ (конфигурация «кокон»)

Как видно из графика на рис. 5, во всем диапазоне нагрузок до 16 Вт применение КТМ в конфигурации «кокон» (линия 3) обеспечило эффективность, эквивалентную применению стандартного алюминиевого радиатора (пунктирная линия 2), и значительно превзошла вариант с одной термопастой (линия 1). Таким образом, подтверждается возможность превращения печатной платы по существу в эффективный плоский радиатор при применении КТМ.

Заключение

Разработанные конформные тепловые метаматериалы представляют собой пол-

нофункциональное решение для управления тепловыми потоками в современной электронике. КТМ демонстрируют уникальную триаду свойств: анизотропию ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20-30$), конформность (изгиб до 180°) и автотермоконттакт, что обеспечивает беспрецедентную гибкость в управлении теплом. Экспериментально подтверждено снижение температуры кристаллов LED на $28-45^\circ\text{C}$, что эквивалентно росту срока службы в 2–3 раза. По охлаждающей способности КТМ эквивалентны в ряде случаев традиционным радиаторам, но при этом обеспечивают значительное сокращение габаритов и массы устройств, открывая путь к созданию плоских, безрадиаторных конструкций. Реализована концепция тепловой маршрутизации уровня L1+ позволяющая с помощью КТМ полноценно манипулировать теплом — собирать, концентрировать, транспортировать и адресно отдавать тепло, включая его разворот на 180° . Перспективы применения КТМ включают охлаждение устройств с импульсным тепловыделением (лазеры, лидары) и использование КТМ для элементов электромагнитного экранирования печатных плат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.nytimes.com/2025/10/08/science/diamonds-computer-chips-ai.html
2. <https://www.techpowerup.com/331456/element-six-introduces-copper-diamond-composite-material-to-enhance-cooling-of-advanced-semiconductor-devices>
3. <https://asia.nikkei.com/business/tech/semiconductors/applied-materials-says-chipmaking-is-entering-the-atomic-era>
4. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E. et al. / Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93. P. 793–818.

5. Семченко И., Хахомов С., Самофалов А., Балмаков А. / Наука и инновации. 2020. № 8. С. 23–27. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>

6. Yan Zhao et al. / New J. Phys. 2010. Vol. 12. P. 103045. doi: 10.1088/1367-2630/12/10/103045

7. Сакуненко Ю. И. Устройство отвода тепла от тепловыделяющих объектов. Патент RU 217975 U1 РФ; заявл. 06.03.2023 № 2023105094.

8. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Высоканов А. А. / Прикладная физика. 2017. № 1. С. 85–89.

PACS: 66.70.-f, 81.05.-t, 85.35.-p

Conformal thermal metamaterials – new opportunities for managing heat flows in electronics

Yu. I. Sakunenko^{1,*}, V. S. Kondratenko² and A. A. Trofimov³

¹LLC “Termointerfeisy”, Skolkovo Foundation, Moscow, 121205 Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 13.10.2025; revised 2.11.2025; accepted 11.12.2025

Overheating is a fundamental barrier to the development of electronics due to the rapid increase in heat flux density (up to 200 W/cm² in processors). The paper presents the results of the development and validation of a new class of materials – Conformal Thermal Metamaterials (CTM), possessing a unique triad of properties: pronounced thermal conductivity anisotropy ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20\text{--}30$, where $\lambda_{xy} = 60\text{--}80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_z = 2\text{--}4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), enabling "heat flow turning"; conformality – the ability to precisely replicate surface topography and bend up to 180° for geometric flow control; auto-effect of thermal contact improvement due to micro-extrusion of internal thermal paste. CTMs occupy an intermediate position (level L1+ "flexible planar routing") between rigid anisotropic plates and heat pipes, combining their advantages at a lower cost. Validation experiments on LED strips, point LED sources, and power resistors showed a reduction in crystal temperature by 28–45 °C, equivalent to a 2–3 times increase in service life. The efficiency of CTMs, comparable to aluminum radiators, has been proven, with the potential to create completely flat, radiator-free devices.

Keywords: thermal metamaterials; thermal conductivity anisotropy; conformal materials; thermal routing; LEDs.

REFERENCES

1. www.nytimes.com/2025/10/08/science/diamonds-computer-chips-ai.html
2. <https://www.techpowerup.com/331456/element-six-introduces-copper-diamond-composite-material-to-enhance-cooling-of-advanced-semiconductor-devices>
3. <https://asia.nikkei.com/business/tech/semiconductors/applied-materials-says-chipmaking-is-entering-the-atomic-era>
4. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E. et al., J. Appl. Phys. **93**, 793–818 (2003).
5. Semchenko I., Nahomov S., Samofalov A. and Balmakov A., Nauka i innovacii, № 8, 23–27 (2020) [in Russian]. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>
6. Yan Zhao et al., New J. Phys. **12**, 103045 (2010). doi:10.1088/1367-2630/12/10/103045
7. Sakunenko Yu. I. Heat removal device for heat-generating objects: Pat. RU 217975 U1 Russian Federation; filed 06.03.2023 № 2023105094 [in Russian].
8. Kondratenko V. S., Sakunenko Yu. I. and Vysokanov A. A., Applied Physics, № 1, 85–89 (2017) [in Russian].

Об авторах

Сакуненко Юрий Иванович, к.т.н., генеральный директор, ООО «Термоинтерфейсы» (121205, Россия, Москва, ул. Нобеля, 7). E-mail: teplostok.plastic@gmail.com

Кондратенко Владимир Степанович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИЦ, советник ректората, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: vsk1950@mail.ru AuthorID: 497953, Orcid ID 0000-002-2559-535X, Scopus Author ID 15834985700

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., заместитель начальника серийного производства, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

УДК 53, 63
 EDN: QFXFBU

PACS: j, 52.80

Обеззараживание семян подсолнечника при воздействии отрицательного коронного разряда

© В. Л. Бычков*, А. А. Логунов, Д. Н. Ваулин, А. П. Шваров, А. М. Изотов,
 Б. А. Тарасенко, Д. П. Дударев

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

* E-mail: bychvl@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 31.07.2025; после доработки 26.08.2025; принята к публикации 11.12.2025
 Шифр научной специальности: 1.3.9; 1.3.21*

Проведены исследования воздействия отрицательного коронного разряда на зараженность семян подсолнечника масличного направления использования. Обработка семян этой культуры холодной плазмой коронного разряда способствует снижению их зараженности грибами, вызывающими заболевания растений. По мере увеличения продолжительности воздействия эффективность применения холодной плазмы повышается. При экспозиции в 180 и 240 минут отрицательная корона снизила зараженность ржавчиной средних по крупности семян подсолнечника на 100 %, а на крупных оказалась не эффективной.

Ключевые слова: отрицательный коронный разряд; семена подсолнечника; зараженность; обеззараживание; грибные болезни.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-26-30

Введение

Для борьбы с грибными болезнями подсолнечника (такими как *ржавчина* – *Puccinia helianthi* Schwein., *фомонсис* – *Diaporthe helianthi* (Phomopsis helianthi) Muntañola-Cvetković, Mihaljcevic & Petrov. *белая гниль* (склеротиниоз) – *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Vary, *серая гниль* – *Botrytis cinerea* Pers. ex. Fr. и многими другими) обычно применяется протравливание семян химическими препаратами. Как известно [1], широкое применение пестицидов в сельском хозяйстве привело к экологическим проблемам – загрязнению окружающей среды и ухудшению здоровья людей. Растёт тенденция перехода к производству органической продукции, безопасной для здоровья. Это требует экологизации и биологизации агротехнологий. В [2, 3] показано, что плазма оказывает стерилизующее воздействие на грибы, бактерии, вирусы. Ее применение не наносит вреда природной

среде, человеку и животным, экономически выгоднее использования химических или натуральных фунгицидов и является перспективным направлением экологизации и биологизации сельскохозяйственного производства.

Обработка холодной плазмой была оценена в различных исследованиях как успешная технология для поверхностной контаминации и стимуляции прорастания семян [3, 4]. Нашими исследованиями было установлено, что низкотемпературная плазма обладает деконтаминирующей способностью, вследствие чего необходимо более глубоко исследовать это ее свойство с целью установления оптимальных параметров применения для экологизации подготовки семян полевых культур к посеву [5–8]. Вопросы воздействия коронных разрядов на поверхность семян озимой пшеницы и ячменя рассматривались нами в работах [6–8]. Было показано в ряде случаев при воздействии положительной и отрицательной корон происходит снижение зараженности

грибными болезнями, что указывало на перспективность использования коронных разрядов для обеззараживания зерна. Данная работа является продолжением этих работ [6–8]. В ней проведены исследования воздействия отрицательного коронного разряда на общую зараженность семян подсолнечника. Ранее такие исследования не проводились, хотя указание на необходимость поиска воздействия на грибы на семенах подсолнечника была указана в [1]. Выбор отрицательной короны связан с тем, что в экспериментах [6–8] было показано, что уничтожение грибов отрицательной короной происходит более интенсивно, чем положительной.

Экспериментальная установка

В данной работе использовалась та же установка, что и в [7, 8], где представлена принципиальная схема и фотографии установки, для исследования воздействия коронного разряда на грибные заболевания. Она состоит из кюветы, заполненной изучаемым веществом, и электрической цепи. Верхний набор электродов из 19 игл (с радиусом кончика 0,4 мм) располагался на высоте 8 мм над поверхностью зерна. Расстояние между электродами в многоэлектродной композиции составляло 11 мм. Электроды находились под отрицательным напряжением. Кювета была диэлектрической с металлическим электродом на её дне, цилиндрической, диаметр кюветы составлял 90 мм, обрабатываемая площадь составляла 6400 мм², высота кюветы – 18 мм. Для более равномерной обработки вещества в кювете использовался электрический двигатель, приводящий к вертикальному перемещению зерна. Масса зерна в кювете во всех случаях 70 г. Зерна в кювете составляли около 12 слоев. В слое находилось 98–100 зерен, вес слоя был около 6 г. Использовался источник постоянного тока, напряжение в эксперименте изменялось в пределах $U = 8–10$ кВ, ток изменялся в пределах $I = 20–100$ мкА.

Результаты измерений

В таблице представлены данные по зависимости средних параметров разряда отри-

цательной короны от времени. Из таблицы видно, что параметры разряда менялись во время измерений, что было связано с непостоянством силы тока и величины напряжения на разряде. При этом величина вложенной в зерно энергии при временах обработки 3 и 4 часа менялись в среднем на 30 %.

Таблица

Зависимость средних параметров отрицательной короны от времени

Время	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч
Напряжение, кВ	8	8,7	8,7	8,6
Ток, мкА	6,5	8,3	9,1	5

Контроль зараженности семян подсолнечника проводился в соответствии с методиками, разработанными Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский центр карантина растений» ФГБУ «ВНИИКР» и изложенными в их методических рекомендациях 67-2021, с использованием Определителя болезней растений [9]. Семена помещались в простерилизованные в автоклаве чашки Петри с двумя слоями простерилизованной фильтровальной бумаги, смоченной прокипяченной в течение 30 минут в закрытой колбе водой (или простерилизованной). Проращивание семян проводилось в термостате при температуре 22–23 °С. Через 10 и 14 суток с применением микроскопа определялась зараженность семян подсолнечника. Тесты делали на все основные грибные болезни подсолнечника. Было установлено, что семена заражены только ржавчиной.

При экспозиции в 180 и 240 минут отрицательная корона способствовала полному обеззараживанию средней крупности семян (масса 1000 семян 55,8 г) масличного подсолнечника от ржавчины и не оказала воздействия на это заболевание у крупных семян (масса 1000 семян 79,7 г). Доказуемого эффекта деконтаминационного воздействия холодной плазмы на крупные семена подсолнечника нами в проведенном эксперименте не выявлено. Наиболее вероятно это связано с толщиной оболочки и степенью выполненности семян. (Выполненность зерна — это степень его созревания и налива, законченность процессов синтеза веществ, входящих в

состав созревшей зерновки.) В случае мелких и средних по крупности семян подсолнечника их оболочка тонкая и гладкая, а в случае крупных семян оболочка более плотная и ребристая.

Результаты показывают, что за время обработки ионы и активные частицы плазмы, появляющиеся в коронном разряде, не успевают проникнуть внутрь утолщенной оболочки семян подсолнечника. Поэтому при использовании плазмы коронного разряда становятся важными время обработки или, соответственно, мощность установки. В случае обработки мелких и средних семян подсолнечника можно увеличить напряжение на разряде до 20–25 кВ, при этом время обработки зерна уменьшится вдвое.

Вторым важным обстоятельством является толщина оболочки. Использование плазмы коронного разряда эффективно только в случае тонких оболочек. Следует отметить, что наш опыт работы с зерном пшеницы и ячменя показывает, что в случае использования отрицательной короны результаты воздействия оказываются лучше, чем при использовании положительной короны. Это в первую очередь связано с различным молекулярным составом плазмы, ибо в плазме отрицательной короны производится больше отрицательных атомарных ионов кислорода O^- и атомов кислорода O в процессах диссоциативного прилипания электронов e к молекулам кислорода O_2 ($e + O_2 \rightarrow O + O^-$) [10]. Эти частицы преобразуются в молекулы озона O_3 в реакциях $O^- + O_2 \rightarrow e + O_3$ и $O + O_2 + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$ [10] которые усиливают стерилизирующее действие поверхности зерна.

Заключение

Обработка семян масличного подсолнечника холодной плазмой коронного разряда способствует существенному снижению их

зараженности ржавчиной (*Puccinia helianthi* Schwein.) По мере увеличения продолжительности воздействия эффективность применения холодной плазмы повышается. При экспозиции в 180 и 240 минут отрицательная корона привела к полному (100 %) обеззараживанию средних по крупности семян подсолнечника от возбудителя ржавчины и не оказала деконтаминационного воздействия на крупные семена подсолнечника. Для использования коронного разряда для воздействия на семена подсолнечника надо выбирать сорта с тонкой кожурой. Если рассматривать воздействие холодной плазмы на семена картофеля, то нет отличия от обработки зерна подсолнечника и картофеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балаян В. М.* Аптека для растений. – М.: Просвещение, 1985.
2. 1st International Workshop on Plasma Agriculture [Электронный ресурс]: www.iwopa.org
3. 2nd International Workshop on Plasma Agriculture [Электронный ресурс]: www.iwopa2.org
4. *Los A., Ziuzina D., Bourke P.* / J. Food Sci. 2018. Vol. 83. P. 1–10. doi: 10.1111/1750-3841.14181
5. *Гордеев Ю. А.* Стимулирование биологических процессов в семенах растений излучениями низкотемпературной плазмы. – Смоленск: Смоленская ГСХА, 2008.
6. *Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Izotov A. M., Tarasenko B. A., Dudarev D. P.* / IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1034–1040.
7. *Bychkov V. L., Goriachkin P. A., Chernikov V. A. et al.* / Proc. Intern Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety". – Kaliningrad. 2023 / Eds. Borchevskina O. P., Golubkov M. G., Karpov I. V. P. 307–310.
8. *Бычков В. Л., Горячкин П. А., Черников В. А., Шваров А. П., Изотов А. М., Тарасенко Б. А., Дударев Д. П.* / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 15–21.
9. *Хохряков К. М., Доброзракова Т. Л., Степанов К. М., Летова М. Ф.* Определитель болезней растений / под ред. Хохряков М. К. – Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2003.
10. *Лунин В. В., Самойлович В. Г., Ткаченко С. Н., Ткаченко И. С.* Теория и практика получения и применения озона. – М.: Изд-во Московского университета, 2023.

Effect of negative corona discharge on the contamination of sunflower seeds

V. L. Bychkov*, A. A. Logunov, D. N. Vaulin, A. P. Shvarov, A. M. Izotov,
B. A. Tarasenko and D. P. Dudarev

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

* *E-mail: bychvl@gmail.com*

Received 31.07.2025; revised 26.08.2025; accepted 11.12.2025

Studies of the influence of negative corona discharge on the contamination of sunflower oilseeds have been conducted. Treatment of seeds of this crop with cold plasma corona discharge helps to reduce their infection with fungi that cause plant diseases. As the duration of exposure increases, the effectiveness of cold plasma increases. With an exposure of 180 and 240 minutes, the negative corona reduced the rust contamination of medium-sized sunflower seeds by 100 %, but was ineffective on large ones.

Keywords: corona discharge; sunflower seeds; infestation; germination; disinfection; fungal diseases.

REFERENCES

1. Balayan V. M. Pharmacy for plants. Moscow, Prosveshenie, 1985 [in Russian].
2. 1st International Workshop on Plasma Agriculture [Electronic resource]: www.iwopa.org
3. 2nd International Workshop on Plasma Agriculture [Electronic resource]: www.iwopa2.org
4. Los A., Ziuzina D. and Bourke P., *Food Sci.* **83**, 1–10 (2018). doi: 10.1111/1750-3841.14181
5. Gordeev Yu. A. Stimulation of biological processes in plant seeds by low-temperature plasma radiation. Smolensk, Smolensk State Agricultural Academy, 2008 [in Russian].
6. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **49** (3), 1034–1040 (2021).
7. Bychkov V. L., Goriachkin P. A., Chernikov V. A. et al. *Proc. Intern Conf. Atmosphere, Ionosphere, Safety.* / Eds. Borchevkina O. P., Golubkov M. G., Karpov I. V., Kaliningrad, 2023, pp. 307–310.
8. Bychkov V. L., Goriachkin P. A., Chernikov V. A., Shvarov A. P., Izotov A. M. et al., *Applied Physics*, № 2, 15–21 (2023) [in Russian].
9. Khokhryakov K. M., Dobrozrakova T. L., Stepanov K. M. and Letova M. F., *Disease determinant plants* / Ed. Khokhryakov M. K., St. Petersburg-Moscow-Krasnodar, Lan, 2003 [in Russian].
10. Lunin V. V., Samoilovich V. G., Tkachenko S. N. and Tkachenko I. S. *Theory and practice of obtaining and applying ozone.* Moscow, Publishing House of Moscow University, 2023 [in Russian].

Об авторах

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

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

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

Ваулин Дмитрий Николаевич, к.ф.-м.н., ведущий инженер, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: vaud@yandex.ru; Scopus ID: 36107282900

Изотов Анатолий Михайлович, д.б.н., главный научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: a.m.izotov@mail.ru; WoS ResearcherID ABA-6764-2021; Scopus AuthorID 57212196289; ORCID 0000-0003-0286-9757; SPIN-код: 5193-9448; AuthorID: 799465

Тарасенко Борис Алексеевич, к.с.-х.н., доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: boris.tarasenko.58@mail.ru; Scopus AuthorID 57220263009; ORCID 0000-0003-2024-833X; SPIN-код: 9033-9958; AuthorID: 800486

Дударев Дмитрий Петрович, к.с.-х.н., доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2). E-mail: kdime_80@mail.ru; WoS ResearcherID ABA-6307-2021; Scopus Author ID 57214127008; ORCID 0000-0002-9800-2682; SPIN-код: 8779-8810; AuthorID: 795113

УДК 533.92
EDN: QQASPN

PACS: 52.80. Mg

Особенности формирования импульсного разряда в предварительно ионизированном гелии

© В. С. Курбанисмаилов¹, Г. Б. Рагимханов^{1,*}, Д. В. Терешонок², З. Р. Халикова¹,
С. А. Майоров², Х. М. Абакарова¹

¹ Дагестанский государственный университет, Республика Дагестан, Махачкала, 367025 Россия
* E-mail: gb-r@mail.ru

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

Статья поступила в редакцию 27.08.2025; после доработки 22.09.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.9

Представлены результаты экспериментального исследования импульсного газового разряда в гелии при атмосферном давлении с ультрафиолетовой предыонизацией газа в системе «сетчатый катод – плоский анод». Напряжение на разрядном конденсаторе изменялось в диапазоне 3–14 кВ. Установлено, что амплитудное значение тока монотонно возрастает от десятков единиц до ~1000 А с увеличением прикладываемого напряжения, демонстрируя почти линейную зависимость амплитудного значения тока I_{max} от прикладываемого напряжения.

Ключевые слова: импульсный газовый разряд; гелий; предварительная ионизация; аперидический режим.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-31-37

Введение

Исследование физических процессов в импульсных газовых разрядах при атмосферном и более высоких давлениях представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, в частности, для разработки эффективных источников излучения в ВУФ, УФ и видимом диапазонах, а также для накачки газовых лазеров. Существенную роль в формировании таких разрядов играют механизмы предыонизации газа, геометрия электродной системы, параметры высоковольтного импульса напряжения и свойства рабочей газовой среды.

В обзоре Осипова В. В. [1] излагается современное состояние исследований области физики мощных электрических разрядов, способных возбудить большие объемы газа. Приведены свойства и особенности самостоятельных разрядов высокого давления. Рас-

смотрены экспериментальные результаты и физические модели их формирования и контракции. Показано, что нижняя граница зажигания объемного разряда связана с катодной неустойчивостью. Отмечены трудности построения полной теории объемного разряда. При этом одной из главных причин, контракции разряда является развитие взрывных процессов на поверхности электродов-эктонов, чему посвящена обзорная работа Г. А. Месяца [2].

Обзорная работа В. Ф. Тарасенко и соавт. [3] обобщает данные по диффузным и объемным разрядам высокого давления с поперечной накачкой. Подчеркивается, что главное различие между ними обусловлено механизмом зажигания: объемный разряд требует предыонизации и однородного поля, а диффузный реализуется за счёт стримерного пробоя и убегающих электронов, особенно при малом радиусе кривизны электродов.

В серии современных исследований с использованием высоковольтных импульсов [3–7] показано, что структура и динамика разрядного канала зависят от предыстории ионизации, распределения поля и давления газа. Установлено, что при определённых параметрах схемы и газа может реализовываться колебательный режим тока, вызванный паразитной индуктивностью цепи [8–10], а пространственная структура разряда может претерпевать переход от диффузной к искровой.

В ранее приведенных нами исследованиях [11–13] подробно проанализированы электрические, оптические и спектральные характеристики импульсного разряда в гелии с УФ-предыонизацией (катод-сплошной, анод-сетчатый). В [11] проанализирован процесс контрагирования объемного разряда в гелии атмосферного давления при изменении начальных условий эксперимента. В [12] изучены особенности спектра излучения исследуемого газа и спектра материала вещества электродов при различных начальных условиях, а именно в режиме однородного горения ОР, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в сильноточный диффузный режим (СДР) в импульсном разряде гелия высокого давления. В работе [13] рассмотрены экспериментальные результаты исследования спектра излучения импульсного разряда в парогазовых смесях гелия высокого давления, в котором легкоионизируемые примеси паров материала электродов (Fe, Al) появляются из-за распыления электродов при ионной бомбардировке. Показано, что пары материала электродов существенно влияют на разряд и во многом определяют его спектральные характеристики.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования импульсного газового разряда в гелии при атмосферном давлении с ультрафиолетовой предыонизацией газа в системе «сетчатый катод – плоский анод» и проведено сравнение экспериментальных данных с расчётами параметров эквивалентной схемы.

Экспериментальная установка и измерения

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки по исследованию импульсно-

го разряда в гелии. После зарядки конденсатора C_0 до 3–14 кВ напряжение с него подавалось на два электрода: плоский анод с радиусами $r_0 = 2$ см и сетчатый катод с расстоянием между ними $d = 1$ см. Для предварительной ионизации использовался искровой разряд.

Фотографирование интегрального свечения разряда осуществлялось с помощью беззеркального цифрового фотоаппарата Sony Alpha A7 III (ILCE-7M3B). Напряжение и ток разряда регистрировались с применением цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 2024B с полосой пропускания 200 МГц с помощью малоомного шунта R_b и омического делителя напряжения R_1, R_2 .

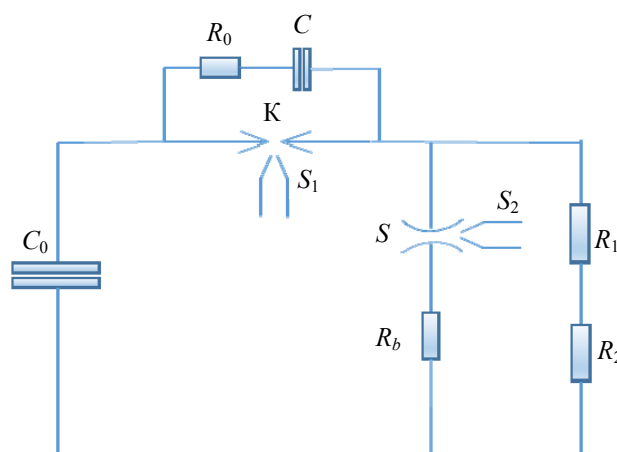


Рис. 1. Принципиальная схема установки. C_0 – разрядная емкость, R_b – балластное сопротивление, K – коммутатор, S_1 – источник предыонизации газовой среды коммутатора, S – основной разрядный промежуток, S_2 – источник предыонизации основного разрядного промежутка ($R_0 = 300$ Ом, $R_1 = 21,3$ кОм, $R_2 = 50$ Ом, $C = 4$ нФ, $C_0 = 15$ нФ)

Результаты исследования характеристик аperiodического разряда

На рисунке 2 представлены осциллограммы тока разряда при аperiodическом режиме протекания тока для двух значений прикладываемого напряжения. В аperiodическом режиме форма импульса тока изменяется в зависимости от приложенного напряжения, что указывает на сложную динамику процессов в разрядном промежутке. При малых значениях напряжения U_0 форма импульса тока носит колоколообразный характер, а при высоких значениях прикладываемого поля наблюдаются колебания.

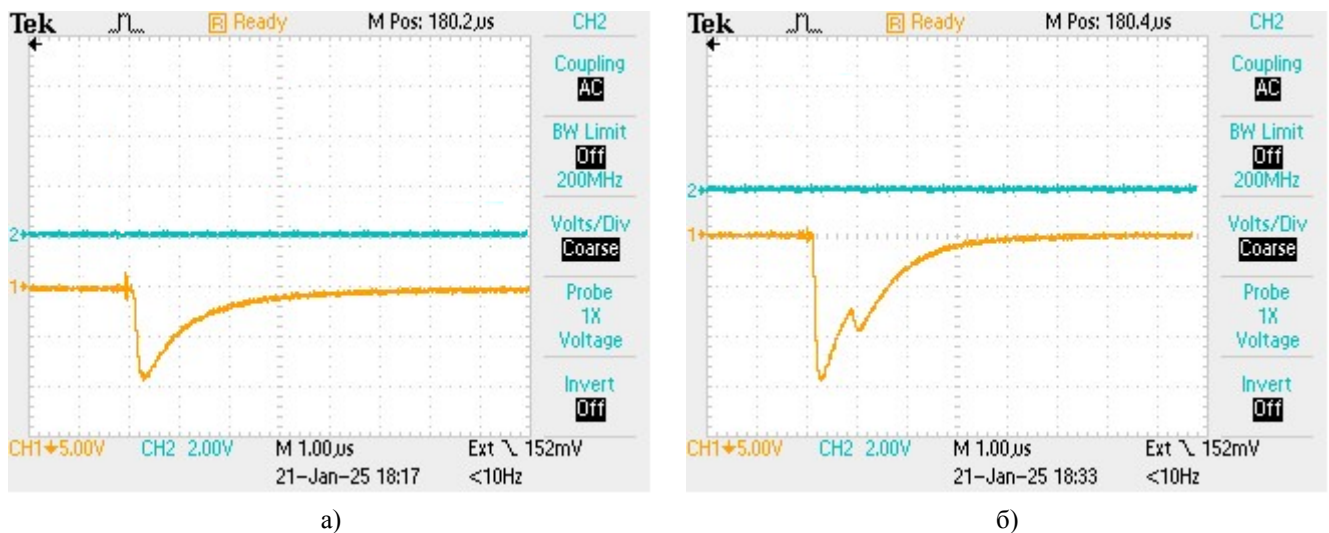


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока разряда в аperiodическом режиме протекания тока при давлении $p = 3 \text{ атм}$ и $R_b = 2 \text{ }\Omega$: а) – $U_0 = 8 \text{ кВ}$, б) – $U_0 = 11 \text{ кВ}$

С увеличением давления газа наблюдается уменьшение амплитуды тока (см. рис. 3б) при одновременном увеличении длительности протекания разрядного тока. В случаях, когда на фоне объемного разряда формируется искровой канал, на осциллограмме тока появляются два характерных максимума (рис. 2б). Первый из них соответствует формированию

объемного разряда, а второй – переходу в искровой канал.

С увеличением амплитуды напряжения от 3 до 14 кВ наблюдается линейный рост амплитудного значения тока от десятков до сотен ампер (рис. 3а, б), причем, амплитудное значение тока повышается с уменьшением балластного сопротивления.

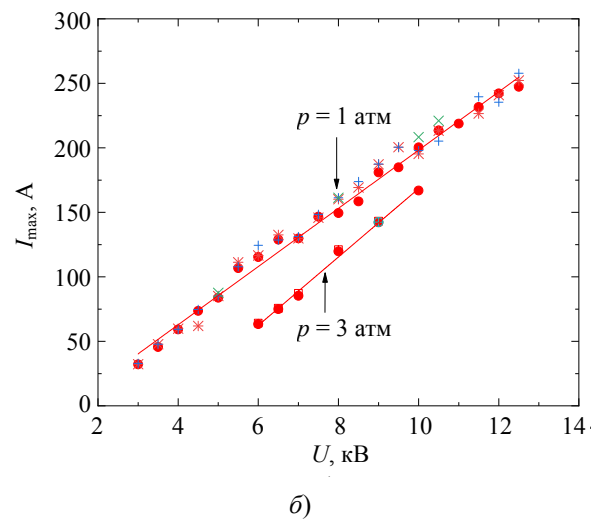
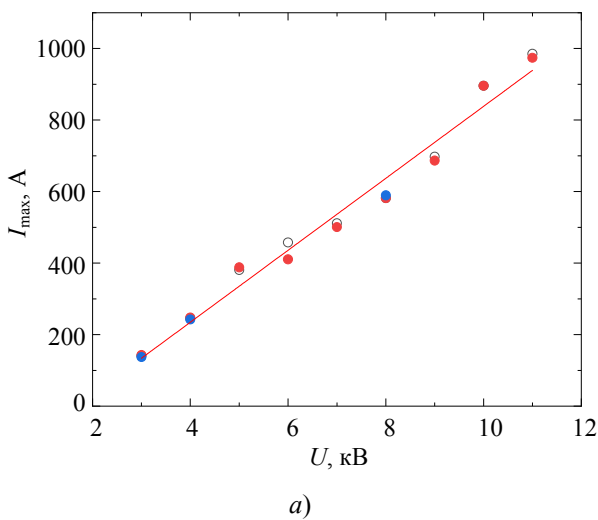


Рис. 3. Амплитудные значения тока разряда в аperiodическом режиме при разных условиях эксперимента: а) $R_b = 2 \text{ }\Omega$, $p = 1 \text{ атм}$, б) $R_b = 52 \text{ }\Omega$, $p = 1 \text{ атм}$ и 3 атм .

На рисунке 4 представлены интегральные картины свечения разряда в аperiodическом режиме при $R_b = 2 \text{ }\Omega$. Нижний электрод – сетчатый (катод), верхний – сплошной (анод). Как видно, при напряжении 3 кВ в условиях предварительной ионизации газа формируется объемный разряд, представляю-

щий собой совокупность диффузных каналов, привязанных к катоду. При увеличении давления газа и более высоких напряжениях возможно появление диффузных каналов – локализации тока в виде ярких узких каналов, преимущественно вблизи сетчатого катода. Начиная с 7 кВ при атмосферном давлении на

аноде появляются яркие светящиеся пятна. При увеличении напряжения $U_0 \geq 8$ кВ наблюдается развитие искровых каналов, как с катода, так и с анода; каналы могут перекрываться друг с другом, а количество анодных пятен возрастает. Характерный диаметр каналов, оценённый по свечению, составляет около 0,6–0,7 мм.

При повышении давления до 2 атмосфер наблюдается значительное количество токо-

вых каналов, преимущественно сосредоточенных в центральной части разрядного промежутка. При высоких напряжениях формируется один ярко выраженный искровой канал с диаметром около 2 мм на фоне множества диффузных каналов. При давлении 2 атм диаметр искрового канала оказывается меньше, чем при атмосферном. Видимо, этот эффект связан с усилением самосжатия в условиях повышенной плотности газа.

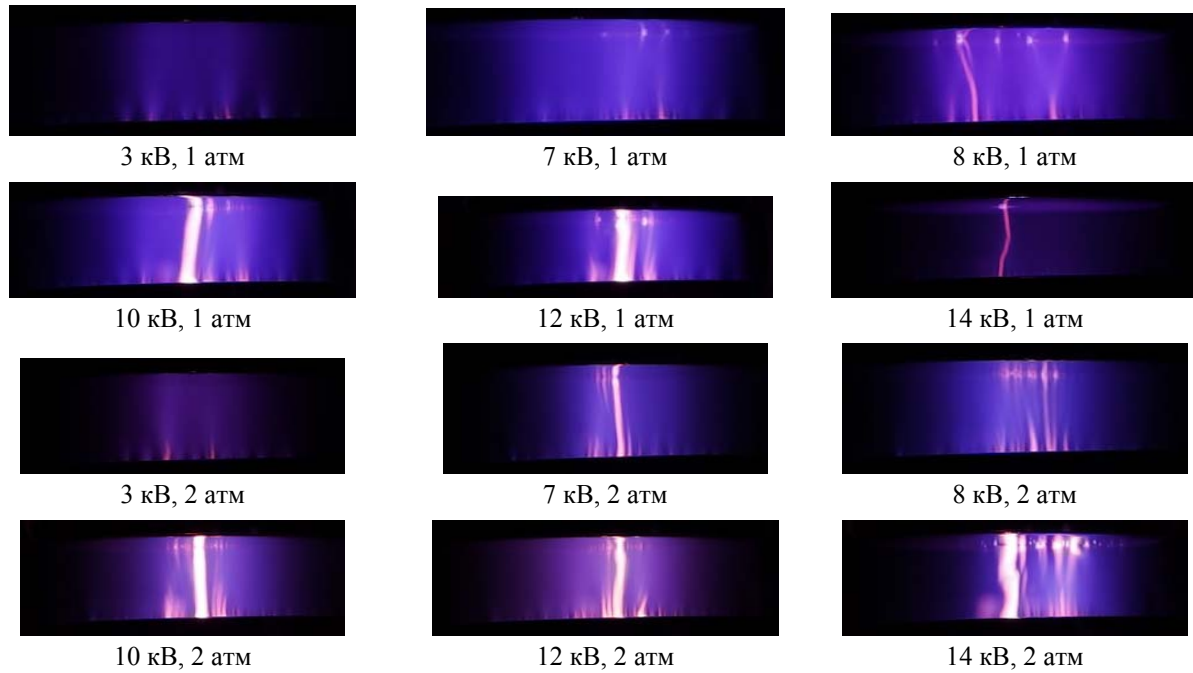


Рис. 4. Интегральные картины свечения разряда (апериодический режим), $R_b = 2$ Ом

Как было сказано выше, при увеличении прикладываемого напряжения, на осциллограмме тока наблюдаются небольшие колебания (рис. 5).

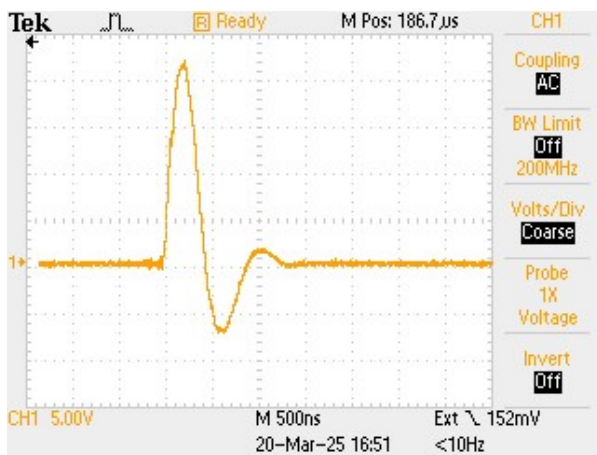


Рис. 5. Характерные осциллограммы тока разряда: $p = 1$ атм, $U_0 = 8$ кВ, $R_b = 2$ Ом

Наличие колебательного режима дает возможность для разрядного промежутка использовать замкнутый контур RLC -цепи с сопротивлением R_d , индуктивностью L_d и емкостью C_d , колебания тока I которого описываются выражением: $I(t) = I_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t)$, где t – время, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T}$, T – период колебаний, $I(t=0) = I_0$ – амплитуда тока, $\delta = \frac{R_d}{2L_d}$,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}}$. Условие наличия колебательного режима определяется неравенством: $L_d > \frac{R_d^2 C_d}{4}$.

Если колебания начинаются после достижения определённого расстояния в коммутаторе, то можно предположить, что эф-

эффективное значение индуктивности L_d рассматриваемой цепи растет с увеличением межэлектродного зазора в коммутаторе. Это качественно согласуется с тем, что наблюдается в эксперименте. При прочих равных условиях (значения R_b и U_0) аperiodический режим сменяется на колебательный при увеличении межэлектродного зазора коммутатора.

Следует отметить, что коэффициент затухания δ определяется отношением амплитуд тока с интервалом в период, т. е.

$$\delta = \frac{\ln(I_0 / I(T))}{T}. \text{ Из эксперимента следует,}$$

$$\text{что } \delta \approx \frac{\ln(11)}{T}, \text{ соответственно, из определе-}$$

$$\text{ния } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \frac{2\pi}{T} \text{ получим } \omega \approx \omega_0.$$

В соответствии с ранее выполненными расчетами [11] концентрация электронов в разрядном промежутке в диффузном режиме при атмосферном давлении находится на уровне $n_0 \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$, что дает для сопротивления разрядного промежутка $R_d \approx (\pi r_0^2 e n_e \mu_e)^{-1} d \approx 5 \text{ Ом}$, где e – заряд электрона, n_e , μ_e – концентрация и подвижность, $\mu_e \approx 0,1 \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$ при нормальной плотности газа [14, 15].

В качестве эффективного значения емкости примем величину емкости разрядного конденсатора $C_d = C_0 = 1,5 \times 10^{-8} \text{ Ф}$. Данное предположение оправдано тем, что емкость разрядного промежутка $C_g \sim \epsilon_0 \pi r_0^2 / d \sim 1 \text{ пФ}$, так и самой плазмы $C_p \sim 2\pi \epsilon_0 d \sim 0,6 \text{ пФ}$ намного меньше величины C_0 . Тогда в соответствии с определением δ найдем индуктивность: $L_d = \frac{R_d T}{2 \ln(11)} \approx 0,84 \text{ мкГн}$. Из графика 2б

видим, что период колебаний составляет 0,8 мкс, тогда для индуктивности получаем

$$L_d = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 / C_d \approx 1,1 \text{ мкГн}. \text{ При этом величина}$$

L_d эквивалентной схемы получилась достаточно большой, что, видимо, обусловлено паразитной индуктивностью установки. Индуктивность плазмы достаточно мала:

$$L_p \sim \frac{\mu_0 d}{2\pi} = 2 \text{ нГн} (\mu_0 - \text{магнитная постоянная})$$

по сравнению с L_d . В то же время соедини-

тельный провод длиной $l = 1 \text{ м}$ и радиусом $r = 1 \text{ мм}$ обладает индуктивностью

$$L_w \sim \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{l}{r}\right) \approx 1,4 \text{ мкГн}, \text{ которая сопоста-}$$

вима с оценками L_d .

Таким образом, хотя наличие паразитной индуктивности и приводит к появлению колебаний тока, но, с другой стороны, дает возможность получить диффузный разряд в гелии при атмосферном давлении и выше на временах более 1 мкс, что может быть использовано в газоразрядных приложениях.

Заключение

Таким образом, в условиях предварительной ионизации газа в диапазоне 3–14 кВ и балластном сопротивлении $2 \text{ }\Omega$ в гелии атмосферного давления обнаружены два режима горения разряда, а именно колебательный и аperiodический. Также обнаружено, что межэлектродное расстояние в коммутаторе определяет переход от аperiodического к колебательному режиму горения разряда. Для аperiodического режима протекания тока характерна практически линейная зависимость амплитудного значения тока разряда I_{max} от приложенного напряжения с характерными значениями тока от десятков до $\sim 1000 \text{ А}$. При увеличении давления газа с 1 до 3 атм амплитудное значение тока уменьшается. Оптическая диагностика показывает, что при 3 кВ формируется объёмный диффузный разряд, а начиная с 7–8 кВ возникают локальные токовые нити диаметром 0,6–0,7 мм, число которых растёт с напряжением. Но уже при 14 кВ наблюдается единичный яркий искровой канал.

На основании данного экспериментального факта и анализа условий существования колебаний тока разряда выдвинуто предположение, что межэлектродное расстояние в коммутаторе определяет значение индуктивности в эквивалентной RLC-схеме. На основании осциллограмм тока найдено эффективное значение индуктивности рассматриваемой установки.

Установленные закономерности позволяют целенаправленно выбирать параметры схемы (емкость, балластное сопротивление, длина соединительных шин) для подавления

колебаний в режиме однократного импульса тока – что критически важно для накачки ВУФ/УФ-лазеров и других плазменных приложений, требующих высоких пиковых энергий без последующего затухания.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 25-22-20090).*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В. В. / Успехи физических наук. 2000. Т. 170. С. 225–245.
2. Месяц Г. А. / Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 6. С. 601–626.
3. Тарасенко В. Ф., Панченко А. Н., Белоплотов Д. В. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 535–544.
4. Lu Y., Li W., Zhang J. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. № 4. P. 44005. doi: 10.1088/0963-0252/24/4/044005
5. Motallebi S., Sadighzadeh A., Safari S. A. et al. / J. Appl. Phys. 2023. Vol. 134. P. 203303. doi: 10.1063/5.0164607
6. Feng Y., Li H., Fang K. et al. / Chin. Phys. B. 2023. Vol. 32. № 4. P. 045206. doi: 10.1088/1674-1056/adc670
7. Gao M., Zhu Y., Shi J. et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. P. 255201. doi: 10.1088/1361-6463/adcace
8. Li H., Wang Y., Chen M. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2024. Vol. 33. P. 015001. doi: 10.1088/1361-6595/ad8308
9. Xie H., Yu H., Li Y. et al. / Plasma Res. Express. 2024. Vol. 6. P. 015009. doi: 10.1088/2058-6272/ad5ca0
10. Lu Y., Zhang J., Li W. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 015012. doi: 10.1088/1361-6595/ab6da6
11. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А. / Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33. № 3. С. 346–350.
12. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б. и др. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234.
13. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Ашурбеков Н. А., Рагимханов Г. Б., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2004. № 3. С. 41–46.
14. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K., Ramazanov T. S. / Plasma Phys. Rep. 2024. Vol. 50. № 8. P. 1029.
15. Майоров С. А., Голятина Р. И. / Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 43. № 3. С. 326–332.

PACS: 52.80. Mg

Features of pulsed discharge formation in pre-ionized helium

V. S. Kurbanismailov¹, G. B. Ragimkhanov^{1,*}, D. V. Tereshonok², Z. R. Khalikova¹,
S. A. Maiorov² and Kh. M. Abakarova¹

¹ Dagestan State University, Republic of Dagestan, Makhachkala, 367025 Russia

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia
E-mail: gb-r@mail.ru

Received 27.08.2025; revised 22.09.2025; accepted 11.12.2025

The results of an experimental study of pulsed gas discharge in helium at atmospheric pressure with ultraviolet pre-ionization of the gas in a "mesh cathode – flat anode" system are presented. The voltage on the discharge capacitor was varied in the range of 3–14 kV. It was found that the peak current value increases monotonically from several tens to ~1000 A with increasing applied voltage, demonstrating an almost linear dependence of the peak current value (I_{max}) on the applied voltage.

Keywords: pulsed gas discharge; helium; pre-ionization; aperiodic regime.

REFERENCES

1. Osipov V. V., Usp. Fiz. Nauk **170**, 225–245 (2000).
2. Mesyats G. A., Usp. Fiz. Nauk **165**, 6, 601–626 (1995).
3. Tarasenko V. F., Panchenko A. N. and Beloplotov D. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (6), 535–544 (2019) [in Russian].
4. Lu Y., Li W., Zhang J. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **24** (4), 044005 (2015). doi: 10.1088/0963-0252/24/4/044005
5. Motallebi S., Sadighzadeh A., Safari S. A. et al., J. Appl. Phys. **134**, 203303 (2023). doi: 10.1063/5.0164607
6. Feng Y., Li H., Fang K. et al., Chin. Phys. B **32** (4), 045206 (2023). doi: 10.1088/1674-1056/adc670
7. Gao M., Zhu Y., Shi J. et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **56**, 255201 (2023). doi: 10.1088/1361-6463/adcace
8. Li H., Wang Y., Chen M. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **33**, 015001 (2024). doi: 10.1088/1361-6595/ad8308
9. Xie H., Yu H., Li Y. et al., Plasma Res. Express **6**, 015009 (2024). doi: 10.1088/2058-6272/ad5ca0
10. Lu Y., Zhang J., Li W. et al., Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 015012 (2020). doi: 10.1088/1361-6595/ab6da6
11. Kurbanysmailov V. S. and Omarov O. A., High Temperature. **33** (3), 346–350 (1995).
12. Kurbanysmailov V. S., Omarov O. A., Ragimkhanov G. B. et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **2** (3), 234 (2014) [in Russian].
13. Kurbanysmailov V. S., Omarov O. A., Ashurbekov N. A., Ragimkhanov G. B. and Gadzhiev M. Kh., Applied Physics, № 3, 41–46 (2004) [in Russian].
14. Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K. and Ramazanov T. S., Plasma Phys. Rep. **50** (8), 1029–1041 (2024).
15. Maiorov S. A. and Golyatina R. I., High Temperature **43** (3), 326–332 (2025).

Об авторах

Курбанисмаилов Вали Сулейманович, профессор, д.ф.-м.н., Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: vali_60@mail.ru SPIN-код: 3774-5509, AuthorID: 124135

Ражимханов Гаджимирза Балагланович, к.ф.-м.н., доцент, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: gb-r@mail.ru SPIN-код: 8156-8736, AuthorID: 417790

Терешонок Дмитрий Викторович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). SPIN-код: 3790-9092, AuthorID: 601492

Абакарова Халимат Магомеловна, заведующая кабинетом, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). E-mail: abakarova2412@mail.ru

Майоров Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: mayorov_sa@mail.ru SPIN-код: 9331-1751, AuthorID: 24761

Халикова Заира Расуловна, Дагестанский государственный университет (367025, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а). SPIN-код: 3112-0424, AuthorID: 1031654

УДК 537.52
EDN: QXQWSV

PACS: 52.80.Wq

Направленный электрический разряд в воде по каналу с ионами соли NaCl

© 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 23.05.2025; после доработки 30.06.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.9*

Продemonстрирована возможность направления распространения канала электрического разряда в воде с помощью создания локальных зон повышенной проводимости, которые возникают в следе от движущегося в воде кристалла поваренной соли. Направленный разряд был получен в воде с электропроводностью 350 мкСм/см под действием импульсного напряжения миллисекундной длительности амплитудой 7 кВ в межэлектродном промежутке 8 мм. Эффект заключается в изменении разрядным каналом своего направления распространения при встрече со следом тонущего кристалла, т. е. нормальное горизонтальное (относительно направления силы тяжести) распространение от анода к катоду сменяется направленным вертикальным распространением по следу с повышенной из-за постепенного растворения кристалла проводимостью.

Ключевые слова: направленный разряд, пробой, вода, электролит, поваренная соль, NaCl, кристалл.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-38-43

Введение

Направленный электрический разряд возникает в тех случаях, когда среда, по которой он распространяется, обладает пространственной неоднородностью электрической прочности, связанной с локальным присутствием дополнительных носителей заряда. Подобные неоднородности могут существовать в среде стационарно, либо создаются на некоторое время непосредственно перед распространением канала электрического разряда.

Примером такой стационарной неоднородности электропроводности может служить стратификация состава почвы в вертикальном направлении, которая определяет режим и эффективность работы систем заземления [1], амплитуды электрического и магнитного полей, создаваемых разрядом молнии [2], а так-

же переходные характеристики по напряжению [3] и току [4].

В газах возможно либо квазистационарное, либо кратковременное создание неоднородностей (плотности, проводимости) из-за сильной, по сравнению с твердыми веществами, диффузии. Примером таких неоднородностей могут выступать ударные волны и волны разрежения, изменение плотности в которых выступает в роли своеобразного «газодинамического диода» для стримеров [5]. Для некоторых типов разряда удается получить постоянное во времени пространственное распределение плотности с помощью полей звукового давления [6], приводящее к возможности стационарного управления положением и формой разрядного канала. Однако авторы работы [6] отмечают, что для других типов разряда повлиять на ход канала не уда-

ется из-за преваляирования действия, вызванного перепадом температуры (плотности), над звуковым давлением. Примером кратковременного воздействия является лазерный импульсный прогрев газа в межэлектродном промежутке на пути распространения луча, по которому затем распространяется электрический разряд [7]. Направляющее действие в данном случае связано с понижением плотности и увеличением длины свободного пробега в газе после прогрева лазером. Если же плотность энергии превышает определенное значение, то возможен оптический пробой в виде отдельных очагов возникновения плазмы вдоль пути излучения [8]. На основе этих явлений разрабатываются активные системы молниезащиты [9].

Направленный электрический разряд в воде играет важную роль в электрогидравлической технологии обработки различных материалов посредством импульсного воздействия высоким давлением и электрохимическими эффектами [10]. Его суть состоит в преобразовании электрической энергии в механическую посредством быстрого энерговыделения в тонком разрядном канале с последующим движением жидкости и формированием ударных волн. Эффективность такого преобразования зависит от многих параметров — амплитуда импульса тока, расстояние между электродами, длительность и крутизна фронтов импульса, величина ударной емкости и др., однако на первом месте по значимости стоит необходимость получения длинных (и сверхдлинных) разрядных каналов, что представляет определенную трудность из-за наличия у воды ионной проводимости. Для решения этой задачи автором [10] был предложен метод электрического (теплого) взрыва проводника, обычно проволоки, который предварительно соединялся с электродами и задавал направление будущему разрядному каналу при пропускании через него тока большой плотности. Этим же автором был предложен альтернативный способ направленного радиационного (в том числе лазерного) воздействия, при котором ток распространяется по каналу с более низкой плотностью, возникшему при распространении в жидкости излучения.

В качестве нового способа создания в воде области предпочтительного развития разрядного канала в виде локальной зоны повышенной проводимости рассматривается движение кристалла соли в межэлектродном промежутке. Суть способа состоит в постепенном растворении кристалла по мере его движения и в формировании позади него следа с локальной повышенной концентрацией ионов соли (т. е. с повышенной электропроводностью). Такой подход, с одной стороны, не требует механической переустановки проволоки, как в случае с её электрическим взрывом, а с другой — не требует применения дополнительного оборудования, как в случае с пробоем, направляемым лазерным излучением. Использование соли также исключает возможность загрязнения электродов, которое происходит в случае приваривания частей взрываемого металлического проводника. Дополнительным преимуществом также является относительно большое время жизни следа по сравнению с длительностью разряда, что упрощает синхронизацию процессов введения кристалла в разрядный промежуток и подачи импульса напряжения.

Целью настоящей работы является получение направленного разряда в проводящей воде при воздействии импульсного напряжения миллисекундной длительности с использованием кристаллов поваренной соли.

Экспериментальная установка и методы

В работе использована установка, описанная в [11] и модифицированная сообразно цели работы. В прозрачную емкость из оргстекла (1 на рис. 1) наливалась дистиллированная вода, ниже ее уровня размещались электроды — высоковольтный заостренный электрод (2) и цилиндрический электрод (3) из вольфрамового стержня, расположенные на расстоянии 8 мм друг от друга. Боковая поверхность электродов изолирована от воды за исключением рабочих торцов. Уровень воды в емкости такой, что он полностью покрывает электроды, но при этом расстояние от поверхности воды до поверхности высоковольтного электрода составляет величину около 1 см. Относительно небольшая величина этого рас-

стояния позволяет кристаллам поваренной соли достигать межэлектродного промежутка с постоянной скоростью, поскольку диаметр в ходе растворения практически не меняется. Это обеспечивает, как видно по результатам визуализации, формирование следа практически постоянного диаметра. Падая в воде, кристалл оставляет тонкий след в виде протяженной области повышенной проводимости за счет частичного растворения соли, показанной на рисунке 1 пунктирной линией вблизи электрода 2.

Для визуализации процесса образования следа повышенной проводимости используется оптическая схема, основанная на теневом методе визуализации, чувствительная к локальным изменениям плотности жидкости за счет частичного растворения кристалла. Люминесцентный светодиод 4 и собирающая линза 5 создают параллельный пучок света, освещающий область вблизи высоковольтного электрода. Скоростная цифровая видеокамера 6, снабженная длиннофокусным объективом 7, непрерывно регистрирует теневую картину вблизи острия электрода 2 с пространственным разрешением 95 мкм/пиксель. Видеокамера выполняет запись процесса в память и при её запуске отправляет синхроимпульс на запускающие входы генератора импульсов 8 («TRIG») и осциллографа («Ext/10»). После этого генератор 8 формирует запускающий импульс для высоковольтного ключа 10 длительностью порядка 1 мс. Ключ 10 без задержки (фронт нарастания $\sim 0,1$ мкс) коммутирует высокое напряжение с батареи С, заряжаемой через балластный резистор R_b (1 МОм) высоковольтным источником 11 до напряжения 7 кВ, через ограничивающий резистор R_1 (5 кОм) на высоковольтный электрод.

Для сопоставления номера кадра кинограммы с моментом подачи высокого напряжения на канал 1 осциллографа 9 подается сигнал F_SYNC видеокамеры, соответствующий моментам начала экспозиции каждого кадра, а на канал 2 – сигнал генератора 8. Кроме того, на канал 3 осциллографа подается сигнал высоковольтного делителя 12 1:1000, подключенного к высоковольтному электроду 2, а на канал 4 – напряжение с токового шунта R_s для измерения тока цепи.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены фотографии разрядного промежутка в различные моменты времени после подачи напряжения с емкости С, заряженной до 12 кВ. Напряжение зарядки выбрано таким образом, чтобы при разряде в отсутствие солевых следов не наступало замыкание промежутка плазменным каналом. Состояние промежутка в момент подачи напряжения дано на кадре #0. Вблизи острия анода видны траектории группы движущихся кристаллов в виде светлых нитей с темными краями, а также два кристалла ближе к катоду в виде темных точек с диаметром около 0,4 мм, которые практически не меняют своего положения в пространстве за время действия импульса 1 мс. Развитие разряда начинается на острие анода, где в течение первых 80 мкс происходит прогрев воды и появляется парогазовая область, вытягивающаяся в сторону катода (90 мкс, #2). Как только она достигает ближайшего следа, плазма разрядного канала начинает светиться сильнее, а ее форма становится Т-образной. Начиная с этого момента, канал меняет направление своего развития и движется вертикально по траектории кристалла одновременно вверх и вниз. Симметричность продвижения канала говорит о близких параметрах среды, в том числе электропроводности в следе, как по направлению движения кристалла, так и против. Скорость роста канала, рассчитанная между кадрами #3 и #4, составила не менее 7 м/с, что характерно для теплового механизма пробоя в проводящей воде [12]. Дальнейшее развитие парогазовой области, в которой находится канал (#5–#7), происходит за счет увеличения ее диаметра при незначительном ее удлинении. Ее структура сохраняет свою симметрию относительно горизонтальной плоскости, проходящей через ось электродов. При этом прослеживается развитие начальной парогазовой области, форма которой близка к сферической. Характерной особенностью структуры является коническая форма вершин канала с углом около 60° . На более поздних стадиях развития пробоя происходит инициация второй плазменной области – с катода, которая связана только с тепловыми процессами вблизи поверхности без дополнительного участия

кристаллов соли. К моменту окончания действия импульса напряжения парогазовая область и канал разряда у анода теряют свою первоначальную структуру и существуют в форме единой области.

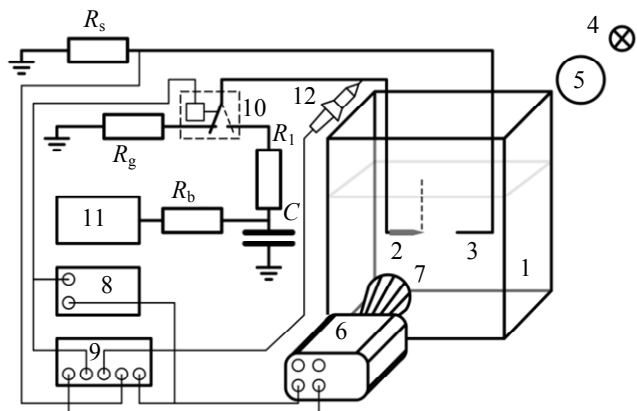


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

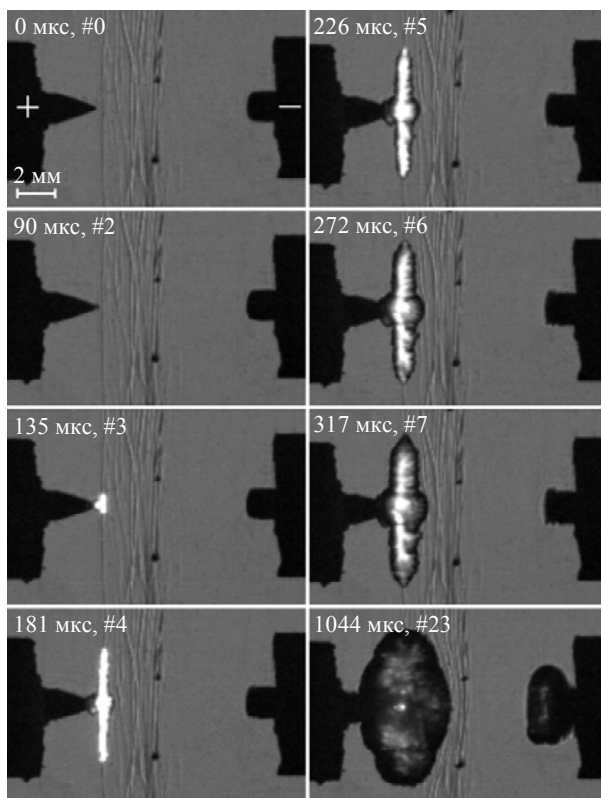


Рис. 2. Фотографии разрядного промежутка при развитии электрического разряда в воде, направляемого следом от тонущего кристалла поваренной соли. Время экспозиции 0,9 мкс

Осциллограммы напряжения, тока, сопротивления и выделяемой мощности имеют характерные участки, отражающие наблюдаемые на фотографиях явления. На участке от 0 мкс до точки А (рис. 3), 80 мкс, происходит прогрев воды вблизи острия анода и образо-

вание парогазовой области. В точке А начинается плазмообразование внутри образовавшейся парогазовой области. Оно сопровождается ростом тока за счет увеличения проводимости в данной области и общей площади контакта с окружающей жидкостью. Основной рост тока и снижение общего сопротивления промежутка происходит на стадии распространения канала по траектории кристалла: дополнительный спад сопротивления на 20 % от начального значения происходит между 90 и 135 мкс. После зажигания разряда в точке А, мощность, необходимая для его поддержания, снижается, а общее сопротивление промежутка продолжает снижаться. Однако эта тенденция сменяется обратным ростом сопротивления по мере приближения к точке Б (840 мкс). Наиболее вероятно, это связано с ростом парогазового пузыря у катода, который, до момента возникновения плазмы, уменьшает эффективную площадь контакта катода с водой и затрудняет протекание тока. После возникновения пробоя внутри этого пузыря сопротивление промежутка резко падает за несколько микросекунд и продолжает снижаться вплоть до конца действия напряжения. За время действия импульса рост выделившейся энергии был практически линейным. Суммарная энергия составила около 5 Дж.

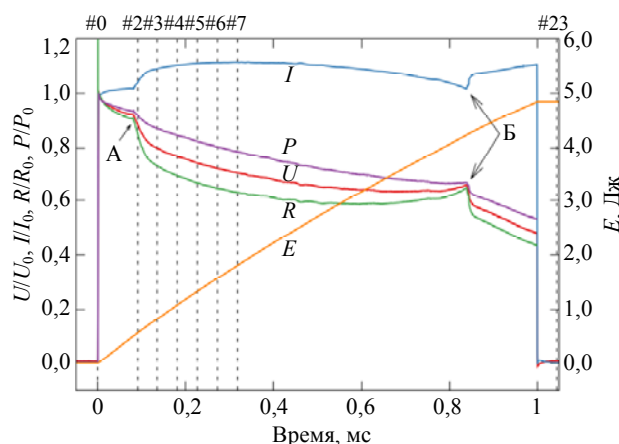


Рис. 3. Осциллограммы нормированных на начальные значения ($t=0$) напряжения (U), тока (I), сопротивления (R), мощности (P) и абсолютного значения выделившейся энергии (E) на разрядном промежутке при распространении направленного разряда в воде. $[U_0, I_0, R_0, P_0] = [5,1 \text{ кВ}, 1,3 \text{ А}, 3,9 \text{ кОм}, 6,6 \text{ кВт}]$. Пунктирными линиями обозначены моменты экспозиции кадров с соответствующими номерами, указанными над линиями. Точка А (80 мкс) – начало плазмообразования у острия анода, Б (840 мкс) – начало плазмообразования у катода

Выводы

Впервые продемонстрирована возможность управления направлением распространения канала электрического разряда в воде с помощью создания локальных зон повышенной проводимости, которые возникают в следе от движущегося в воде кристалла поваренной соли. Направленный разряд был получен в воде с электропроводностью 350 мкСм/см под действием импульсного напряжения миллисекундной длительности амплитудой 7 кВ в межэлектродном промежутке длиной 8 мм. Эффект выражается в том, что разрядный канал изменяет направление своего распространения при встрече со следом тонущего кристалла, т. е. нормальное горизонтальное распространение от анода к катоду сменяется направленным вертикальным распространением по траектории с повышенной проводимостью в результате постепенного растворения кристалла. Развитие разряда при этом происходит по тепловому механизму, свойственному проводящей воде при относительно невысоких напряжениях и высоких длительностях импульса. Анализ осциллограмм тока и напряжения говорит о значительном уменьшении сопротивления между электродами в момент времени, когда канал разряда начинает прорасти в следе. Мощность, выделяемая в разрядном промежутке, падение напряжения на нем также уменьшаются в этот момент, а ток разряда наоборот – увеличивается. При этом зависимость величины энергии, выделяемой в воде, от времени имеет линейный характер роста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. № 28. P. 285201.
2. Delfino F., Procopio R., Rossi M., Shoory A., Rachidi F. / 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Fort Lauderdale, FL, USA, 2010. P. 45–50.
3. Anderson R. J. de Araújo, L. M. de Azevedo W., Pissolato Filho J., S. L. Colqui J., Kurokawa S. / Anais do Congresso Brasileiro de Automática. – Brasil, 2020. 10.48011/asba.v2i1.1182
4. de Azevedo W. L. M., da Silva W. C., D'Annibale J. L. A., de Araújo A. R. J., Colqui J. S. L., Filho J. P. / Proceedings do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. – Brasil, 2023. 10.20906/sbai-sbse-2023/3980
5. Starikovskiy A. Y., Aleksandrov N. L. / Plasma Sources Science and Technology. 2019. Vol. 28. № 9. P. 095022.
6. Irisarri J., Ezcurdia I., Iriarte N., Sirkka M., Nikolaev D., Mäkinen J., Martinez-Marchese A., Iablonskiy D., Salmi A., Marzo A. / Science Advances. 2025. Vol. 11. № 6.
7. Aihara Y., Shindo T., Miki M., Suzuki T. / Electrical Engineering in Japan. 1993. Vol. 113. № 4. P. 66–77.
8. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., Filyugin I. / Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1994. Vol. 164. № 3. P. 263.
9. Ball L. M. / Applied Optics. 1974. Vol. 13. № 10. P. 2292.
10. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.
11. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Савельев А. С., Куликов Ю. М., Филаткин А. А. / Прикладная физика. 2022. № 6. С. 29–34.
12. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Y., Son E. E. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49. № 38. P. 385202.

PACS: 52.80.Wq

Guided discharge in water with the aid of NaCl crystals

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 23.05.2025; revised 30.06.2025; accepted 11.12.2025

For the first time, the possibility of controlling the direction of propagation of an electric discharge channel in water by creating local zones of increased conductivity that arise in the "trace" of a table salt crystal moving in water has been demonstrated. A directed discharge

was obtained in water with an electrical conductivity of 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ under the action of a millisecond-duration pulse voltage with an amplitude of 7 kV in an 8 mm interelectrode gap. The effect consists in the discharge channel changing its direction of propagation when it encounters the "trace" of a sinking crystal, i.e. normal horizontal (relative to the direction of gravity) propagation from the anode to the cathode is replaced by directed vertical propagation along the "trace" with increased conductivity due to the gradual dissolution of the crystal.

Keywords: guided discharge; breakdown; water; electrolyte; salt; NaCl; crystal.

REFERENCES

1. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N. and Ivonin V. V., *Journal of Physics D: Applied Physics* **48** (28), 285201 (2015).
2. Delfino F., Procopio R., Rossi M., Shoory A. and Rachidi F. *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Fort Lauderdale, FL, USA, 2010, pp. 45–50.
3. Anderson R. J. de Araújo, L. M. de Azevedo W., Pissolato Filho J., S. L. Colqui J. and Kurokawa S. *Proc. Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. Brasil, 2020. 10.48011/asba.v2i1.1182.
4. de Azevedo W. L. M., da Silva W. C., D'Annibale J. L. A., de Araújo A. R. J., Colqui J. S. L. and Filho J. P., *Proceedings do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente / X Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Brasil, 2023. 10.20906/sbai-sbse-2023/3980.
5. Starikovskiy A. Y. and Aleksandrov N. L., *Plasma Sources Science and Technology* **28** (9), 095022 (2019).
6. Irisarri J., Ezcurdia I., Iriarte N., Sirkka M., Nikolaev D., Mäkinen J., Martinez-Marchese A., Iablonskiy D., Salmi A. and Marzo A., *Science Advances* **11** (6), (2025).
7. Aihara Y., Shindo T., Miki M. and Suzuki T., *Electrical Engineering in Japan* **113** (4), 66–77 (1993).
8. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N. and Filyugin I., *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **164** (3), 263 (1994).
9. Ball L. M., *Applied Optics* **13** (10), 2292 (1974).
10. Yutkin L. A. *Elektrohidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti*. L.: Mashinostroeniye, 1986 [in Russian].
11. Panov V. A., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Kulikov Yu. M., Saveliev A. S. and Filatkin A. A., *Applied Physics*, № 6, 29–34 (2022) [in Russian].
12. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Y. and Son E. E., *Journal of Physics D: Applied Physics* **49** (38), 385202 (2016).

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 536.95
EDN: MGRURO

PACS: 83.10.Mj; 05.20.-y; 05.40.-a

О среднеквадратичном смещении активной броуновской частицы с инерцией вращения в гармонической ловушке

© Е. А. Лисин^{1,2,*}, И. И. Лисина^{1,2}¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: eaLisin@yandex.ru

² Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный, 141701 Россия

Статья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 25.11.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 1.3.9

Одной из нерешенных базовых задач в физике активной материи является аналитическое описание среднеквадратичного смещения активной броуновской частицы в гармонической ловушке с учетом поступательной и вращательной инерции частицы. Актуальность решения такой задачи обусловлена множеством экспериментов и рядом приложений с активными частицами, в которых инерционные эффекты могут играть существенную роль. В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной инерцией получено аналитическое выражение, описывающее эволюцию среднеквадратичного смещения частицы в гармонической ловушке.

Ключевые слова: активная материя; активные броуновские частицы; среднеквадратичное смещение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-44-49

Введение

Активная материя – особая форма «мягкого» конденсированного вещества, которая представляет собой дисперсионную среду, содержащую мелкодисперсные активные частицы. Несмотря на свою простоту и отсутствие подвижных частей, такие частицы (также называемые нано- и микромоторами) способны автономно преобразовывать доступную в окружающей среде энергию в собственное направленное движение [1–3]. Системы таких частиц представляют большой интерес для статистической механики и материаловедения, имеют множество перспективных приложений: от чисто технических до биомедицинских. Синтетические активные частицы являются идеальными строительными блоками для динамической самосборки функциональных микроструктур нового поколения, способных выполнять специфические задачи автономным и целенаправленным образом.

Коллоидное активное вещество является перспективным в контексте разработки новых материалов с «программируемым» откликом. Развиваются также приложения, связанные с биохимическим анализом, сепарацией вещества, коллективной доставке груза и утилизации энергии хаотического движения [1, 2].

Одной из нерешенных базовых задач в физике активной материи является аналитическое описание среднеквадратичного смещения, $MSD(t)$, активной броуновской частицы в гармоническом потенциале с учетом поступательной и вращательной инерции частицы. Актуальность решения такой задачи обусловлена множеством экспериментов с активными частицами, в которых инерционные эффекты могут играть существенную роль [4–9]. На сегодняшний день задача решена только для ряда частных (предельных) случаев, а именно: $MSD(t)$ безынерционной активной броуновской частицы в ловушке [10–15]; $MSD(t)$ активной частицы Орнштейна-Уленбека с по-

ступательной инерцией в ловушке [16, 17]; MSD(t) свободной полностью инерционной активной броуновской частицы (с поступательной и вращательной инерцией) [18, 19]; MSD(при $t = \infty$) полностью инерционной активной броуновской частицы в ловушке [20].

В данной работе впервые выводится точное аналитическое выражение, описывающее эволюцию среднеквадратичного смещения, MSD(t), полностью инерционной активной броуновской частицы в гармонической ловушке.

Основные уравнения

В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной инерцией, двумерное движение сферической частицы (с массой M и моментом инерции J) в гармонической ловушке (характеризующейся частотой ω_0) в проекции на произвольную ось X описывается следующими уравнениями [18–20]:

$$M\ddot{x}(t) = -\nu_t M\dot{x}(t) + F_A \cos(\phi(t)) - M\omega_0^2 x(t) + F_B^{(x)}, \quad (1)$$

$$\ddot{\phi}(t) = -\nu_r (\dot{\phi}(t) + \sqrt{2D_r} \zeta_r(t)), \quad (2)$$

где ν_t и ν_r – коэффициенты затухания поступательного и вращательного движения частицы в вязкой среде; F_A – активная (движущая) сила, направление которой определяется ориентационным углом $\phi(t)$, измеряемым от оси X ; $F_B^{(x)}$ – x -компонента броуновской силы («поступательного» шума); $D_r = T / (\nu_r J)$ – коэффициент вращательной диффузии (здесь T – температура среды, выраженная в энергетических единицах); а ζ_r – гауссовый белый шум с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

В стационарном состоянии зависящее от времени среднеквадратичное смещение частицы по оси X определяется как

$$\text{MSD}(t) \equiv \langle [x(t) - x(0)]^2 \rangle = 2\langle x^2 \rangle - 2\langle x(t)x(0) \rangle, \quad (3)$$

где $\langle x(t)x(0) \rangle$ – автокорреляционная функция положения частицы. Отметим, что $\text{MSD}(\infty) = 2\langle x^2 \rangle$. Поскольку «поступательный» и «вращательный» шумы не коррелируют, то MSD(t) можно записать как сумму двух слагаемых: первое слагаемое представляет собой хорошо известную формулу Уленбека–Орнштейна для пассивной броуновской частицы [21], а второе слагаемое является результатом вклада активной (движущей) силы. Здесь мы намеренно выключим поступательный шум (полагая $F_B = 0$), чтобы сосредоточиться на изучении вклада активной силы.

Согласно теореме Хинчина–Колмогорова автокорреляционную функцию положения частицы можно записать в виде

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} H^2(\omega) S(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $H(\omega) = (F_A / M) / (\omega_0^2 - \omega^2 + i\nu_t \omega)$ – передаточная функция, а $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности процесса $\cos(\phi(t))$. Для стационарного процесса спектральная плотность мощности записывается как преобразование Фурье автокорреляционной функции:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} \cos(\omega t) \langle \cos(\phi(t)) \cos(\phi(0)) \rangle dt, \quad (5)$$

где автокорреляционная функция имеет следующий вид [19, 20]

$$\begin{aligned} \langle \cos(\phi(t)) \cos(\phi(0)) \rangle &= \\ &= \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{D_r}{\nu_r} (\nu_r t - 1 + e^{-\nu_r t}) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение

Интегрирование уравнения (5) после разложения в ряд автокорреляционной функции (6) позволяет получить спектральную плотность мощности процесса $\cos(\phi(t))$ в стационарном состоянии:

$$S(\omega) = e^{D_r/\nu_r} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-D_r/\nu_r)^m}{m!} \frac{D_r + m\nu_r}{(D_r + m\nu_r)^2 + \omega^2}. \quad (7)$$

Подставляя передаточную функцию $H(\omega)$ и выражение (7) в уравнение (4), и применяя теорему о вычетах, мы получили следующие формулы.

При неколебательном движении частицы в ловушке ($\omega_0 / \nu_t < 1/2$),

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{8\omega_0^2} \times \left\{ e^{\frac{\nu_t t}{2}} \left[C_+ G_1 e^{\tilde{\Omega} t} + C_- G_2 e^{-\tilde{\Omega} t} \right] + e^{-D_r t} \left[C_+ F_1(t) + C_- F_2(t) \right] \right\}, \quad (8a)$$

где $V_0 = F_A / M \nu_t$ – «собственная» скорость частицы, рассчитанная на основе формального баланса активной и диссипативной сил в отсутствие поступательных и вращательных шумов; $\alpha = \nu_t / \nu_r$, $\xi = D_r / \nu_r$, $C_+ = 1 + 0,5 \nu_t / \tilde{\Omega}$, $C_- = 1 - 0,5 \nu_t / \tilde{\Omega}$, $\tilde{\Omega} = \sqrt{\nu^2 / 4 - \omega_0^2}$, $G_j = \xi^{-a_j} \gamma(a_j, \xi) + \xi^{-b_j} \gamma(b_j, \xi)$ и $F_j(t) = z^{-a_j}(t) \gamma(a_j, z(t)) - z^{-b_j}(t) \gamma(b_j, z(t))$, здесь $a_j = \xi + i \omega_j / \nu_r$, $b_j = \xi - i \omega_j / \nu_r$, $z(t) = \xi e^{-\nu_r t}$, $\omega_{1,2} = -i \nu_t / 2 \pm i \tilde{\Omega}$, а $\gamma(s, z) = \int_0^z y^{s-1} e^{-y} dy$ – нижняя неполная гамма-функция.

В колебательном режиме движения ($\omega_0 / \nu_t > 1/2$),

$$\langle x(t)x(0) \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{4\omega_0^2} \times \left\{ e^{-\frac{\nu_t t}{2}} \left[\left(\text{Re}[G_2] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im}[G_2] \right) \cos(\Omega t) + \left(\frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Re}[G_2] - \text{Im}[G_2] \right) \sin(\Omega t) \right] + e^{-D_r t} \left(\text{Re}[F_2(t)] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im}[F_2(t)] \right) \right\}, \quad (8б)$$

где $\text{Re}[\dots]$ и $\text{Im}[\dots]$ являются действительной и мнимой частями комплексных функций, а $\Omega = i \tilde{\Omega}$.

В стационарном состоянии при $t = 0$ функция $\langle x(t)x(0) \rangle$ описывает среднеквадра-

точное положение частицы относительно центра ловушки:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{4\omega_0^2} \left\{ C_+ \frac{\gamma(a_1, \xi)}{\xi^{a_1}} + C_- \frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right\} \quad \text{при} \quad \omega_0 / \nu_t < 1/2, \quad (9a)$$

и

$$\langle x^2 \rangle = \frac{V_0^2 \alpha e^\xi}{2\omega_0^2} \left\{ \text{Re} \left[\frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right] + \frac{\nu_t}{2\Omega} \text{Im} \left[\frac{\gamma(a_2, \xi)}{\xi^{a_2}} \right] \right\} \quad \text{при} \quad \omega_0 / \nu_t > 1/2. \quad (9б)$$

Теперь для вычисления функции эволюции среднеквадратичного смещение частицы в стационарном состоянии, $\text{MSD}(t)$, достаточно подставить (8)–(9) в (3).

Важно отметить, что уравнения (9a) и (9б) совпадают с полученными ранее в работе [20] и проверенными на результатах численного моделирования. Также легко показать, что при $\nu_r \rightarrow \infty$ уравнение (8a) сводится к известной автокорреляционной функции $\langle x(t)x(0) \rangle_{\text{АОУР}}$ для модели активной частицы Орнштейна-Уленбека, которая часто используется для приближенного описания динамики активной броуновской частицы с учетом только лишь поступательной инерции [16, 17]. При $\omega_0 = 0$ выражение для $\text{MSD}(t)$ можно привести к формуле, полученной в работе [19] для свободной полностью инерционной активной броуновской частицы. Перечисленные факты подтверждают корректность полученных в данной работе формул.

При достаточно большой частоте ловушки ($\omega_0 \rightarrow \infty$) на временах $t \gg \omega_0^{-1}$ выражение для $\text{MSD}(t)$ частицы, описываемое формулами (3), (8б) и (9б), значительно упрощается и может быть представлено в элементарных функциях:

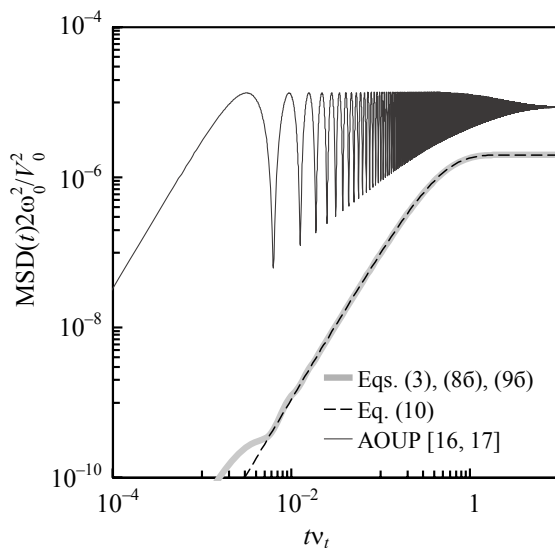
$$\text{MSD}(t) \approx \text{MSD}(\infty) \times \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{D_r}{\nu_r} (\nu_r t - 1 + e^{-\nu_r t}) \right] \right\}, \quad (10)$$

где

$$\text{MSD}(\infty) = \frac{(V_0 \nu_t)^2}{\omega_0^4}. \quad (11)$$

Интересной особенностью является отсутствие осцилляций в формуле (10), которые характерны для эволюции среднеквадратичного смещения как пассивной частицы [21], так и активной частицы Орнштейна-Уленбека [16]. На рисунке представлено нормированное $MSD(t)$ активной броуновской частицы шаровидной формы при $D_r/v_r=1$ и $\omega_0/v_t=1000$. Для сравнения на рисунок добавлено $MSD(t)$ активной частицы Орнштейна-Уленбека (АОУП) при $\omega_0/v_t=1000$ и без учета вращательной инерции частицы.

Легко заметить, что в пределе сильной ловушки $MSD(\infty)$ полностью инерционной активной частицы не зависит от v_r , а значит, и от вращательной инерции частицы. Кроме этого, $MSD(\infty)$ совпадает со среднеквадратичным смещением активной частицы Орнштейна-Уленбека [16] при $tv_t \gg 1$ и $D_r/v_t \ll 1$. Последнее выполняется, например, для частицы радиусом ~ 1 мкм, находящейся в газе при давлении ~ 1000 Па и более.



Нормированное среднеквадратичное смещение активной частицы при $\omega_0/v_t=1000$ в зависимости от времени. Сплошная толстая линия – полностью инерционная модель с $D_r/v_r=1$; сплошная тонкая линия – АОУП модель без учета вращательной инерции частицы

Заключение

В рамках модели активной броуновской частицы с поступательной и вращательной

инерцией впервые получены аналитические выражения, описывающие эволюцию среднеквадратичного смещения частицы в гармонической ловушке. Результаты данной работы могут быть полезны для описания динамики светочувствительных активных микрочастиц в газоразрядной плазме [4, 5], сверхтекучем гелии [6] и вакуумной оптической ловушке [22], а также микропловцов в акустической ловушке [23], макроскопических виброботов в параболическом конфайнменте [9] и др. Макроскопические инерционные активные частицы, приводимые в движение вибрацией и движущиеся по ограниченным траекториям, могут использоваться в качестве управляемого аналога транспортных средств или пешеходов для моделирования заторов в узких местах при оптимизации транспортных систем и проектировании общественных пространств [24]. Макроскопические инерционные активные частицы могут использоваться при создании механических метаматериалов и автономных устройств, приводимых в движение вибрацией [25, 26]. Обсуждаются идеи создания микроскопических тепловых машин на основе инерционной активной материи [27, 28].

Работа выполнена за счет гранта
Российского научного фонда № 24-22-00130
(<https://rscf.ru/project/24-22-00130/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арансон И. С. / Успехи физических наук. 2013. Т. 183 (1). С. 87–102.
2. Elgeti J., Winkler R. G., Gompper G. / Rep. Prog. Phys. 2015. Vol. 78. P. 056601.
3. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G., Volpe G. / Rev. Mod. Phys. 2016. Vol. 88. P. 045006.
4. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M., Thomas H. / Phys. Rev. Res. 2020. Vol. 2. P. 033226.
5. Arkar K., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Kononov E. A., Trukhachev F. M. / Molecules. 2021. Vol. 26. P. 561.
6. Petrov O. F., Boltnev R. E., Vasiliev M. M. / Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 6085.
7. Leoni M., Paoluzzi M., Eldeen S., Estrada A., Nguyen L., Alexandrescu M., Sherb K., Ahmed W. W. / Physical Review Research. 2020. Vol. 2 (4). P. 043299.
8. Deblais A., Barois T., Guerin T., Delville P. H., Vaudaine R., Lintuvuori J. S., Boudet J. F., Baret J. C., Kellay H. / Physical review letters. 2018. Vol. 120 (18). P. 188002.

9. Dauchot O., Démercy V. / Physical review letters. 2019. Vol. 122 (6). P. 068002.
10. Jiang H. R., Yoshinaga N., Sano M. / Physical review letters. 2010. Vol. 105 (26). P. 268302.
11. ten Hagen B., van Teeffelen S., Lowen H. / J. Phys.: Condens. Matter. 2011. Vol. 23. P. 194119.
12. Szamel G. / Physical Review E. 2014. Vol. 90 (1). P. 012111.
13. Das S., Gompper G., Winkler R. G. / New Journal of Physics. 2018. Vol. 20 (1). P. 015001.
14. Chaudhuri D., Dhar A. / Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2021. Vol. 2021 (1). P. 013207.
15. Caraglio M., Franosch T. / Physical Review Letters. 2022. Vol. 129 (15). P. 158001.
16. Caprini L., Marconi U. M. B. / The Journal of Chemical Physics. 2021. Vol. 154 (2). P. 024902.
17. Nguyen G. P., Wittmann R., Löwen H. / Journal of Physics: Condensed Matter. 2021. Vol. 34 (3). P. 035101.
18. Lisin E. A., Vaulina O. S., Lisina I. I., Petrov O. F. / Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. Vol. 24 (23). P. 14150–14158.
19. Sprenger A. R., Caprini L., Löwen H., Wittmann R. / Journal of Physics: Condensed Matter. 2023. Vol. 35 (30). P. 305101.
20. Gutierrez-Martinez L. L., Sandoval M. / The Journal of Chemical Physics. 2020. Vol. 153 (4). P. 044906.
21. Uhlenbeck G. E., Ornstein L. S. / Physical review. 1930. Vol. 36 (5). P. 823.
22. Li T., Kheifets S., Medellin D., Raizen M. G. / Science. 2010. Vol. 328 (5986). P. 1673–1675.
23. Takatori S. C., De Dier R., Vermant J., Brady J. F. / Nature communications. 2016. Vol. 7 (1). P. 10694.
24. Rozenblit A., Buzakov M., Molodtsova A., Dmitriev A., Olekhno N. 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development. 2025. doi: 10.1109/MLSD65526.2025.11220665
25. Wang J., Wang G., Chen H., Liu Y., Wang P., Yuan D., Liu L. et al. / Nature communications. 2024. Vol. 15 (1). P. 8853.
26. Ning L., Zhu H., Yang J., Zhang Q., Liu P., Ni R., Zheng N. / National Science Open. 2024. Vol. 3(4). P. 20240005.
27. Kumari A., Pal P. S., Saha A., Lahiri S. / Physical Review E. 2020. Vol. 101 (3). P. 032109.
28. Hecht L., Mandal S., Löwen H., Liebchen B. / Physical Review Letters. 2022. Vol. 129 (17). P. 178001.

PACS: 83.10.Mj; 05.20.-y; 05.40.-a

On the mean square displacement of an active Brownian particle with rotational inertia in a harmonic trap

E. A. Lisin^{1,2,*} and I. I. Lisina^{1,2}

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

* E-mail: eaLisin@yandex.ru

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

Received 6.11.2025; revised 25.11.2025; accepted 11.12.2025

One of the unsolved problems in the physics of active matter is providing an analytical description of the mean square displacement of an active Brownian particle in a harmonic trap that takes into account the particle's translational and rotational inertia. Solving this problem is relevant because inertial effects can play a significant role in a number of experiments and applications involving active particles. Within the framework of a model of an active Brownian particle with translational and rotational inertia, an analytical expression has been obtained that describes the evolution of the mean square displacement of a particle in a harmonic trap.

Keywords: active matter; active Brownian particles; mean square displacement.

REFERENCES

1. Aranson I. S., Active colloids. Physics-Uspekhi **56** (1), 79 (2013).
2. Elgeti J., Winkler R. G. and Gompper G., Rep. Prog. Phys. **78**, 056601 (2015).
3. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G. and Volpe G., Rev. Mod. Phys. **88**, 045006 (2016).

4. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M. and Thomas H., *Phys. Rev. Res.* **2**, 033226 (2020).
5. Arkar K., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Kononov E. A. and Trukhachev F. M., *Molecules* **26**, 561 (2021).
6. Petrov O. F., Boltnev R. E. and Vasiliev M. M., *Sci. Rep.* **12**, 6085 (2022).
7. Leoni M., Paoluzzi M., Eldeen S., Estrada A., Nguyen L., Alexandrescu M., Sherb K. and Ahmed W. W., *Physical Review Research* **2** (4), 043299 (2020).
8. Deblais A., Barois T., Guerin T., Delville P. H., Vaudaine R., Lintuvuori J. S., Boudet J. F., Baret J. C. and Kellay H., *Physical review letters* **120** (18), 188002 (2018).
9. Dauchot O. and Démary V., *Physical review letters* **122** (6), 068002 (2019).
10. Jiang H. R., Yoshinaga N. and Sano M., *Physical review letters* **105** (26), 268302 (2010).
11. ten Hagen B., van Teeffelen S. and Lowen H., *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 194119 (2011).
12. Szamel G., *Physical Review E* **90** (1), 012111 (2014).
13. Das S., Gompper G. and Winkler R. G., *New Journal of Physics* **20** (1), 015001 (2018).
14. Chaudhuri D. and Dhar A., *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2021(1), 013207.(2021).
15. Caraglio, M., & Franosch, T. *Physical Review Letters*, 129(15), 158001 (2022).
16. L. Caprini and U. M. B. Marconi, *The Journal of Chemical Physics*, 154(2), 024902.2021,
17. Nguyen G. P., Wittmann R. and Löwen H., *Journal of Physics: Condensed Matter.* **34** (3), 035101 (2021).
18. Lisin E. A., Vaulina O. S., Lisina I. I. and Petrov O. F., *Physical Chemistry Chemical Physics* **24** (23), 14150–14158 (2022).
19. Sprenger A. R., Caprini L., Löwen H. and Wittmann R., *Journal of Physics: Condensed Matter.* **35** (30), 305101 (2023).
20. Gutierrez-Martinez L. L. and Sandoval M., *The Journal of Chemical Physics* **153** (4), 044906 (2020).
21. Uhlenbeck G. E. and Ornstein L. S., *Physical review* **36** (5), 823 (1930).
22. Li T., Kheifets S., Medellin D. and Raizen M. G., *Science* **328** (5986), 1673–1675 (2010).
23. Takatori S. C., De Dier R., Vermant J. and Brady J. F., *Nature communications* **7** (1), 10694 (2016).
24. Rozenblit A., Buzakov M., Molodtsova A., Dmitriev A. and Olekhno N. 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development, 2025. doi: 10.1109/MLSD65526.2025.11220665
25. Wang J., Wang G., Chen H., Liu Y., Wang P., Yuan D., Liu L. et al., *Nature communications* **15** (1), 8853 (2024).
26. Ning L., Zhu H., Yang J., Zhang Q., Liu P., Ni R. and Zheng N., *National Science Open* **3** (4), 20240005 (2024).
27. Kumari A., Pal P. S., Saha A. and Lahiri S., *Physical Review E* **101** (3), 032109 (2020).
28. Hecht L., Mandal S., Löwen H. and Liebchen B., *Physical Review Letters* **129** (17), 178001 (2022).

Об авторах

Лисин Евгений Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Лаборатория диагностики пылевой плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2); старший научный сотрудник, Лаборатория физики активных сред и систем, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: eaLisin@yandex.ru AuthorID: 179843, Scopus Author ID 32867795100, ORCID 0000-0001-5498-0321, Web of Science Researcher M-1738-2016

Лисина Ирина Игоревна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Лаборатория диагностики пылевой плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2); старший научный сотрудник, Лаборатория физики активных сред и систем, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). E-mail: irina.lisina@mail.ru SPIN-код: 5802-2312, AuthorID: 923626, Scopus Author ID 21743105800, Web of Science Researcher E-8876-2017.

УДК 537.563; 537.533.9
EDN: GFPGDV

PACS: 52.50.Dg

Электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок, осажженных электронно-лучевым испарением карбида кремния в газовой среде

© В. А. Бурдовицин*, Л. Ж. Нгон А Кики, Е. М. Окс, Ф. А. Суховольский

*Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, 634050 Россия*** E-mail: burdov@fet.tusur.ru**Статья поступила в редакцию 29.07.2025; после доработки 14.10.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.5*

Кремний-углеродные пленки приготовлены путем электронно-лучевого испарения карбида кремния в азоте, кислороде, гелии и пропане. Электронный пучок создавался источником электронов с плазменным катодом. Измерены удельное сопротивление, энергия активации проводимости, ширина оптической запрещенной зоны, а также содержание элементов в пленках, осажженных при различных температурах. Показано, что изменение свойств пленок с температурой осаждения коррелирует с изменением соотношения элементов в пленках. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для создания технологии электронно-лучевого синтеза кремний-углеродных пленок.

Ключевые слова: форвакуумный электронный источник; электронно-лучевое испарение карбида кремния; кремний-углеродные пленки; удельное сопротивление; энергия активации; оптическая ширина запрещенной зоны.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-50-55

Введение

Кремний-углеродные (КУ) пленки, то есть пленки карбида кремния, содержащие дополнительные элементы, такие как кислород, азот и водород, используются для пассивации контактов кремниевых солнечных элементов [1, 2], а также в качестве материала для солнечных элементов [3]. Это повышает интерес к электрическим свойствам таких пленок. Среди многообразия методов нанесения кремний-углеродных пленок особое место занимают вакуумные методы и, в частности, электронно-лучевое испарение. Преимущества этого метода по сравнению с традиционным плазмохимическим осаждением заключаются в относительно высокой скорости осаждения (до нескольких микрометров в минуту), воз-

можности осаждения при низких (вплоть до комнатной) температурах подложки, а также в отсутствии токсичных металлоорганических соединений. В работах [4–6] испарение карбида кремния проводилось с использованием термокатодных электронных пушек, что накладывает ограничения как на диапазон рабочих давлений, так и на способность испарять материал в активных газах. В настоящей работе использован источник электронов с плазменным катодом [7], который сохраняет работоспособность в различных газах в диапазоне давлений от единиц до десятков Паскалей. Как отмечается в ряде работ [8–10], электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок в значительной степени определяются условиями осаждения. Пленки, нанесенные плазмохимическим методом с ге-

нерацией плазмы высокочастотным разрядом, характеризуются активационным механизмом электропроводности с энергией активации $E_a = 0,1-0,9$ эВ [8], которая увеличивается с увеличением мощности, подводимой в разряд. В то же время удельное сопротивление также увеличивается в диапазоне 10^2-10^9 Ом·см. Авторы публикации сообщают, что увеличение мощности сопровождается изменением соотношения атомных концентраций Si/C с 9 до 2,3, то есть устранением избытка кремния. Пленки, нанесенные методом реактивного магнетронного распыления кремния в метане [10], имеют удельное сопротивление от $1,3 \times 10^3$ до $9,4 \times 10^9$ Ом·см и энергию активации от 0,16 до 1 эВ при увеличении расхода метана. В то же время скорость осаждения снижается с 30 до 12 нм/мин, а отношение атомных концентраций Si/C также уменьшается с 2,5 до 0,17. Следует также отметить, что ширина оптической запрещенной зоны E_g увеличивается с 1,7 до 2,7 эВ. Только одна работа [4] посвящена исследованию механизма электропроводности пленок, нанесенных электронно-лучевым испарением. Как указано в [4], удельное сопротивление пленок немонотонно зависит от температуры осаждения в диапазоне 300–575 К, а энергия активации составляет 0,16 эВ.

Согласно [5], удельное сопротивление тонких пленок карбида кремния, полученных электронно-лучевым испарением, не зависит от температуры осаждения. Как в [4], так и в [5] состав газовой среды в вакуумной камере не контролировался. Эти результаты указывают на необходимость дальнейших исследований электрических свойств кремний-углеродных пленок в зависимости от температуры осаждения и состава газовой среды при электронно-лучевом испарении. Целью данной работы является изучение зависимости электрических и оптических свойств кремний-углеродных пленок, осажденных методом электронно-лучевого испарения карбида кремния в различных газах, от температуры осаждения.

Техника и методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке электронно-лучевого испарения описанной

ранее в [11]. В рабочей камере, изготовленной из нержавеющей стали, располагался графитовый тигель с мишенью, спеченной из порошка карбида кремния, и три подложкодержателя с отдельными нагревателями, оснащенными термопарами для измерения температуры T_{dep} осаждения. Подложкодержатели прикрывались заслонками с электроприводом. Оптические измерения были проведены с использованием спектрофотометра СФ 2000 для пленок, осажденных на кварцевые подложки. В качестве подложек для электрических измерений использовались пластинки поликора размером 15×20 мм и толщиной 1 мм. На эти подложки термическим испарением в вакууме предварительно осаждались медные полоски шириной 1 мм.

Подложки размещались в подложкодержателях, и рабочая камера откачивалась механическим насосом до давления 1 Па. После этого в камеру напускался рабочий газ, в качестве которого использовались азот, кислород, гелий и пропан, и производилась промывка в течение 10 минут с одновременным нагревом подложкодержателей. При рабочем давлении 4 Па осуществлялось включение электронного источника и постепенное повышение эмиссионного тока I_e и ускоряющего напряжения U_a до начала испарения мишени. При достижении рабочих параметров $I_e = 90$ мА и $U_a = 11$ кВ производилось открывание заслонок и осаждение пленок. Процесс заканчивался выключением электронного источника. После остывания подложки извлекались из камеры и помещались в установку термического испарения, где на них осаждали медные полоски перпендикулярно нижним. Приготовленные таким образом конденсаторные структуры помещались в термостатированный объем, и производились измерения вольтамперных характеристик при разных температурах. Для измерения тока использовался прибор Ф 195 (Россия). Толщину пленок определяли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 (ЛОМО Россия). На основании этих измерений производился расчет удельного сопротивления. Элементный состав определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ-1000 (Hitachi, Япония), оснащенного приставкой энергодисперсионного анализа EDS-SWIFT (Англия).

Результаты эксперимента и обсуждение

Вольтамперные характеристики структур металл – КУ пленка – металл имели линейный характер. При изменении температуры измерения крутизна характеристик изменялась. Определение сопротивления производилось по величине производной dU/dI в точке $U=0$ [12]. Зависимости удельного сопротивления ρ пленок, осажденных в разных газах (рис. 1), показывают снижение ρ с повышением температуры осаждения. Причем, наибольшим удельным сопротивлением обладают пленки, осажденные в кислороде и пропане.

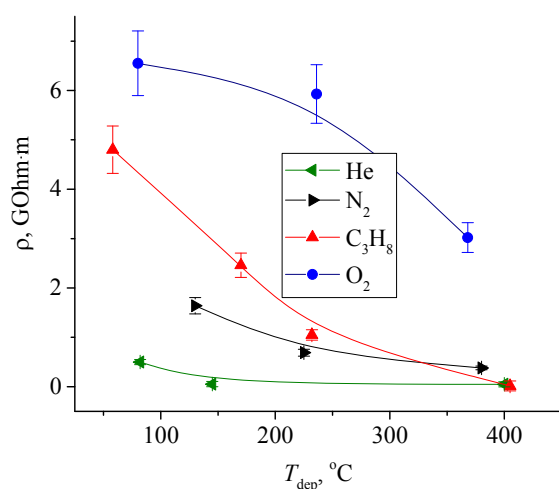


Рис. 1. Удельное сопротивление пленок, осажденных в разных газах, от температуры T_{dep} осаждения

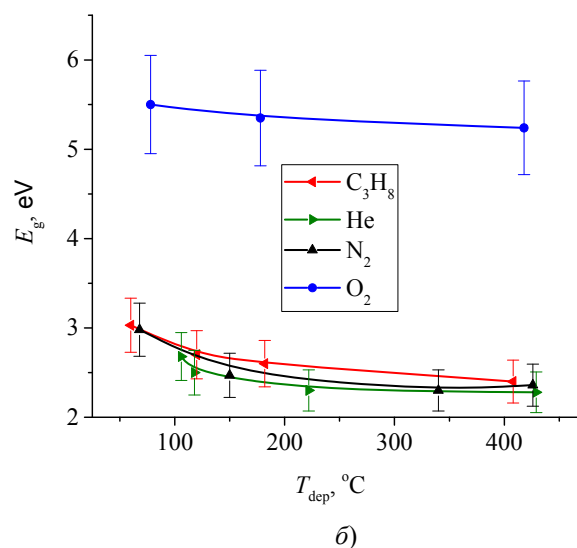
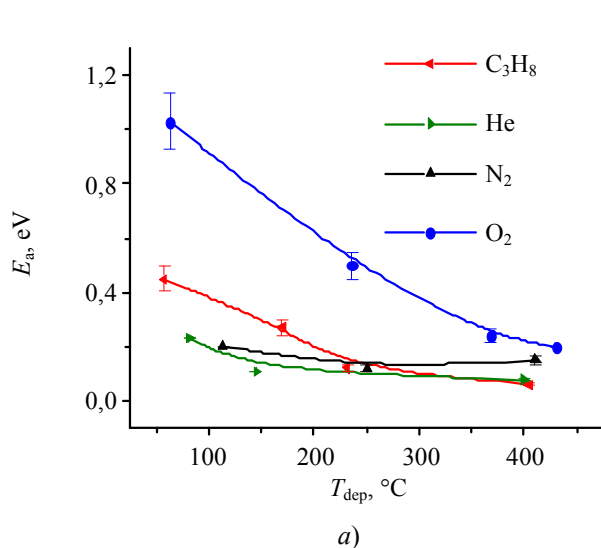


Рис. 2. Значения энергии E_a активации (а) и оптической ширины E_g запрещенной зоны пленок в зависимости от температуры T_{oc} осаждения в разных газах

Выполненные параллельно измерения состава пленок позволяют сделать некоторые предположения относительно причин изменения удельного сопротивления в зависимости

от температуры осаждения. Повышение температуры вызывает возрастание относительного содержания кремния (рис. 3). Этот результат согласуется с данными, приведен-

ными на рис. 2а. Как можно заметить, величины E_a также снижаются по мере повышения температуры осаждения. Характер полученных зависимостей коррелирует с поведением оптической ширины E_g запрещенной зоны, полученной из обработки в координатах Тауца [13] спектров пропускания в видимой области (рис. 2б). Нельзя не заметить, что величины E_a и E_g отличаются значительно.

ными в [4, 6], где снижение отношения атомных концентраций Si/C признано основной причиной повышения величин E_g и E_a . Следует заметить, однако, что в нашем случае определенную роль играет кислород, содержание которого слабо изменяется с повышением температуры осаждения, а следовательно, отношение Si/O также возрастает с повышением температуры осаждения. Причина возрастания содержания кремния с возрастанием температуры заключается, скорее всего, в более быстром снижении адсорбции газовых молекул и атомов углерода по сравнению с атомами кремния. Аргументом в пользу такого предположения является большая энергия адсорбции углерода по сравнению с кремнием, а следовательно, более сильная зависимость адсорбции от температуры [14]. Кроме того, поскольку оксид углерода – газ, то взаимодействие углерода с кислородом при повышении температуры также способствует уменьшению содержания углерода в пленке, т. к. газ уносится в откачную систему. Значения удельного сопротивления осажденных пленок позво-

ляет отнести их к полупроводниковым материалам. Сравнительно низкая энергия активации свидетельствует о том, что пленочный материал резко отличается по свойствам от кристаллического карбида кремния. Это в том числе проявляется при анализе оптических спектров пропускания. Определенная на основе этих спектров величина E_g , находящаяся в пределах 2–3 эВ (рис. 2б), вполне соответствует значениям этой величины для кристаллического SiC. Наблюдаемое различие величин E_g и E_a может быть объяснено предположением о наличии в запрещенной зоне пленок примесных уровней донорного типа [15] с глубиной залегания, соответствующей измеренным значениям E_a . Причиной появления таких уровней могут быть как собственно примеси, а именно, водород и кислород, так и аморфная структура пленки. Последнее предположение весьма вероятно, поскольку в известных работах [8–10] по электрическим свойствам кремний-углеродных пленок для E_a указывается величина в десятые доли электрон-вольта.

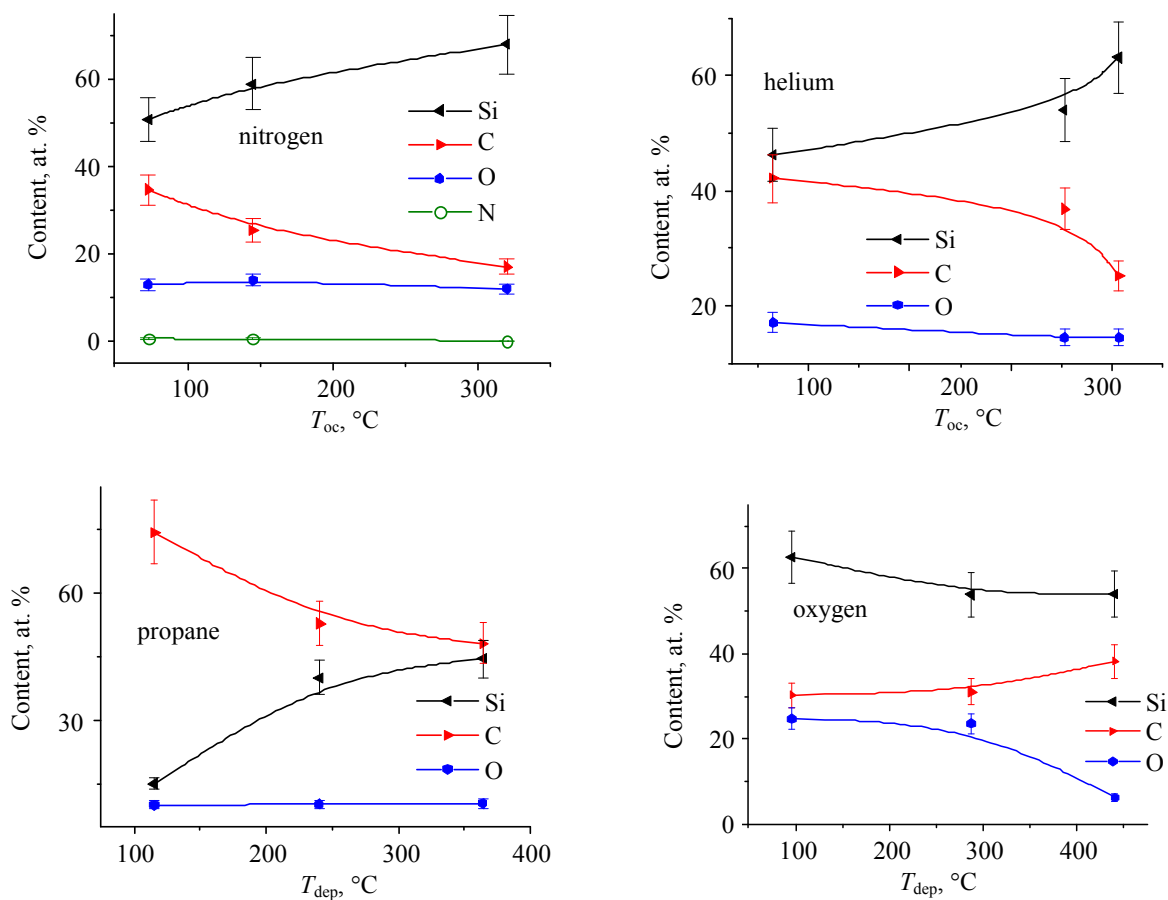


Рис. 3. Состав пленок, осажденных в разных газах, в зависимости от температуры T_{dep} осаждения

Заключение

Выполненные измерения указывают на активационный механизм проводимости кремний-углеродных пленок, полученных электронно-лучевым испарением карбида кремния в разных газах. Величина энергии активации находится в пределах 1,0–0,1 эВ в зависимости от рода газа и снижается с повышением температуры осаждения. Удельное сопротивление пленок составляет 10^8 – 10^9 Ом·м и имеет тенденцию к снижению с возрастанием температуры осаждения. Отмеченные закономерности находят свое объяснение в рамках представлений об изменении состава пленок в сторону обогащения кремнием при повышении температуры осаждения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEWM-2023-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu Z., Tao K., Jiang S., Jia R., Li W., Zhou Y. et al. / Solar Energy Materials and Solar Cells. 2020. Vol. 206. P. 110329.

2. Muhanad A. A., Mohammed M. S., Wathiq R. A. / The Scientific Journal of Koya University. 2021. Vol. 9. P. 10852.

3. Shan D., Sun D., Wang M., Cao Y. / Crystals. 2024. Vol. 14. P. 45.

4. Bunton G. V. / J. Phys. D: Appl. Phys. 1970. Vol. 3. P. 232–236.

5. Yi J., He X. D., Sun Y. / Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 461. P. L11–L13.

6. Zheng J., Ye L., Hu Y., Huang Y., Yu J., Chen T. / Vacuum. 2023. Vol. 211. P. 111979.

7. Бурдовитин В. А., Окс Е. М. / Известия ВУЗов. Физика. 2020. № 10. С. 33–40.

8. Ambrosone G., Basa D. K., Coscia U., Santamaria L., Pinto N., Ficcadenti M. et al. / Energy Procedia. 2010. Vol. 2. P. 3–7.

9. Vetter M., Voz C., Ferre R., Martin I., Orpella A. et al. / Thin Solid Films. 2006. Vol. 511–512. P. 290–294.

10. Tavsanoglu T., Zayim E. O., Agirseven O., Yildirim S., Yucel O. / Thin Solid Films. 2019. Vol. 674. P. 1–6.

11. Burdovitsin V., Bakeev I., Ngon A. Kiki L., Oks E., Tyunkov A. / High Temperature Material Processes. 2024. Vol. 29. P. 1–7.

12. Chang C. Y., Fang Y. K., Sze S. M. / Solid-State Electronics. 1971. Vol. 14. P. 541–550.

13. Tauc J. / Materials Research Bulletin. 1968. Vol. 3. P. 37–46.

14. Cahyadi Erica / UCLA Electronic Theses and Dissertations. 2012. <https://escholarship.org/uc/item/7c35n3n0>

15. Dubrovskii G. B., Radovanova E. I. / Phys. Stat. Sol. (b). 1971. Vol. 48. P. 875–879.

PACS: 52.50.Dg

Electrical and optical properties of silicon-carbon films deposited by electron beam evaporation of silicon carbide in gas environment

V. A. Burdovitsin*, L. J. Ngon A Kiki, E. M. Oks and F. A. Sukhovolsky

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

*E-mail: burdov@fet.tusur.ru

Received 29.07.2025; revised 14.10.2025; accepted 11.12.2025

Silicon-carbon films were prepared by electron beam evaporation of silicon carbide in nitrogen, oxygen, helium and propane. Electron beam was produced by electron source with plasma cathode. The resistivity, conductivity activation energy, optical band gap as well as element content of silicon-carbon films obtained at different temperatures were measured. It is shown that a change in the films properties with the deposition temperature correlates with a change in the ratio of elements in the films.

Keywords: plasma-cathode electron source; electron beam evaporation of silicon carbide; silicon-carbon films; resistivity; activation energy; optical band gap.

REFERENCES

1. Xu Z., Tao K., Jiang S., Jia R., Li W., Zhou Y. et al., *Solar Energy Materials and Solar Cells* **206**, 110329 (2020).
2. Muhanad A. A., Mohammed M. S. and Wathiq R. A., *The Scientific Journal of Koya University* **9**, 10852 (2021).
3. Shan D., Sun D., Wang M. and Cao Y., *Crystals* **14**, 45 (2024).
4. Bunton G. V., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **3**, 232–236 (1970).
5. Yi J., He X. D. and Sun Y., *Journal of Alloys and Compounds* **461**, L11–L13 (2008).
6. Zheng J., Ye L., Hu Y., Huang Y., Yu J. and Chen T., *Vacuum* **211**, 111979 (2023).
7. Burdovitsin V. A. and Oks E. M., *Russian Physics Journal* **63**, 1678–1685 (2021).
8. Ambrosone G., Basa D. K., Coscia U., Santamaria L., Pinto N., Ficcadenti M. et al., *Energy Procedia* **2**, 3–7 (2010).
9. Vetter M., Voz C., Ferre R., Martin I., Orpella A. et al., *Thin Solid Films* **511–512**, 290–294 (2006).
10. Tavsanoğlu T., Zayim E. O., Agirseven O., Yildirim S. and Yucel O., *Thin Solid Films* **674**, 1–6 (2019).
11. Burdovitsin V., Bakeev I., Ngon A. Kiki L., Oks E. and Tyunkov A., *High Temperature Material Processes* **29**, 1–7 (2024).
12. Chang C. Y., Fang Y. K. and Sze S. M., *Solid-State Electronics* **14**, 541–550 (1971).
13. Tauc J., *Materials Research Bulletin* **3**, 37–46 (1968).
14. Cahyadi Erica. *UCLA Electronic Theses and Dissertations*. 2012. <https://escholarship.org/uc/item/7c35n3n0>
15. Dubrovskii G. B. and Radovanova E. I., *Phys. Stat. Sol. (b)* **48**, 875–879 (1971).

Об авторах

Бурдовицин Виктор Алексеевич, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: burdov@fet.tusur.ru SPIN-код: 5044-2693, AuthorID: 36336

Нгон А Кики Лионель Жозель, инженер, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: joelngon52@gmail.com SPIN-код: 2617-5472, AuthorID: 1273207

Окс Ефим Михайлович, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: oks@fet.tusur.ru SPIN-код: 6422-5057, AuthorID: 18767

Суховольский Федор Александрович, магистрант, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: spectrumz12@yandex.ru

УДК 539.216.2: 544.77
EDN: KRXVEXPACS: 61.43 Bn, 68.43 Fg,
68.47 Pe, 68.37 Hk**Исследования полиамидных мембран, модифицированных наночастицами нитрида бора, для фильтрации наночастиц серебра**© И. В. Локтионова^{1,*}, П. В. Абакумов², А. П. Кузьменко¹, А. И. Колпаков¹,
Е. А. Новиков¹, В. А. Мамонтов¹, Л. П. Петрова¹¹ Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 305040 Россия

*E-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

² Курский государственный медицинский университет К. Маркса, г. Курск, 305041 Россия

Статья поступила в редакцию 7.07.2025; после доработки 13.10.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 1.3.2

Методами атомно-силовой микроскопии установлено формирование упорядоченных нанослоев (размер частиц ~ 20 нм, шероховатость 24 нм). Спектроскопия комбинационного рассеяния света подтвердила образование химических связей с сохранением структуры полиамида. Модифицированные образцы показали высокую пропускную способность (97–98 %), превосходя немодифицированные на 35 %, что согласуется с данными молекулярно-динамического моделирования. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования модифицированных полиамидных мембран для эффективной фильтрации наночастиц серебра.

Ключевые слова: нитрид бора; полиамидная ткань; ленгмюровские пленки; магнетронные пленки; мембраны; фильтрация наночастиц.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-56-62

Введение

Особую сложность в различных аспектах применения наноматериалов представляет фильтрация коллоидных растворов наночастиц металлов, таких как Ag, Au, Pt, Cu, Fe и др., что вызвано их агрегированием и взаимодействием с поверхностями фильтрующих материалов [1]. Полиамидные мембраны в фильтрационных системах, обладая доступностью, механической прочностью, стабильностью и долговечностью в агрессивных средах нашли широкое применение [2]. Модификация полиамида наночастицами нитрида бора (BN) с его уникальными свойствами [3] позволяет формировать упорядоченные нанопористые структуры, с низким гидродинамичес-

ким сопротивлением и увеличенной пропускной способностью, в том числе, за счет устойчивости к набуханию [4, 5]. Так в [6] показано, что при введении 5 мас.% BN в полиамид увеличивается средний размер пор с 50 нм до 80–100 нм, а общая пористость – на 15–20 %, с созданием разветвлённых наноканалов, повышающих скорость фильтрации на 25–30 % [7, 8]. Добавление 3 % BN уменьшает сопротивление потоку воды на 40 % по сравнению с немодифицированным полиамидом [9] при этом введение 5 % BN понижает водопоглощение в 2 раза [10]. Это снижает набухание, предотвращая закупорку пор и деформации ячеек мембран, обеспечивая стабильность характеристик в течение длительного времени [7, 9]. Таким образом, модификация поли-

амидных материалов нитридом бора улучшает их пропускную способность и эксплуатационную стабильность.

Целью данной работы является исследование особенностей фильтрации коллоидного раствора наночастиц серебра через ткань ПА6, модифицированную наночастицами нитрида бора методами Ленгмюра-Блоджетт и магнетронным напылением.

Материалы и методы

Нанопленки из наночастиц нитрида бора были осаждены двумя методами на полиамидную ткань (ПА 6) с диаметром нити ~400 мкм, которая состоит из сотен тонких филаментов и имеет гладкую сетчатую поверхность. Методом Ленгмюра-Блоджетт (LB) LB NF *h*-BN / ПА 6 с использованием установки KSV Nima 2002 нанопленки (NF) формировались на поверхности деионизированной воды (18 МОм·см) при нормальных условиях из коллоидной системы (CS) стабилизированных стеариновой кислотой (SA) наночастиц BN. CS объемом 3 мкл наносилась на поверхность субфазы. Давление переноса составляло 20 мН/м. Методом высокочастотного магнетронного распыления (MR) нанопленки MR NF BN / ПА 6 осаждались на установке МВУ ТМ-МАГНА. Использовалась мишень гексагонального нитрида бора (*h*-BN) диаметром 100 мм. Рабочая атмосфера состояла из азота (0,25 л/ч N₂) с добавлением аргона (0,03–0,2 л/ч Ar). MR осуществлялось в течение 3600 с при мощности 300 Вт. Перед напылением камеру вакуумировали до 5×10⁻⁴ мм.рт.ст. Полиамидная подложка нагревалась до 420 К.

Морфологию ленгмюровских нанопленок исследовали с помощью сканирующей зондовой микроскопии (SPM) SmartSPM (AIST-NT). Рамановскую спектроскопию (RS) выполняли на микроспектрометре OmegaScore (AIST-NT) в ZXXZ̄-геометрии (λ = 473 нм, со 170 см⁻¹) и спектрометре LabRAM HR (Horiba) в ZXYZ̄-геометрии (λ = 532 нм, с 50 см⁻¹) с одинаковым спектральным разрешением 0,8 см⁻¹. Оптические свойства CS измерены на спектрофотометре

СФ-2000 (диапазон 190–1100 нм). Фильтрационная эффективность определялась по изменениям оптической плотности CS после ее пропускания через исходную ткань ПА 6 и модифицированные образцы (LB NF *h*-BN/ПА 6 и MR NF BN/ПА 6). С целью установления воспроизводимости результатов все эксперименты были проведены в трёхкратной повторности. Размеры наночастиц CS определялись по малоугловому рентгеновскому рассеянию (SAXS) на дифрактометре SAXSess mc² (Anton Paar, Cu Kα, λ = 0,154 нм, разрешение 0,03–28 нм⁻¹). CS наночастиц серебра синтезировалась методом Кери Ли.

Моделирование фильтрации частиц Ag матрицей ПА 6 проводили в Materials Studio 2020 с использованием модулей Forcite и Amorphous Cell. Сначала создали атомистические модели ПА 6, воды и серебра, оптимизированные по геометрии с применением Universal Force Field (включая Ван-дер-Ваальсовы и кулоновские взаимодействия, метод Ewald summation). Затем в Amorphous Cell сформировали периодическую ячейку водного раствора Ag (~10 мас.%), оптимизировали её структуру и выполнили молекулярно-динамическое моделирование (NVT-ансамбль, 298 К, 105 пс, шаг 1,5 фс).

Результаты и обсуждения

По результатам анализа сформированного наноструктурированного слоя LB NF *h*-BN / ПА 6 методом SPM установлены характерные латеральные размеры частиц ~20 нм (рис. 1). Среднеквадратичная шероховатость пленочного слоя LB NF *h*-BN на поверхности ПА 6 несколько возросла, увеличившись до 24 нм (вставка к рис. 1). Шероховатость измерялась в пяти различных точках мембраны, и по результатам этих измерений вычисленное стандартное отклонение составило 1,3 нм, что отражает вариабельность поверхности и достоверность оценки средних значений. Наблюдалась преимущественная ориентация частиц между первичными волокнами (филаментами) ткани, что обусловлено действием капиллярных сил в процессе формирования LB NF *h*-BN / ПА 6.

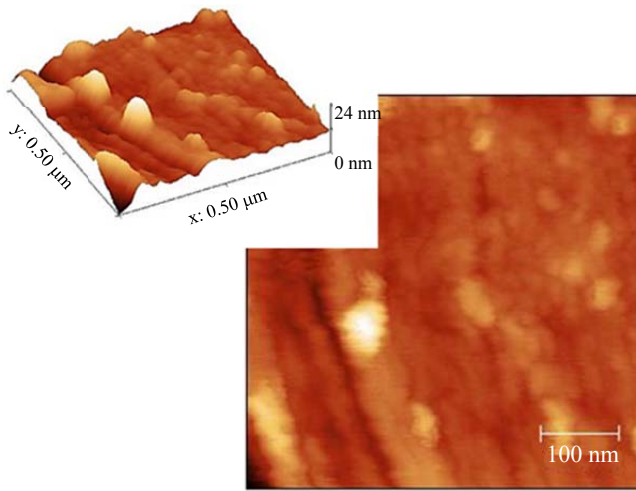


Рис. 1. SPM изображение модифицированной наночастицами нитрида бора полиамидной ткани. На вставке среднеквадратичная шероховатость пленочного слоя LB NF h-BN

В $ZXY\bar{Z}$ -спектрах RS образцов LB NF h-BN / PA 6 и MR NF BN / PA 6 наблюдались

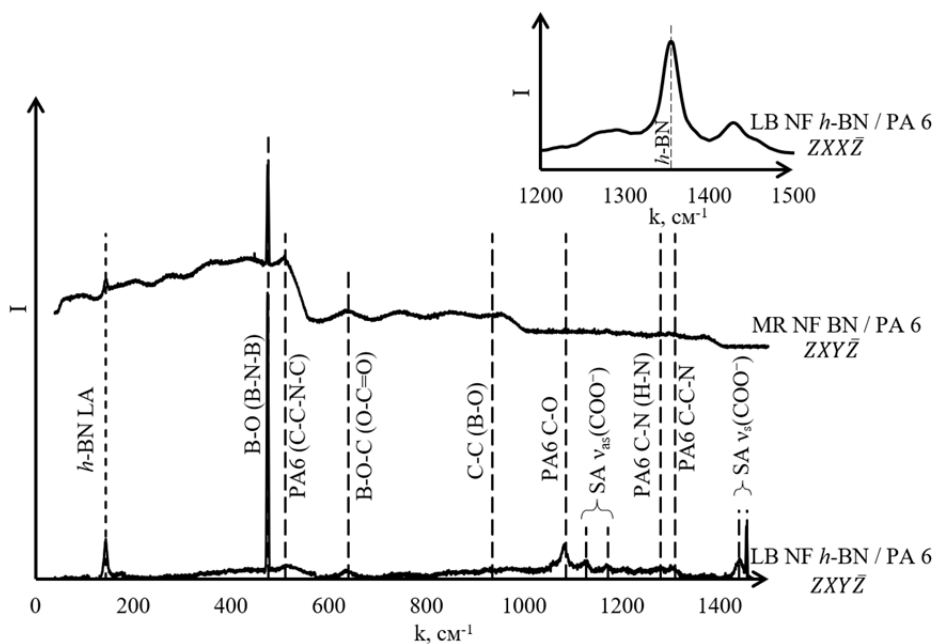


Рис. 2. Поляризованные $ZXY\bar{Z}$ -спектры комбинационного рассеяния света для образцов фильтров, полученных модификацией PA6 наночастицами BN методами LB и MR. На вставке пример $ZXX\bar{Z}$ -спектра комбинационного рассеяния света для образца LB NF h-BN / PA 6

В среднечастотной области ($500\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$) доминировали колебания, связанные со взаимодействием BN и стеариновой кислоты. Так пик 643 cm^{-1} соответствовал деформационным колебаниям карбоксилатных групп (O-C=O) в стеарате бора, а также валентным колебаниям связей B-O-C , что под-

тверждало возникновение химической связи молекул стеариновой кислоты с поверхностью BN. Сигнал при 930 cm^{-1} включал вклад валентных колебаний C-C в полиамидной цепи и симметричных колебаний B-O в бороксидных структурах (B-O-B), которые могли формироваться при частичном гидролизе BN [13, 14].

колебательные моды характерные, как полимерной матрице, так и осажженной функционализированной пленке (рис. 2). Так в низкочастотной области спектра ($< 500\text{ cm}^{-1}$) возбуждалась LA-мода колебаний бор-азотной решетки h-BN 149 cm^{-1} . Отмечался рост ее интенсивности после функционализации h-BN стеариновой кислотой. Эти изменения поляризуемости поверхности NF обусловлены образованием химических связей между BN и карбоксилатными группами [11, 12].

Линия 478 cm^{-1} отвечала за деформационные колебания связей B-O , возникающие при частичном окислении поверхности h-BN, либо за низкочастотные моды аморфного BN (B-N-B изгибные колебания). Сигнал 518 cm^{-1} может быть отнесён как к скелетным колебаниям полиамидной матрицы (деформация C-C-N-C), так и к дефектным модам BN, связанным с вакансиями азота или замещением атомов бора [10].

В области $1000\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ ключевыми являлись моды, связанные с карбоксилатными группами и амидными структурами. Пик 1085 см^{-1} отвечал валентным колебаниям C–O в эфирных связях полиамида и антисимметричным колебаниям карбоксилатов ($\nu_{as}(\text{COO}^-)$). Дублет $1132/1182\text{ см}^{-1}$ однозначно идентифицировал карбоксилатную группу стеариновой кислоты, где 1132 см^{-1} соответствовало симметричному ($\nu_s(\text{COO}^-)$), а 1182 см^{-1} – антисимметричному ($\nu_{as}(\text{COO}^-)$) колебаниям. Это свидетельствовало о депротонировании кислоты и образовании стеарата бора. Пик 1285 см^{-1} характерен для амида III в полиамидах (комбинация C–N растяжения и N–N деформации), что указывало на сохранение структурной целостности полимерной матрицы. Сигнал 1310 см^{-1} связан с кристаллическими фазами полиамида (упорядоченные участки C–C–N) и деформационными колебаниями CH_2 -групп. Пики 1423 см^{-1} и 1457 см^{-1} соответствовали симметричным колебаниям карбоксилатов ($\nu_s(\text{COO}^-)$) и деформационным колебаниям CH_2 -цепей в полиамиде и стеариновой кислоте, что подтверждало присутствие обоих компонентов в системе в соответствии с [11, 12]. При этом основной пик для *h*-BN 1370 см^{-1} в неполяризованном *ZXZ*-спектре RS подтверждал успешное нанесение нано-

частиц на волокна PA 6 (вставка к рис. 2).

Спектр поглощения CS наночастиц серебра демонстрировал наличие двух выраженных, но размытых максимумов в области длин волн около 440 нм и 720 нм (рис. 3).

Данные пики соответствовали характерным проявлениям поверхностного плазмонного резонанса (SPR), который обусловлен коллективными колебаниями свободных электронов на поверхности металлических наночастиц под действием электромагнитного поля падающего света [15]. Здесь же на вставке к рисунку 3 представлены результаты SAXS в этой CS, указывающие на ее гетерогенный характер с размерами наночастиц 29, 56 и 100 нм. Представленные ниже выводы по спектрам поглощения (рис. 3) подтверждались наблюдаемыми четко выраженными тремя пиками в спектре SAXS, возникновение которых свидетельствовало о дискретизации распределения частиц по размерам и хорошей стабилизации CS. Подобная полимодальная структура спектра SAXS типична для сложных CS. Симметрия формы и ширина пика доминирующего размера 56 нм свидетельствовали о высокой степени монодисперсности CS. Ширина пика на 100 нм указывала на существенный разброс размеров в данной группе.

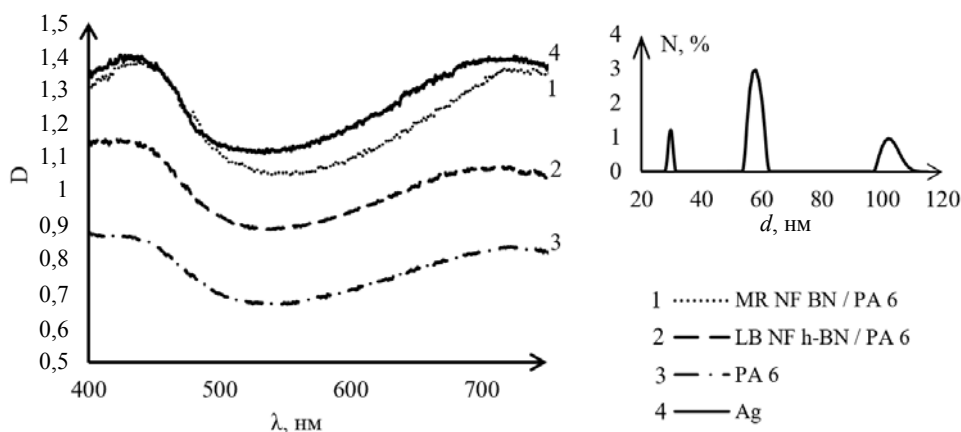


Рис. 3. Фотометрические спектры CS частиц серебра до и после фильтрации. На вставке приведено распределение частиц серебра по размера (SAXS)

Для CS, содержащих монораспределённые сферические наночастицы серебра малых размеров (10–30 нм) SPR, как правило, наблюдается в синей части спектра, около 400 нм. Однако, в данном случае основной пик сдвинут в область 440 нм, а также заметно уширен, что позволяло сделать вывод о полидисперсной природе раствора – то есть, о наличии частиц с широким распределением

по размерам. Смещение в сторону длинных волн (красное смещение) может быть обусловлено ростом среднего диаметра частиц: при увеличении размеров наночастиц серебра (вставка к рис. 3 – 56 нм). SPR сдвинут в область более низких энергий с большей длиной волны, то есть возникает батохромный сдвиг. Появление SPR максимума в области 720 нм свидетельствовало о формировании агрегатов

наночастиц серебра. В таких условиях взаимодействие между их плазмонными модами, согласно [16], сопровождалось возникновением дополнительных полос поглощения, как правило, в красной или ближней инфракрасной области спектра и обусловлено либо прямым контактом частиц, либо их близким расположением в растворе CS – в рамках так называемого «плазмонного перекрытия». Снижение оптической плотности в желтых и зеленых областях спектра может быть вызвано ростом рассеяния света на агрегатах наночастиц серебра с размерами более 100 нм.

Из закона Ламберта-Бугера-Бера оптическая плотность D прямо пропорциональна концентрации CS – c . На этом основании зависимость $D(\lambda)$ на рисунке 3 однозначно связана с концентрацией наночастиц Ag в CS. Таким образом пропускание наночастиц Ag образцами фильтров (MR NF BN / PA 6 и LB h -NF BN / PA 6) изменялось в зависимости от их размеров, что подтверждено возбуждением двух SPR и ростом рассеяния света. Более того, из этого же рисунка следует наиболее близкое соответствие между спектрами поглощения CS с наночастицами серебра до и после фильтрации через образец MR NF BN / PA 6. Проведена сравнительная оценка пропускной способности изучаемых фильтров $T = D_{MR} / D_{Ag}$. Установлено, что ее величина принимает наибольшее значение для образца MR NF BN / PA 6 – $T = 98\%$ для раз-

меров наночастиц Ag – 56 нм, достигая даже для наибольшего размера наночастиц Ag (порядка 100 нм) – $T = 97\%$, тогда как для чистой ткани – $T = 62\%$. В образце LB NF h -BN / PA 6 величина $T = 82\%$. Таким образом, на обоих образцах фильтров на основе ткани PA 6, модифицированных наночастицами нитрида бора, достигался значительный рост их пропускной способности Ag. Однако, при магнетронном напылении частицы BN проникают вглубь полиамида, создавая объемно-модифицированный слой, тогда как метод ЛБ формирует лишь поверхностную пленку, что объясняет её меньшую эффективность в снижении гидродинамического сопротивления. Представленные результаты и их качественное обоснование, согласовывались с данными приведенными во введении.

Для оценки степени проникновения и взаимодействия ионов серебра с полиамидной структурой были построены графики распределения концентраций частиц серебра вдоль вертикальной оси для образцов PA 6 и MR NF BN / PA 6 (рис. 4). Моделируемая расчетная ячейка $100 \times 100 \times 100 \text{ \AA}$ визуализировалась до (0 пс) и после (105 пс) фильтрации. В начальный момент времени молекулы воды (90 % м.д.) и частицы серебра (10 % м.д.), представляющие собой, в рамках модели, отдельные атомы с советующими потенциалами, располагались выше в непосредственной близости от мембраны.

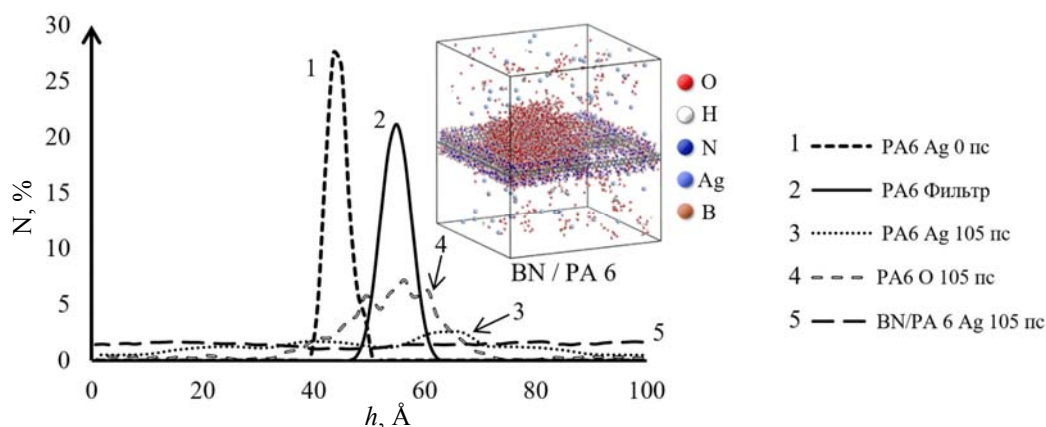


Рис. 4. Пространственное распределение атомов после прохождения их через фильтр, по данным Materials Studio 2020

В процессе фильтрации происходило пространственное перераспределение молекул и частиц. Так при фильтрации частиц Ag через MR NF BN / PA 6 концентрация Ag в модели-

руемой ячейке выравнивалась и ее градиент минимизировался, что указывало на минимальное взаимодействие между BN и Ag. То есть пропускная способность полиамидной

ткани для наночастиц Ag увеличивалась. В образце чистой ткани РА 6 (рис. 4) также отмечено перераспределение частиц Ag с локальным увеличением их концентрации в приграничных областях фильтра (согласно рис. 4 – РА 6) вследствие Ван-дер-Ваальсова взаимодействия. Таким образом результаты молекулярно-динамического моделирования полностью подтверждали экспериментальные данные.

Заключение

Созданные методами Ленгмюра-Блоджетт и магнетронным напылением модифицированные наночастицами нитрида бора образцы фильтров на основе полиамидной ткани РА6 имели повышенный коэффициент пропускной способности для коллоидного раствора наночастиц серебра. Введением наночастиц нитрида бора удалось добиться комплексного положительного влияния эффектов снижения набухания и гидродинамического сопротивления за счет роста разветвленных каналов в образцах исследованных фильтров, что способствовало росту их пропускной способности на примере полидисперсной (29, 56 и 100 нм) коллоидной системы наночастиц серебра, подтвержденного результатами спектроскопических исследований, согласующимися с выводами молекулярно-динамического моделирования, выполненного с учетом диффузионных и поверхностных эффектов в процессе фильтрации.

Публикация подготовлена в рамках программы стратегического академического лидерства

«Приоритет 2030» Юго-Западного государственного университета. Исследования проводились на оборудовании Регионального центра нанотехнологий Юго-Западного государственного университета и Центра коллективного пользования «Технологии и материалы НИУ «БелГУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yadav K. K. et al. / Mater. Today Chem. 2024. Vol. 40. P. 102226.
2. Seah M. Q. et al. / J. Environ. Chem. Eng. 2024. P. 112628.
3. Molaei M. J. et al. / ACS Appl. Electron. Mater. 2021. Vol. 3. № 12. P. 5165–5187.
4. Bragaglia M. et al. / Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023. Vol. 36 (7). P. 2862–2882.
5. Xu Q. et al. / Materials Advances. 2023. Vol. 4 (6). P. 1490–1501.
6. Coogan A. et al. / Journal of Materials Chemistry A. 2023. Vol. 11 (23). P. 12266–12281.
7. Vatanpour V. et al. / Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024. Vol. 63 (12). P. 5237–5248.
8. Zheng X. et al. / ACS applied materials & interfaces. 2023. Vol. 15 (23). P. 28606–28617.
9. Lu Z. et al. / ACS Applied Nano Materials. 2024. Vol. 7 (15). P. 17958–17966.
10. Randhawa K. S. et al. / Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2023. Vol. 33 (2). P. 625–635.
11. Lin Y. et al. / J. Phys. Chem. C. 2010. Vol. 114. № 41. P. 17434–17439.
12. Bhattacharya A. et al. / Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85. № 3. P. 035415.
13. Zhao D. et al. / Sci. Rep. 2024. Vol. 14. № 1. P. 10619.
14. Salazar-Beltrán D. et al. / Polym. Test. 2018. Vol. 68. P. 87–94.
15. Zulfajri M. et al. / Adv. Colloid Interface Sci. 2024. P. 103115.
16. Xu J. et al. / eScience. 2024. P. 100312.

PACS: 61.43 Bn, 68.43 Fg, 68.47 Pe, 68.37 Hk

Enhanced permeability of polyamide fabrics for silver nanoparticles via modification with boron nitride

I. V. Loktionova^{1,*}, P. V. Abakumov², A. P. Kuzmenko¹, A. I. Kolpakov¹, V. A. Mamontov¹, E. A. Novikov¹ and L. P. Petrova¹

¹ Southwest State University, Kursk, 305040 Russia

* E-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

² Kursk State Medical University, Kursk 305041 Russia

Received 7.07.2025; revised 13.10.2025; accepted 11.12.2025

Polyamide membranes modified with boron nitride nanoparticles were studied for silver nanoparticle filtration. Atomic force microscopy revealed the formation of ordered nanolayers (par-

ticle size ~ 20 nm, roughness 24 nm). Raman spectroscopy confirmed the formation of chemical bonds while preserving the polyamide structure. The modified samples exhibited high permeability (97–98 %), surpassing unmodified ones by 35 %, which is consistent with molecular dynamics simulation data. The obtained results demonstrate the potential of using modified polyamide membranes for efficient silver nanoparticle filtration.

Keywords: boron nitride; polyamide fabric; Langmuir films; magnetron films; membranes; nanoparticle filtration.

REFERENCES

1. Yadav K. K. et al., *Mater. Today Chem.* **40**, 102226 (2024).
2. Seah M. Q. et al., *J. Environ. Chem. Eng.* 112628 (2024).
3. Molaei M. J. et al., *ACS Appl. Electron. Mater.* **3** (12), 5165–5187 (2021).
4. Bragaglia M. et al., *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **36** (7), 2862–2882 (2023).
5. Xu Q. et al., *Mater. Adv.* **4** (6), 1490–1501 (2023).
6. Coogan Á. et al., *J. Mater. Chem. A* **11** (23), 12266–12281 (2023).
7. Vatanpour V. et al., *Ind. Eng. Chem. Res.* **63** (12), 5237–5248 (2024).
8. Zheng X. et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** (23), 28606–28617 (2023).
9. Lu Z. et al., *ACS Appl. Nano Mater.* **7** (15), 17958–17966 (2024).
10. Randhawa K. S. et al., *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* **33** (2), 625–635 (2023).
11. Lin Y. et al., *J. Phys. Chem. C* **114** (41), 17434–17439 (2010).
12. Bhattacharya A. et al., *Phys. Rev. B* **85** (3), 035415 (2012).
13. Zhao D. et al., *Sci. Rep.* **14** (1), 10619 (2024).
14. Salazar-Beltrán D. et al., *Polym. Test.* **68**, 87–94 (2018).
15. Zulfajri M. et al., *Adv. Colloid Interface Sci.* 103115 (2024).
16. Xu J. et al., *eScience* 100312 (2024).

Об авторах

Локтионова Инна Владимировна, к.ф.-м.н., доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: ms.chuhaeva@mail.ru ORCID: 0009-0005-7272-2939, SPIN-код: 9474-8070, AuthorID: 738514

Абакумов Павел Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, Курский государственный медицинский университет (305041, Россия, г. Курск, ул. К. Маркса, д. 3). E-mail: abakumovpavel18@gmail.com ORCID: 0009-0009-1055-4019, SPIN-код: 7660-5667, AuthorID: 677269

Кузьменко Александр Павлович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: ark3527@mail.ru ORCID: 0000-0001-7089-0692, SPIN-код: 2312-6978, AuthorID: 41744

Колпаков Артем Игоревич, аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru ORCID: 0009-0004-8571-8544, SPIN-код: 8221-5955, AuthorID: 1243978

Мамонтов Владимир Александрович, аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru ORCID: 0000-0003-0592-3851, SPIN-код: 1627-8010, AuthorID: 1118347

Новиков Евгений Александрович, к.ф.-м.н., старший преподаватель, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: novikov.2403@mail.ru ORCID: 0000-0002-8824-1540, SPIN-код: 7321-5660, AuthorID: 1040884

Петрова Людмила Павловна, к.ф.-м.н., доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94). E-mail: galarina55555@mail.ru ORCID: 0009-0007-8883-5983, SPIN-код: 7656-4073, AuthorID: 651895

УДК 621.791.317.1
EDN: FOKPCE

PACS: 85.60.Gz

Исследование свойств вакуумно-плотных паяных соединений, применяемых для изготовления держателей матричных фотоприёмных устройств

© Е. Д. Коротаев^{1,*}, Д. И. Гурьев¹, А. И. Гурьев¹, А. А. Зиньковский¹,
Д. И. Морозов¹, А. А. Шаров^{1,2}¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: korotaevrus@gmail.com

² Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАуК),
Москва, 105064 РоссияСтатья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 10.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6

Исследованы свойства вакуумно-плотных паяных соединений, созданных индукционной пайкой, применяемой для изготовления узлов вакуумных криогенных корпусов охлаждаемых матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) – гильз-держателей. Учтена специфика их конструкции и применения в микрокриогенных системах охлаждения МФПУ. Для контроля скорости натекания по гелию разработана оригинальная оснастка, позволяющая существенно повысить предельную чувствительность гелиевого течеискателя. Скорость натекания по гелию изготовленных образцов корпусов составляет 5×10^{-13} Па·м³/с.

Ключевые слова: индукционная пайка; криогенный корпус; матричное фотоприёмное устройство.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-63-68

Многие типы матричных фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона спектра требуют охлаждения фоточувствительного элемента (ФЧЭ), в том числе, до криогенных температур. Для решения задачи обеспечения необходимой рабочей температуры ФЧЭ часто используют микрокриогенные машины, построенные по обратному циклу Стирлинга, которые могут создаваться как в интегральном исполнении, так и по системе Сплит-Стирлинг [1]. Конструктивно охлаждаемое фотоприёмное устройство представляет собой микрокриогенную машину, интегрированную с гильзой-держателем на холодном пальце, которой установлен охлаждаемый ФЧЭ. Гильза-держатель выполняет роль функционального элемента корпуса микрокриогенной машины, внутри которого происходит движение регенератора с поршнем-вытеснителем. Внутренняя полость машины и, соответственно,

гильзы-держателя заполнена рабочим газом (как правило, гелием) под высоким давлением (от 20 до 50 кгс/см²). При этом гильза-держатель одновременно является частью корпуса (криостата) фотоприёмного устройства (как правило, вакуумированного или, реже, газонаполненного).

Таким образом, исходя из функциональных особенностей гильзы-держателя, к нему предъявляются следующие основные требования:

- герметичность;
- стойкость к перепадам температур;
- низкие уровни теплопритоков;
- коррозионная стойкость материалов,

применяемых для изготовления гильз-держателей, а также особые требования к их температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР): для обеспечения геометрической стабильности устройства они долж-

ны быть невелики, а материал площадки для размещения ФЧЭ, кроме того, должен иметь ТКЛР максимально близкий к ТКЛР материала ФЧЭ, чтобы избежать температурных напряжений в их соединении.

Перечисленные требования наилучшим образом обеспечены в типовой конструкции гильзы-держателя, представленной на рис. 1.

Такая гильза-держатель состоит из базовой втулки 1, выполняемой из нержавеющей стали, которая непосредственно соединяется с корпусом микрокриогенной машины, с базо-

вой втулкой соединена гильза 2, которая в целях минимизации теплопритоков выполняется тонкостенной из нержавеющей стали. Концевой элемент 3 гильзы-держателя, на котором непосредственно устанавливается охлаждаемый ФЧЭ представляет собой диск из материала с нормированным значением ТКЛР, например, кобальта или инвара. Форма и размеры гильзы-держателя могут варьироваться в зависимости от параметров конкретного ФЧЭ и используемой микрокриогенной машины.

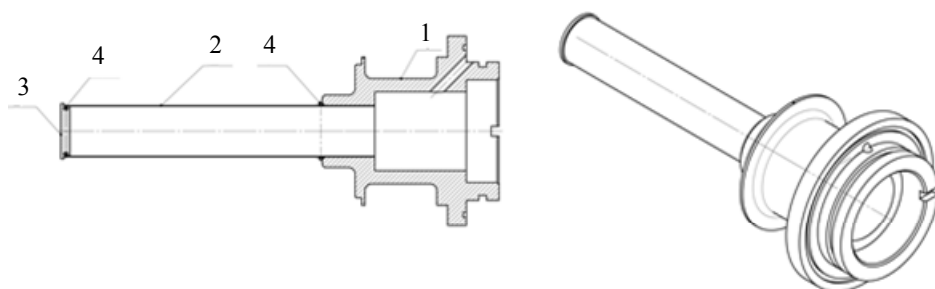


Рис. 1. Конструкция гильзы-держателя: 1 – базовая втулка; 2 – гильза; 3 – концевой элемент; 4 – припой

Одной из важных технологических задач при изготовлении гильз-держателей является обеспечение надёжного соединения элементов гильзы-держателя между собой, гарантирующего выполнение условий герметичности и геометрической стабильности в условиях криогенных температур. Как правило, это может быть достигнуто с применением сварки или пайки. На рис. 1 представлена гильза-держатель, элементы которого соединяются пайкой. Места размещения припоя обозначены на рис. 1 позицией 4.

Для соединения пайкой металлических деталей в производственной практике достаточно часто применяют индукционный нагрев [2], который обеспечивается за счёт возникновения теплового эффекта в соединяемых деталях и припое под действием электромагнитного поля (вихревых токов Фуко).

При этом, в процессе нагрева, если он производится в воздушной атмосфере, неизменно происходит ускоренное окисление поверхностей деталей и припоя, что недопустимо для гильзы-держателя, исходя из специфики её применения, кроме того оно может привести к нарушению герметичности паяного шва.

Специалистами АО «НПО «Орион» в рамках решения задачи изготовления гильз-

держателей проведена отработка создания вакуумплотных паяных соединений способом индукционной пайки, не приводящей к окислению соединяемых деталей.

Для пайки применяется индукционный нагреватель, структурная схема которого представлена на рис. 2.

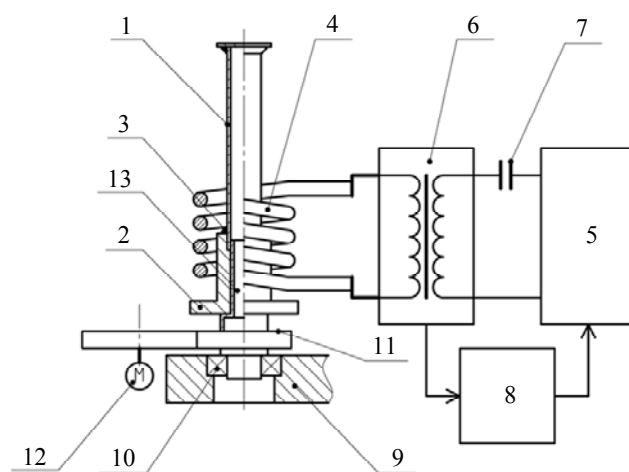


Рис. 2. Схема устройства для индукционной пайки гильз-держателей: 1, 2 – детали гильзы-держателя; 3 – припой; 4 – индуктор; 5 – генератор электрической мощности; 6 – трансформатор; 7 – конденсатор; 8 – автогенератор; 9 – опора; 10 – подшипниковый узел; 11 – поворотная платформа; 12 – привод; 13 – посадочное место

Соединяемые детали гильзы-держателя 1 и 2 и припой 3 помещены в электромагнитное поле, создаваемое индуктором 4. Индуктор 4 подключен к генератору электрической мощности 5 через трансформатор 6. Индуктор 4 совместно с конденсатором 7, включенным последовательно в первичную обмотку трансформатора 6, образуют колебательный LC-контур. В зависимости от индуктивности катушки индуктора 4, ёмкости конденсатора 7, а также от характеристик соединяемых деталей, резонансная частота LC-контура изменяется. Это изменение через автогенератор 8 поддерживает контур в резонансе, изменяя частоту в зависимости от величины индуктивности индуктора 4. Соединяемые детали 1 и 2, имеющие осесимметричную форму, расположены соосно индуктору 4, опора 9 содержит подшипниковый узел 10, в котором установлена вращающаяся платформа 11, вращение платформы 11 обеспечивается приводом 12. На платформе 11 установлено посадочное место 13, которое соосно оси вращения платформы 11. При вращении соединяемых деталей в процессе нагрева погрешности установки соединяемых деталей относительно индуктора оказывают меньшее влияние на равномерность нагрева места соединения.

Обработка индукционной пайки гильз-держателей проводилась в трёх основных направлениях:

- получение паяных соединений в условиях вакуума;
- получение паяных соединений в среде инертного газа;
- получение паяных соединений с использованием защитных составов.

Для обеспечения вакуума индуктор и соединяемые детали помещались в герметичную камеру, из которой откачивался воздух при помощи форвакуумного насоса до достижения остаточного давления не более 1×10^{-3} мм рт. ст. Использование герметичной камеры также позволяет реализовать и второй способ путём нагнетания в неё инертного газа (например, аргона), вытесняя воздух, что позволяет создать инертную газовую среду в области пайки.

Как в вакууме, так и в инертной среде были получены качественные паяные соединения, соответствующие перечисленным выше требованиям. Следует отметить, что одним

из главных преимуществ пайки в условиях вакуума по сравнению с газовой атмосферой является стабильное получение паяного шва без пустот и полостей, что делает соединение вакуумплотным.

Однако использование герметичной камеры оказывается непрактичным для серийного производства, требующего минимального времени проведения операции и минимизации производственных затрат. Дело в том, что при использовании камеры ограничивается доступ к соединяемым деталям в процессе пайки и усложняется визуальный контроль за ходом процесса. Кроме того, создание вакуума или обеспечение газовой среды в камере занимает значительное время и выполняется каждый раз при установке нового комплекта деталей.

Одним из вариантов решения проблемы является осуществление индукционной пайки в среде инертного газа без создания герметичного объёма. В этом случае используется установка, в которой инертный газ подаётся в область формирования паяного шва под давлением. При таком методе, несмотря на удовлетворительное качество получаемого соединения и значительное сокращение времени проведения операции, главным недостатком является повышенный расход инертного газа, удорожающий процесс.

Для серийного производства держателей в АО «НПО «Орион» отработана индукционная пайка в воздушной среде, позволяющий обеспечивать качественное соединение и исключать появление окисной плёнки на поверхностях соединяемых деталей. Для этих целей при проведении пайки используются защитные составы, наносимые на поверхности деталей и препятствующие окислению этих поверхностей и одновременно улучшающие смачивание расплавленного припоя. В качестве таких составов могут использоваться паяльные флюсы определённых марок.

Процесс пайки с использованием защитных составов осуществляется следующим образом. Перед началом пайки для защиты от воздействия окружающей среды и улучшения распространения расплавленного припоя, на поверхности деталей и на припое наносит флюс. При этом, в отличие от обычной практики применения паяльных флюсов, флюсом покрываются все поверхности деталей полно-

стью, а не только участки в зоне пайки. Соединяемые детали могут быть изготовлены из нержавеющей стали, кобальта. При этом возможно соединять детали из разных материалов. Для пайки используется припой, температура плавления которого ниже температуры высокого отпуска сталей. В случае соединения пайкой деталей из перечисленных выше материалов используется серебрено содержащий припой, а в качестве флюса – высокотемпературный паяльный флюс на основе борной кислоты. Затем при помощи индуктора нагревают с заданной скоростью соединяемые детали, припой и флюс до температуры, при которой раствор флюса обладает наилучшим смачиванием – способностью поддерживать контакт с твердой поверхностью за счёт сил межмолекулярного взаимодействия (практика показывает, что при применении флюса значение температуры составляет 420 °С). Осуществляют выдержку деталей при данной температуре, а затем нагревают их до температуры плавления припоя (для рассматриваемого примера 595 – 605 °С). Затем нагрев отключают, после чего детали остывают до комнатной температуры, и остатки флюса удаляются в слабом растворе гидроксида натрия.

Вследствие индукционного нагрева в месте соединения пайкой деталей происходит окисление поверхности втулки и трубки держателя, что может негативно сказаться при вакуумировании держателя в составе криостата. Для удаления образующейся оксидной плёнки на поверхности втулки применяется промывка в горячем водном растворе динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты, принцип работы которой основан на извлечении катионов нерастворимых солей железа, входящих в состав оксидной плёнки, в степени окисления +2, +3 и замещением их катионами натрия, практически все соли которого растворимы в воде. Поскольку динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты не является окислителем, взаимодействие с металлом в нулевой степени окисления не происходит. Образующиеся на поверхности держателя комплексные растворимые соли железа легко удаляются промывкой в горячей воде.

Преимуществом данного метода является возможность проведения пайки на открытом

воздухе без использования камеры. Это также даёт возможность деталям быстрее остывать после нагрева и сокращает время проведения операции. Ускорить процесс остывания можно, применив принудительный обдув. За счёт удобства доступа к соединяемым деталям и индуктору можно обеспечить более точное выставление деталей относительно индуктора.

По результатам исследований и разработки методов индукционной пайки был получен патент [4] на способ индукционной пайки.

Проведённая работа позволила обеспечить устойчивое серийное изготовление гильз-держателей. Внешний вид держателей серийного выпуска представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид гильз-держателей серийного выпуска

Одним из важнейших требований к гильзам-держателям является обеспечение герметичности паяного шва. Проверка герметичности осуществляется с использованием специального приспособления, устройство которого показано на рис. 4. Приспособление воспроизводит условия работы держателя в составе МКС и вакуумного криостата при повышенном давлении гелия (20–50 кгс/см²) внутри гильзы-держателя. Таким образом, контролируется именно утечка гелия из держателя, что характерно для его работы в со-

ставе микрокриогенной системы, а не натекание в держатель, как при традиционном методе проверки с использованием течеискателя.

На рис. 4 показаны: проверяемая гильза-держателя 1, который герметично соединяется с корпусом 6 при помощи уплотнительного кольца 3 (в качестве материала-уплотнителя использована проволока припоя) и фланца 8. Через заправочный клапан 4 в корпусе 6, уплотняемым диском из припоя, производят заправку внутренней полости гильзы-

держателя газообразным гелием с заданным избыточным давлением. Далее гильзу-держателя стыкуют со втулкой 9 через уплотнительное фторкаучуковое кольцо 2. Втулка с двух сторон имеет фланцы, один из которых 11 (стандарта КФ) фиксируется хомутом 5 на корпусе 6, обеспечивая прижимное усилие со стороны втулки 9 на проверяемую гильзу-держателя 1; другой фланец 7 (стандарта КФ) аналогичным образом соединяется с гелиевым течеискателем.

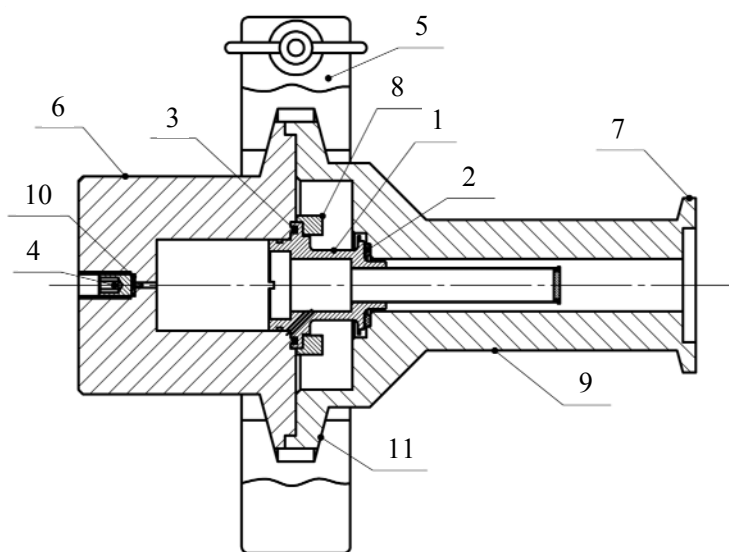


Рис. 4. Конструкция приспособления для проверки герметичности: 1 – проверяемая гильза-держателя; 2, 3 – уплотнительные кольца; 4 – клапан; 5 – хомут; 6 – корпус; 7 – присоединительный фланец КФ; 8 – фланец; 9 – втулка; 10 – заправочное отверстие; 11 – фланец КФ

Такая конструкция позволяет производить поиск течи с большей чувствительностью. Регистрируемая скорость утечки гелия составляет 5×10^{-13} Па·м³/с, что соответствует предельной чувствительности используемого гелиевого течеискателя.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволили обеспечить устойчивый серийный выпуск держателей вакуумных криостатируемых корпусов с высокими эксплуатационными характеристиками. При проверке герме-

тичности подтверждено, что скорость утечки газа (гелия) из рабочей полости держателя составляет не более 5×10^{-13} Па·м³/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новотельнов В. Н. и др. Криогенные машины. – Спб.: Политехника, 1991.
2. Вологдин В. В. и др. Индукционная пайка. – Л.: Машиностроение, 1989.
3. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Банников М. В., Кортаев Е. Д., Шаров А. А. Способ индукционной пайки. Патент RU 2824969 РФ С1 В23К 1/002, опублик. 19.08.2024. Бюл. № 23.

Investigation of vacuum-tight cooled assemblies for FPAs

E. D. Korotaev^{1,*}, D. I. Guryev¹, A. I. Guryev¹, A. A. Zinkovsky¹, D. I. Morozov¹
and A. A. Sharov^{1,2}

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

* E-mail: korotaevrus@gmail.com

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064 Russia

Received 27.10.2025; revised 10.11.2025; accepted 11.12.2025

An investigation of the properties of vacuum-tight brazed joints produced by induction brazing for use in components of vacuum cryogenic assemblies of cooled focal-plane arrays (FPAs), specifically in their cold fingers. The specific design features and operational conditions of these joints in micro-cryogenic FPA cooling systems were taken into account. To monitor the helium leak rate, dedicated tooling was developed, which significantly enhanced the ultimate sensitivity of the helium leak detector. The measured helium leak rate of the fabricated assembly samples is 5×10^{-13} Pa·m³/s.

Keywords: induction brazing; vacuum cryogenic housing; focal-plane array.

REFERENCES

1. Novotelnov V. N. et al., Cryogenic machines. St. Petersburg, Polytechnica, 1991.
2. Vologdin V. V. et al. Induction soldering. Leningrad, Mashinostroenie, 1989.
3. Lashko S. V. and Lashko N. F. Soldering of metals. Moscow, Mashinostroenie, 1988.
4. Bannikov M. V., Korotaev E. D. and Sharov A. A. Induction soldering method. Patent RU 2824969. 2024.

Об авторах

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: korotaevrus@gmail.com SPIN-код: 7229-7672

Гурьев Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: ptokrs@mail.ru

Гурьев Андрей Игоревич, инженер-испытатель, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: wwwesche@gmail.com

Зиньковский Александр Александров, начальник Центра технологического сопровождения и разработки технологии (ЦТСИРТ), АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: Rabota2114@yandex.ru

Морозов Дмитрий Игоревич, инженер-технолог 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: morozovdi1995@mail.ru

Шаров Александр Александрович, к.т.н., зам. начальника Центра микрофотоэлектроники, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) (105064, Россия, Москва, Гороховский пер., 4).

УДК 621.3.015.333, 57.085.23, 577.352
EDN: EYGMQO

PACS: 47.65.-d

Исследование эффективности канальной системы охлаждения воздуха с использованием электрогидродинамических потоков© В. В. Воеводин^{1,2,*}, Я. Е. Жарков¹, А. С. Кириллов¹, О. И. Коржова¹, С. И. Мошкунов¹,
В. Ю. Хомич¹¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191181 Россия

* E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, 630090 РоссияСтатья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 19.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.4.3

Проведено расчетно-экспериментальное исследование модельной канальной системы охлаждения с использованием принудительной конвекции воздуха и вспомогательных электрогидродинамических (ЭГД) потоков, создаваемых коронным разрядом, при варьировании геометрических параметров канала и мощности устройств для создания охлаждающих потоков. Для рассматриваемых условий показана область эффективного использования ЭГД-потоков и выявлена нелинейная зависимость температуры стенок канала от мощности создающего ЭГД-поток коронного разряда.

Ключевые слова: электрогидродинамика (ЭГД); электрический ветер; плазменный турбулизатор; канальные системы охлаждения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-69-74

Введение

Современная тенденция развития электротехники характеризуется неуклонным ростом быстродействия электронных компонентов при их постоянной миниатюризации. Это закономерно приводит к значительному увеличению плотности тепловыделения с поверхности активных элементов. Для отвода тепла на сегодняшний день применяется широкий спектр систем охлаждения (СО): основанных на калориметрическом и термоэлектрическом эффектах, применяющих тепло-массоперенос на основе электрогидродинамического (ЭГД) потока, жидкостных и т. д. [1, 2]. Характерным случаем для многих СО с принудительной конвекцией является использование каналов, через которые прокачивается охлаждающий газ. С целью управления потоком в канале и создания перемешивающих возмущений для интенсификации теплообмена нагреваемых поверхностей с газом мо-

гут применяться специальные вставки в поток [3], которые при этом создают дополнительное аэродинамическое сопротивление. В последние годы интерес исследователей направлен к возможности использования в качестве генератора вторичного потока так называемого «электрического ветра» или электрогидродинамического потока [4–6]. ЭГД-поток создается в газовом разряде, и вызывается соударением образованных заряженных частиц с молекулами газа в сильном электрическом поле. К числу преимуществ его использования относятся отсутствие движущихся механических частей, относительно низкое аэродинамическое сопротивление создающих разряд электродов, а также возможность создания распределенных систем охлаждения с электродами произвольной формы, которые могут быть интегрированы в труднодоступные зоны СО. Перспективность их применения в СО была неоднократно продемонстрирована как экспериментально на открытом

воздухе [7], так и с помощью моделирования в каналах различной формы [8, 9]. В то же время, экспериментальных данных о работе подобной комбинированной СО в известной литературе мало.

Целью данной работы являлось экспериментальное проведение исследований эффективности охлаждения теплонагруженных элементов в канале как самостоятельным ЭГД-поток, создаваемым коронным разрядом (КР), так и совместно с принудительной конвекцией, создаваемой вентилятором.

Описание установки

В качестве модельной СО была использована конструкция (рис. 1), представлявшая собой горизонтальный сборный канал из пластика ABS. Размеры конструкции составляли $115 \times 55 \times 2d$ мм³, где d – расстояние от пластин до точек крепления электродов для создания ЭГД-потоков. Принудительная конвекция в канале создавалась центробежным вентилятором через спроектированный ламинаризатор с регулируемой мощностью (0,3–1,2 Вт: 1–3 м/с в канале, расход газа $m = 0–2$ г/с). В качестве внутренних стенок канала использовались заземлённые теплоизолированные пластины из полированного алюминия. Нагрев пластин осуществлялся с торцов при помощи плёночных керамических резисторов, мощность нагрева варьировалась в диапазоне от 10 до 30 Вт. Для контроля температуры пластин использовались термопары типа К, закреплённые в их центре, подключаемые к прибору CENTER 303 (погрешность $\pm 0,7$ °С).

Для создания ЭГД-потока посередине канала были натянуты поперечно медные проволоки диаметром 50 мкм, подключенные к источнику стабилизированного высокого постоянного напряжения отрицательной полярности Spellman SL20*2000, ток в его цепи измерялся мультиметром Fluke 17B+, что позволяло оценить среднюю мощность КР $P_{кор}$. Расстояния проволоки-пластина (d) и проволока-проволока (L) могло варьироваться в диапазоне 6–10 мм.

Питание вентилятора и нагревательных резисторов осуществлялось с помощью стабилизированных регулируемых источников постоянного напряжения, мощность нагрева подбиралась для поддержания температуры пластин $T_0 = 100$ °С по их центру в условиях естественной конвекции без ЭГД-потока. Температура нагнетаемого в канал воздуха составляла 22 °С, влажность 40 %.

В рамках экспериментов регистрировался перепад относительно установившихся значений температуры $\Delta T_{кор} = T_{вент} - T_{комб}$, определяемый как разница между температурой пластин при принудительной конвекции $T_{вент}$ и при ее комбинации с ЭГД-потоком $T_{комб}$. Регистрация проводилась при различных сочетаниях мощности коронного разряда $P_{кор}$ и расхода m вентилятора, а также различной ширине канала d . Для определения эффективности применения ЭГД потока рассчитывалось отношение перепада температур к потребляемой КР электрической мощности $\Delta T_{кор}/P_{кор}$.

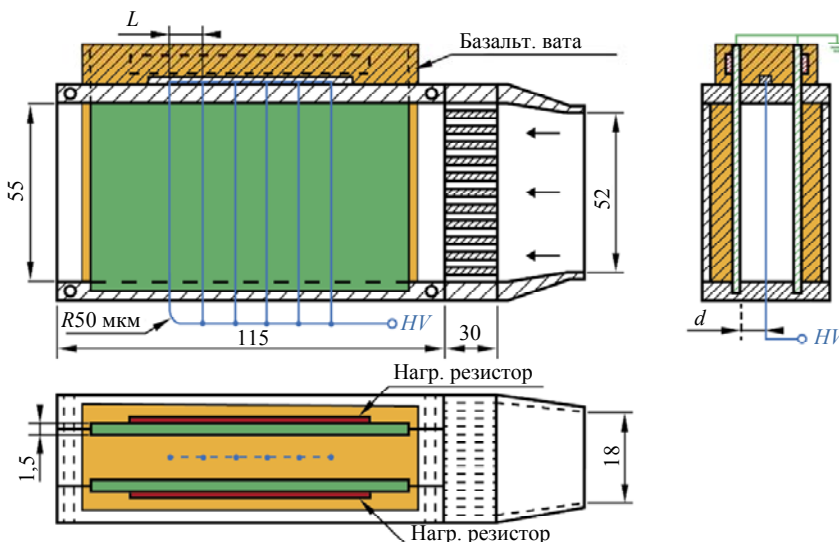


Рис. 1. Схема экспериментального канала охлаждения с принудительной конвекцией и возможностью создания ЭГД-потоков (красным обозначены нагревательные резисторы, зеленым – пластины-аноды, синим – проволоки-катоды)

Математическая модель и результаты расчетов

С целью объяснения получаемых результатов в пакете программ для численного моделирования методом конечных элементов была разработана модель канала с аналогичной используемой в эксперименте геометрией. Модель реализует итерационный сопряжённый расчёт КР и теплогидродинамического поля в воздухе. На каждой итерации сначала решается задача газодинамики в приближении RANS с моделью турбулентности $k-\omega$ [10] и учётом конвективного теплообмена между твёрдыми и газовыми областями; затем на основе полученного поля температуры и скорости рассчитывается распределение электрического потенциала (уравнение Пуассона) и плотности пространственного заряда (уравнение конвекции-диффузии для одного типа носителей). Инжекция заряда на поверхности проводников активируется при превышении локальной напряжённости поля над порогом зажигания, определяемым по формуле Пика [11], и реализуется через слабую форму граничного условия. Для стабилизации итерационного процесса превышение поля фильтруется по аналогии с RC-цепочкой, что подавляет осцилляции при переходе через порог. Полученное распределение объёмного заряда и электрического поля используется для вычисления электродинамической силы, которая вводится в уравнение движения как объёмный источник на следующей итерации, обеспечивая самосогласованность решения.

Расчётная модель, отражённая на схеме на рис. 2, представляет собой двухмерную геометрию, включающую воздушный канал и прилегающую нагреваемую пластину из алюминия. Для снижения вычислительной сложности задача решалась на половине симметричной системы с применением условия симметрии по центральной оси канала. На входной границе задавалась величина расхода газа \dot{m} , которая определялась в соответствии с характеристикой используемого вентилятора, при его постоянной температуре, равной 293 К. На выходе из системы, обозначенного как «Сток», устанавливалось нулевое статическое давление и условие уноса тепла. В твёрдой области (алюминиевой пластине) решалось уравнение теплопроводности с учётом интегральной подводимой мощности $P_{\text{нагр}}$; на наружных поверхностях пластины, включая участки вне канала, применялось условие термической изоляции. Гидродинамические граничные условия на всех твёрдых стенках задавались как условия прилипания в низкорейнольдсовом приближении, обеспечивая корректное разрешение вязкого подслоя. Потенциал $\phi = V_{\text{var}}$ на проводниках варьировался для достижения заданной мощности КР в системе, в соответствии с получаемыми в эксперименте. Инжекция заряда на поверхности проводов активировалась при достижении локальной напряжённости электрического поля порогового значения, определяемого по формуле Пика с параметрами $E_0 = 30$ кВ/см и $\gamma = 0,03$ [11].

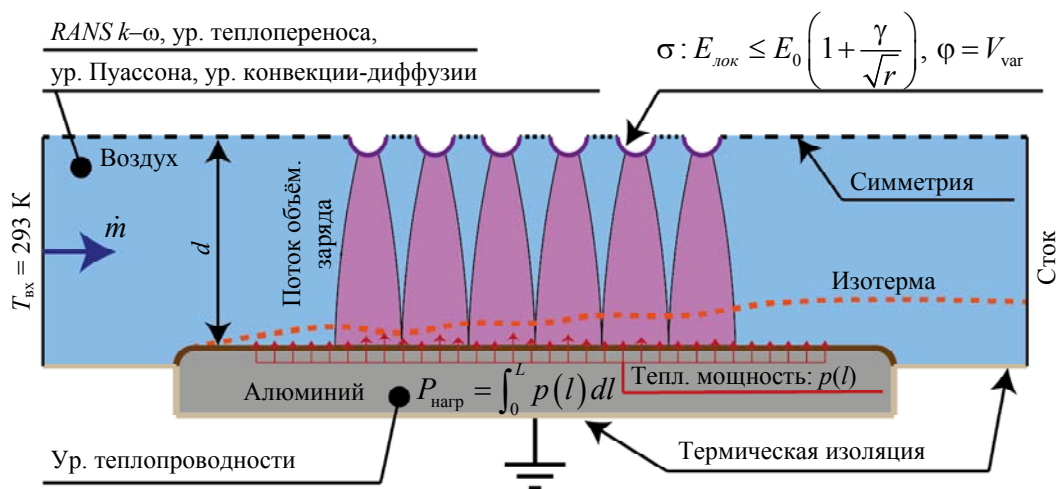


Рис. 2. Схематическое изображение расчётной области с воздушным каналом, нагреваемой алюминиевой пластиной и системой коронирующих электродов

Ключевые результаты параметрического исследования приведены на рис. 3. Показано, что увеличению добавочной температуры охлаждения $\Delta T_{\text{кор}}$ в зависимости от мощности коронного разряда соответствует квадратичная зависимость, что согласуется с экспериментально зарегистрированной вольт-амперной характеристикой разряда.

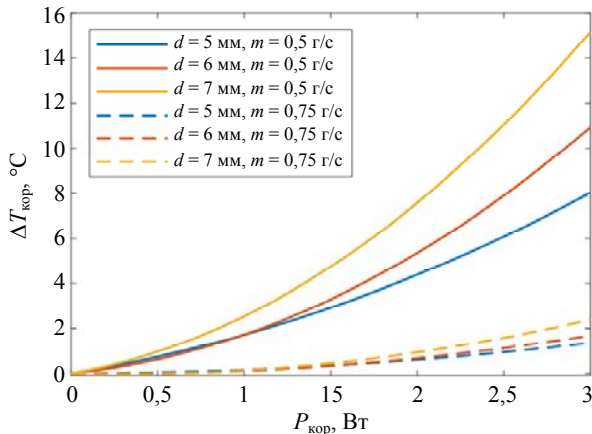


Рис. 3. Расчетная зависимость перепада температуры $\Delta T_{\text{кор}}$ охлаждаемых пластин от мощности коронного разряда при различных ширине канала d и объемном расходе m

Как видно из зависимостей на рис. 3, определяющим параметром является скорость потока. При массовом расходе 0,75 г/с энергетический вклад объемных сил в общую мощность массопереноса недостаточен, чтобы оказать существенное влияние на распределение температуры, и величина $\Delta T_{\text{кор}}$ остаётся относительно малой. В случае меньшего расхода 0,5 г/с для всех исследованных расстояний между проводом и алюминиевой пластиной (5, 6 и 7 мм) наблюдается выраженное увеличение добавочного охлаждения (рост $\Delta T_{\text{кор}}$): при увеличении зазора канал расширяется, средняя скорость снижается, и эффективность охлаждения возрастает.

Полученные в расчете пространственные распределения полей температур и скоростей также показали, что в рассмотренном диапазоне параметров «запирающий эффект» (*blocking effect*) [4] практически не проявляется: формируемые разрядом вихревые структуры не приводят к заметному нарушению сквозного течения.

Экспериментальные результаты

На рис. 4,а показана зависимость установившегося перепада температуры $\Delta T_{\text{кор}}$ после зажигания коронного разряда при его различной мощности $P_{\text{кор}}$ для фиксированного объемного расхода вентилятора $m = 0,8$ г/с. Можно отметить, что в исследуемых условиях ЭГД поток демонстрирует наибольшую эффективность в диапазоне малых значений мощности КР (до 0,5 Вт), что согласуется с расчетными результатами. В дальнейшем перепад температуры выходит в насыщение и повышение мощности КР становится нецелесообразным.

Расчитанное по всему массиву данных максимальное соотношение перепада температуры при охлаждении ЭГД-поток к затрачиваемой на его создание мощности при разных расходах принудительной конвекции m и ширине канала d (рис. 4,б) позволяет подтвердить выводы о необходимости обеспечения объемных сил ЭГД-потока, достаточных для изменения процессов тепло- и массопереноса вблизи нагреваемых поверхностей, что позволит наиболее эффективно интенсифицировать теплообмен. При расходе воздуха порядка 0,8 г/с удается достичь снижения температуры в 30–40 °С на 1 Вт вложенной в КР электрической мощности.

В то же время, наблюдается ряд противоречий с результатами проведенного моделирования. Ширина канала d оказывает относительно слабое и бессистемное влияние на регистрируемые в эксперименте значения $\Delta T_{\text{кор}}$ при фиксированных расходах воздуха m , а также в расчетах не воспроизводится эффект насыщения $\Delta T_{\text{кор}}$ с увеличением $P_{\text{кор}}$. Можно предположить, что это может быть связано как с процессами нагрева газа интенсивным КР [12], так и возникновением условий для образования застойных областей вблизи нагреваемых поверхностей [4]. Это предполагает необходимость более детального воспроизведения геометрических особенностей канала, работы нагнетающего вентилятора и условий горения КР.

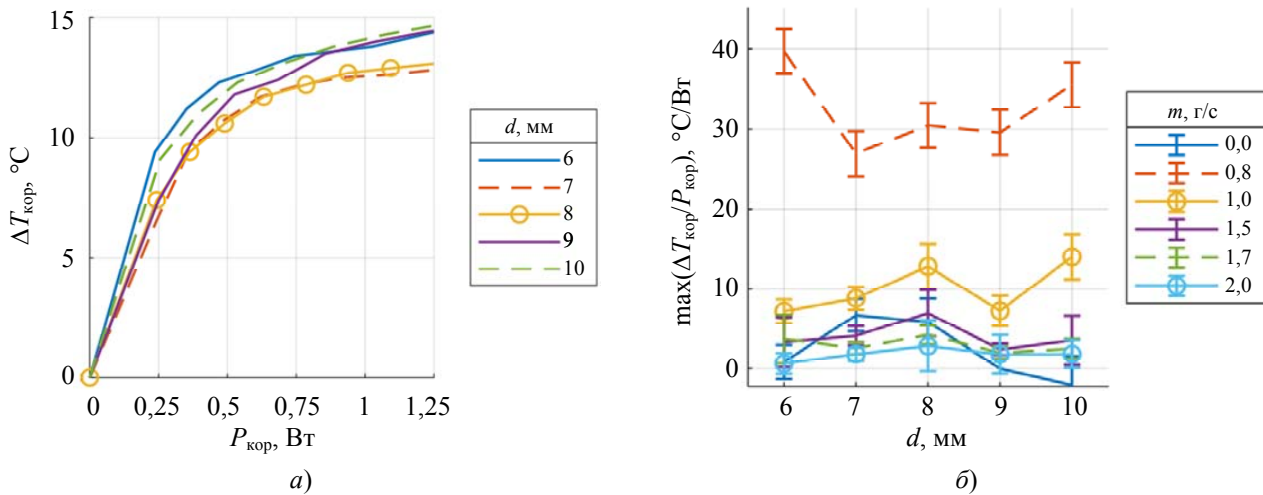


Рис. 4. Зависимость перепада температуры ΔT_{kop} от мощности КР P_{kop} для различных значений ширины канала d при фиксированном расходе вентилятора $m = 0,8$ г/с (а) и максимального соотношения $\Delta T_{kop}/P_{kop}$ при различных d и m (б)

Выводы

Проведенное расчетное исследование эффективности охлаждения с помощью ЭГД-потоков в прямоугольном канале при наличии принудительной конвекции воздуха показало, что применение ЭГД-потоков оказывается энергетически эффективным при соблюдении условий достаточного энергозатрата создаваемых объемных сил для модификации основного потока. Экспериментальные результаты показали сложную зависимость снижения температуры стенок канала от его геометрических параметров и мощности ЭГД-потока, что может быть связано с процессами нагрева воздуха в разряде или возникновения «запирающего эффекта». Полученные данные будут использованы в рамках дальнейшей разработки устройства комбинированного охлаждения с использованием ЭГД-потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям

научно-технологического развития, договор № 075-15-2024-543).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maria C. et al. / Appl. Therm. Eng. 2023. Vol. 227. P. 120427.
2. Iranshahi K. et al. / International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 232. P. 125895.
3. Jadhao R. R., Chitragar P., Kamble D. / Phys. Scr. 2025. Vol. 100. № 3. P. 32002.
4. Wang Y. B. et al. / Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. № 11.
5. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. / Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 6. С. 653–666.
6. Мошкунев С. И. и др. / Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32–38.
7. Воеводин В. В. и др. / Труды XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск, 2024. С. 25.
8. Ming G. et al. / Int. Commun. Heat Mass Transf. 2024. Vol. 153. P. 107344.
9. Reza B. L., Majid M. / J. Electrostat. 2012. Vol. 70. № 1. P. 31–42.
10. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. – La Cañada: DCW Industries, 1998.
11. Peek F. W. Jr. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. – New York: McGraw-Hill Book Company, inc., 1915.
12. Jones J. E. / J. Electrostat. 2008. Vol. 66. № 1–2. P. 84–93.

Performance study of a channel cooling system with EHD flows

V. V. Voevodin^{1,2,*}, Ya. E. Zharkov¹, A. S. Kirillov¹, O. I. Korzhova¹, S. I. Moshkunov¹
and V. U. Khomich¹

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 191181 Russia

* E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru

² Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia

Received 6.11.2025; revised 19.11.2025; accepted 11.12.2025

A combined numerical and experimental study was conducted on a model channel cooling system utilizing forced air convection and auxiliary electrohydrodynamic (EHD) flows generated by a corona discharge. Geometric parameters of the channel and the power supplied to the devices generating the cooling flows were varied. For the given conditions, the range of effective use of EHD flows was demonstrated, and a non-linear relationship between the channel wall temperature and the power of the corona discharge generating the EHD flow was revealed.

Keywords: Electrohydrodynamics (EHD); Electric wind; Plasma turbulator; Channel cooling systems.

REFERENCES

1. Maria C. et al., Applied Thermal Engineering **227**, 120427 (2023).
2. Iranshahi K. et al., International Journal of Heat and Mass Transfer **232**, 125895 (2024).
3. Jadhao R. R., Chitragar P. and Kamble D., Physica Scripta **100** (3), 32002 (2025).
4. Wang Y. B. et al., Physics of Fluids **35** (11), [article number] (2023).
5. Khomich V. Yu. and Yamshchikov V. A., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (6), 653–666 (2017).
6. Moshkunov S. I. et al., Applied Physics, № 6, 32–38 (2011) [in Russian].
7. Voevodin V. V. et al. In Proceedings of the XII All-Russian Conference with International Participation "Fuel Combustion: Theory, Experiment, Applications", Novosibirsk, 2024, pp. 25.
8. Ming G. et al., International Communications in Heat and Mass Transfer **153**, 107344 (2024).
9. Reza B. L. and Majid M., Journal of Electrostatics **70** (1), 31–42 (2012).
10. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. La Cañada, DCW Industries 1998.
11. Peek F. W. Jr. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. New York, McGraw-Hill Book Company, inc., 1915.
12. Jones J. E., Journal of Electrostatics **66** (1–2), 84–93 (2008).

Об авторах

Воеводин Вадим Вадимович, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А); Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1). E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru SPIN-код: 1049-1177, AuthorID: 1013023

Жарков Ярослав Евгеньевич, научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: yarik77794@mail.ru SPIN-код: 1619-1493, AuthorID: 1142014

Кириллов Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: caduceus.kas@gmail.com SPIN-код: 3924-1556, AuthorID: 1193477

Коржова Ольга Игоревна, младший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: oikorzhova@ieeras.ru SPIN-код: 1627-1919, AuthorID: 1260716

Мошкунов Сергей Игоревич, д.т.н., чл.-корр. РАН, руководитель научного направления «Импульсная техника и электрофизика», Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru SPIN-код: 4103-8401, AuthorID: 161510

Хомич Владислав Юрьевич, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: khomich@ras.ru SPIN-код: 6924-8941, AuthorID: 167051

УДК 621.396, 538.9, 681.7
EDN: XXPZFT

PACS: 85.30 Dw, 84.40.Ba

Опτικο-акустические приемники со свободно подвешенной мембраной

© П. Е. Котляр

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, 630090 Россия
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su**Статья поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 25.09.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6*

Рассмотрена эволюция основного узла оптико-акустического преобразователя-датчика давления. Показан последовательный переход от мембранного датчика давления с жестким закреплением мембраны по контуру, приводящему к неконтролируемым механическим напряжениям и изменениям основных метрологических параметров к кантилеверным датчикам давления, у которых закрепляется лишь одна из сторон, что приводит к увеличению чувствительности более чем в 140 раз. Показано, что путем химического травления на мембранной фольге четырех Г-образных узких сквозных пазов в одном технологическом цикле могут быть сформированы полностью свободный от деформаций центральный мембранный элемент квадратной формы и четырехточечный угловой эластичный подвес в виде четырех узких упругих сенсорных элементов, расположенных вдоль боковых сторон недеформируемого мембранного элемента жестко закрепленных на опорном контуре.

Ключевые слова: чувствительный элемент; мембрана; кантилевер; эластичная подвеска.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-75-81

Введение

Мембранные датчики давления являются одним из основных элементов конструкции оптико-акустических приемников излучения в значительной степени определяющим метрологические характеристики устройства [1, 2]. Мембранные датчики давления функционируют за счёт деформации упругой мембраны, которая реагирует на изменения внешнего давления. Мембранно-емкостной датчик может очень точно измерять давление в диапазоне от 3,5 до 4 порядков с нижним пределом до 10^{-5} мбар и погрешностью $\pm(0,15-0,35)$. Показания мембранно-емкостного датчика не зависят от рода газа, заполняющего расширительную и компенсационную камеры. Разработанные фирмой «Knowles» (Иллинойс, США) на собственной технологической платформе CMOS / MEMS, запущенной в 2002 году, микрофоны серии SiSonic™ на основе кремния уже в четвёртом поколении продают-

ся по всему миру в объемах свыше 1 млрд единиц в год.

Мембраны

Чувствительность ОАП определяется как минимальное значение мощности излучения на входе, допускающее уверенное выделение сигнала на уровне фона и собственных шумов преобразователя, и может быть вычислена как произведение парциальных чувствительностей фототермического S_{I-T} , термоакустического S_{T-P} , акустомеханического $S_{P-\delta}$ и электромеханического $S_{\delta-U}$ звеньев преобразования:

$$S_{\text{ОАП}} = S_{I-T} S_{T-P} S_{P-\delta} S_{\delta-U} = \frac{\Delta T}{\Delta I} \frac{\Delta P}{\Delta T} \frac{\Delta \delta}{\Delta P} \frac{\Delta U}{\Delta \delta}.$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что лимитирующим зве-

ном в цепи преобразований является акусто-механическое $S_{P-\delta}$, реализуемое как датчик давления.

Чувствительность δ (величина прогиба центра плоской мембраны, жестко закреплённой по контуру) при малых перемещениях под действием давления P выражается формулой [3]:

$$\delta = \frac{3(1-\mu^2)PR^4}{16Rh^3},$$

где R – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h – толщина мембраны, E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала мембраны, соответственно. В существующих конструкциях ОАП прогиб мембран при пороговых значениях измеряемых потоков излучения составляет несколько ангстрем.

Физико-механические свойства мембран в сильной степени зависят от материала, структуры, свойств поверхности и технологии. Из приведенного выражения следует, что чувствительность мембранного преобразователя определяется физическими свойствами материала мембраны (E , μ) и конструктивными параметрами (R , h). Сверхлинейные зависимости чувствительности R^4 , h^3 обуславливают сверхчувствительность мембранных датчиков к изменению параметров устройства, что является трудно преодолимым препятствием для создания матричных устройств большой размерности.

Материал для изготовления мембран

Эволюция конструкций проходила в направлении последовательного перехода от металлических мембран из дюралюминия, серебра, никеля, титана, легированных титановых сплавов ВТ16 или ВТ35 толщиной 40–100 нм, к биморфным полимерным мембранам, покрытым отражающим слоем серебра или сурьмы толщиной порядка 100 А [4]. При создании мембранных устройств с использованием МЭМС технологий, широко применяемых при микроминиатюризации, обычно используются: кремний Si-мембрана,

которая формируется травлением материала подложки до толщин 2–5 мкм; двуокись кремния SiO_2 , нитрид кремния Si_3N_4 , карбид кремния SiC , углерод C , нитрид алюминия AlN , нитрид бора BN , получаемые как из газовой фазы, так и ионно-химическими методами осаждения. В качестве базового материала сверхтонких мембран используют нитрид кремния (Si_3N_4) — один из основных материалов микроэлектроники с хорошо отработанной технологией получения и известными свойствами [5, 6].

Перспективными материалами для создания мембран являются каптон и графен. **Каптон** – плёночный полиимид, используемый в различных космических инструментах, разработанный компанией DuPont в 1960-х годах. Каптон является эластичным диэлектриком, стабильным в широком диапазоне температур от -273 до $+400$ °С, что позволяет решить проблему охрупчивания металлических и полимерных мембран при низких температурах. Используется для изготовления гибких печатных плат и внешних слоёв скаффандров [7].

Графен. В известных работах по созданию нового поколения оптико-акустических преобразователей [8, 9] основными факторами, обуславливающими выбор однослойного графена (SLG) для изготовления гибкой мембраны, были предельно малая толщина и предельно высокие эластичность и механическая прочность материала, гарантировавшие значительное повышение чувствительности. Кроме того, применение мембран из однослойного графена даёт возможность одновременно с рекордным повышением чувствительности практически полностью устранить такие недостатки, традиционно присущие преобразователям, как высокая восприимчивость к акустическим и вибрационным шумам, обеспечить увеличение быстродействия, расширение динамического диапазона и возможность работы не только при комнатных температурах, но и при предельно глубоком охлаждении.

Многочисленные эксперименты по выбору формы мембран преследовали не увеличение чувствительности, а в первую очередь получение необходимой частотной характеристики.

При исследовании возможностей повышения чувствительности оптико-акустических преобразователей с жестко закрепленными по периметру мембранами различных геометрических форм (квадратной, круглой и прямоугольной) установлено, что использование мембраны круглой формы обеспечивает максимальные изменения емкости чувствительного элемента при воздействии давления по сравнению с их изменениями в чувствительных элементах с мембранами других геометрических форм [10].

Проблемные технологические вопросы, которые полностью не преодолены до настоящего времени, связаны с плохо контролируемые механическими напряжениями, возникающими при жестком закреплении мембран, и сложностью контроля толщины травления сверхтонких (порядка 1 мкм и менее) мембран в МЭМС технологиях, приводящие к индивидуальной калибровке измерительных датчиков давления.

Кантилевер

Использование тонкой отражающей пленки, жестко закрепленной по одной стороне, в обычной фотоакустической ячейке вместо классической гибкой мембраны впервые было предложено в работе de Paula [11]. Упругая консоль (кантилевер), как прецизионный микродинамометр с порогом в 1 пико-ньютон, впервые была применена в атомно-силовом микроскопе в 1982 году.

Кантилевер представляет собой тонкую упругую пластину П-образной формы длиной α , шириной b ($b < \alpha$) и толщиной h ($h \ll \alpha, b$) жестко закрепленную узкой стороной b . Геометрия кантилевера определяет его жесткость, которая изменяется в широких пределах. Коэффициент жесткости кантилевера $K = Ebh^3/4\alpha^3$, где E – модуль Юнга материала кантилевера, b – ширина, h – толщина, и α – длина прямоугольного кантилевера. Коэффициент жесткости кантилевера, в значительной мере определяющий чувствительность устройства, может варьировать в очень широких пределах ($10^{-4} \div 10$ Н/м).

Основное свойство кантилевера – отклонение под действием приложенной силы. Основной характеристикой кантилевера явля-

ется его упругая постоянная. Чувствительный элемент кантилеверного датчика давления ОАП, представленный на рис. 1 конструктивно отличается от кантилеверов, применяемых в атомно-силовой микроскопии [12]. Он состоит из подложки, полностью перекрывающей акустическую апертуру ОАП, в которой сформирован подвижный консольный элемент, отделенный от подложки с трех сторон узким микрометровым сквозным пазом. Для оптической системы считывания на сторону кантилевера, обращенную в компенсационную камеру наносится отражающее покрытие: (платина, золото, алюминий).

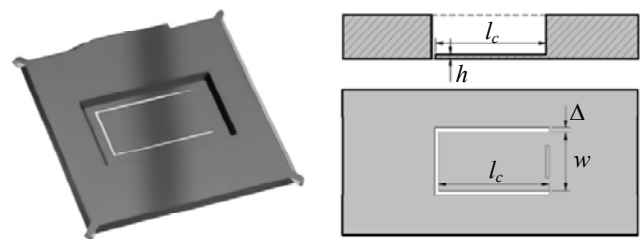


Рис. 1. Фотография и схематический чертеж структуры кантилевера ОАП по [13]

Связь конечного прогиба δ консоли с приложенным напряжением P определяется формулой Стоуни: $\delta = \frac{3P(1-\mu)}{E} \left(\frac{L_c}{h} \right)^2$, где E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала консоли, соответственно; L_c – длина балки; h – толщина балки кантилевера.

Жесткость кантилевера определяется выражением $k = \frac{Ewh^3}{4L_c^3}$, где w – ширина кантилевера.

Максимальный прогиб такой балки под действием равномерно распределенной нагрузки $\delta_{\max} = \frac{PL_c^4}{8EI}$ и максимальный угол

прогиба $\theta_{\max} = \frac{PL_c^3}{6EI}$, где I момент инерции

$$I = \frac{wh^3}{12}. \text{ Тогда } \delta_{\max} = \frac{3PL_c^4}{2Ewh^3} \text{ и } \theta_{\max} = \frac{2PL_c^3}{Ewh^3}.$$

$$\text{Прогиб кантилевера } \delta_L = \frac{PL^2}{12EI} + \left[2L_cL - 3L_c^2 - \frac{L^2}{2} \right].$$

Теоретическая оценка чувствительности классической жестко закрепленной круглой мембраны и прямоугольного кантилевера равной площади показала, что прогиб свободного конца кантилевера превышает прогиб центра круглой мембраны в 140,6 раз [13]. Экспериментальные исследования [14] показали, что для ячеек с простым микрофоном, дифференциальным микрофоном и кантилеверным датчиком давления, прогиб которых измерялся с помощью лазерного интерферометра, значения чувствительности составляют $3,1 \times 10^{-7}$, $1,7 \times 10^{-7}$ и $2,2 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ соответственно, что находится в хорошем соответствии с теоретической оценкой.

Жесткость кантилевера $k = \frac{Ewh^3}{4L_c^3}$ обычно

на 2 или 3 порядка меньше, чем у мембраны и перемещение конца кантилевера может составлять десятки микрометров без каких-либо нелинейных или ограничивающих эффектов. Столь значительное повышение чувствительности обусловлено принципиальным отличием поведения пластин (преобладают изгибные деформации) от мембран (преобладают деформации растяжения) при линейных и нелинейных деформациях.

В настоящее время в разработках кантилеверных микромеханических устройств лидируют исследовательские группы Стенфордского университета в которых созданы кантилеверы с жесткостью 10^{-5} Н/м , регистрирующие силы до 10^{-18} Н , и кантилеверы с временем механического отклика 90 нс [15].

В расчетном плане [16] кантилевер рассматривается как жестко закрепленная консольная балка с конструктивной длиной L_c шириной w и толщиной h , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой P (см. рис. 2).

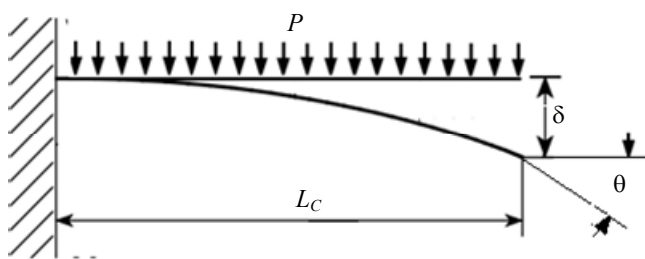


Рис. 2. Расчетная схема консольной балки под действием равномерно распределенной нагрузки

Мембрана со свободным подвесом

Для преодоления основного недостатка классических мембранных датчиков давления – неконтролируемых механических напряжений, возникающих в мембране при её жестком закреплении, увеличения чувствительности и расширения динамического диапазона предложен прецизионный датчик давления для ОАП, который выполнен на основе квадратного проводящего мембранного элемента, свободно подвешенного в четырех точках с помощью упругих сенсорных элементов, неподвижно закрепленных на опорном контуре с емкостным датчиком перемещения мембранного элемента.

Структурная схема оптико-акустического приемника инфракрасного и ТГц излучения со свободно подвешенной мембраной представлена на рис. 3, включает в себя цилиндрический корпус, который содержит систему пневматически связанных и наполненных гелием, при низком давлении, расширительной камеры и компенсационной камеры, при этом один торец расширительной камеры является входным окном, выполненным с просветляющим покрытием, внутри расширительной камеры параллельно входному окну располагается коллодиевая пленка, с нанесенным на нее, и термически развязанным от стенок расширительной камеры металлическим поглощающим элементом в виде тонкой пленки металлической пленки. Расширительная камера отделена от компенсационной камеры разделительной перегородкой, которая выполнена в виде дисковидной тонкой упругой пластины проводящего материала, закрепленной между опорной и прижимной шайбой. Диаметр разделительной перегородки равен внутреннему диаметру компенсационной камеры, на разделительной перегородке рис. 4 с использованием технологии прецизионной фотолитографии выполняются четыре линии сквозного травления шириной 3-30 мкм, каждая из которых состоит из двух ортогональных равновеликих отрезков длиной a , причем первый отрезок начинается с отступом b от угла центрального квадрата ($a \times a$) и ориентирован вдоль стороны квадрата, а второй отрезок выполняется под углом 90° к первому и параллелен стороне квадрата со смещением $b + \Delta$, где Δ – ширина зазора, об-

разованного сквозным травлением. Таким образом формируются:

- недеформируемый мембранный элемент 15 квадратной формы ($a \times a$) у которого сторона квадрата $a = 0,6D$, расположенный в центре разделительной перегородки 9, перекрывающий большую часть акустической апертуры и имеющий возможность поступательно перемещаться вдоль оси, перпендикулярной его плоскости под действием давления расширяющегося газа;

- четырехточечный угловой эластичный подвес в виде четырех узких ($a \times b$) упругих сенсорных элементов 10, расположенных вдоль боковых сторон недеформируемого мембранного элемента 15 квадратной формы и жестко закрепленных на опорном контуре;

- опорный контур 9, представляющий собой периферийную часть разделительной перегородки, закрепляемую прижимной шайбой 18.

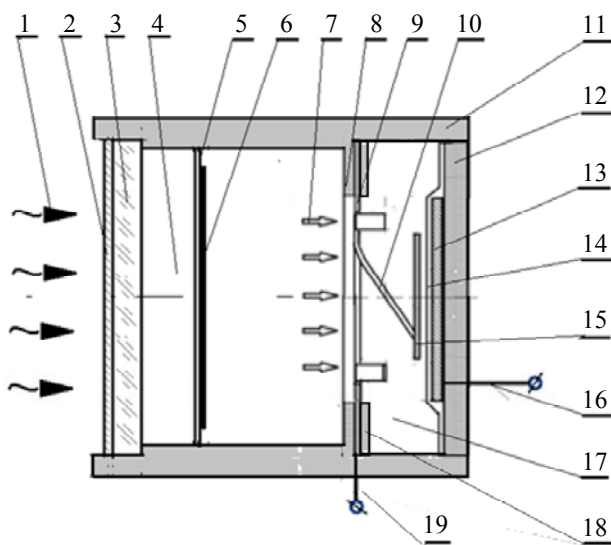


Рис. 3. Структурная схема оптико-акустического приемника инфракрасного и ТГц излучения со свободно подвешенной мембраной 1 – входное излучение; 2 – просветляющее покрытие; 3 – входное окно; 4 – расширительная камера; 5 – пленка со сквозной пористостью; 6 – металлический поглощающий элемент; 7 – волна давления; 8 – шайбовидная перегородка; 9 – опорный контур; 10 – упругий сенсорный элемент; 11 – цилиндрический корпус; 12 – задняя стенка компенсационной камеры; 13 – неподвижный электрод динамического конденсатора; 14 – защитное диэлектрическое покрытие; 15 – недеформируемый мембранный элемент квадратной формы; 16 – вывод неподвижного электрода; 17 – компенсационная камера; 18 – прижимная шайба; 19 – вывод разделительной перегородки

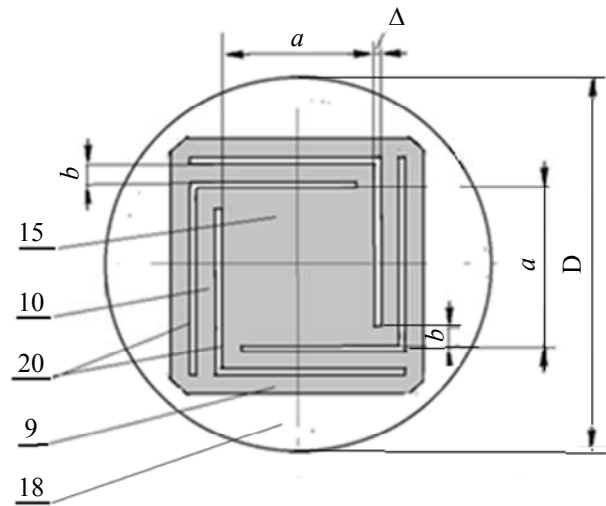


Рис. 4. Конструктивная схема чувствительного элемента датчика давления со свободно подвешенным мембранным элементом, где 9 – опорный контур чувствительного элемента, 10 – упругая сенсорная балка, 15 – недеформируемый мембранный элемент квадратной формы, 18 – прижимная шайба, 20 – линия сквозного травления

Под действием давления расширяющегося газа каждый из четырех сенсорных элементов 10 будет испытывать изгибные деформации вызванные: распределенной нагрузкой, $\delta_{распр} = qa^4/8EI$, где $\delta_{распр}$ – прогиб сенсорного элемента; q – удельное давление; a – длина сенсорного элемента; E – модуль упругости материала; I – момент инерции площади прямоугольного сечения сенсорного элемента $I = bh^3/12$ и сосредоточенной нагрузкой, обусловленной давлением P на четвертую часть площади мембранного элемента $\delta_{соср} = QEI \frac{a^3}{3}$, где $Q = 0,75Pa^2/4 h_{соср} = 075Pa^5/Ebh^3$.

Общее перемещение угла недеформируемого мембранного элемента 15 составит $\delta = \delta_{распр} + \delta_{соср}$ и при полной идентичности сенсорных элементов обеспечивает поступательное перемещение недеформируемого мембранного элемента 15 квадратной формы, выполняющего роль подвижного электрода в емкостном датчике давления.

Чувствительность такого датчика давления определяется шириной сенсорных элементов b , где $b = (0,1-0,05)a$, и толщиной разделительной перегородки h , которая составляет несколько мкм.

Расширительная камера 4 и компенсационная камера 17 оказываются пневматиче-

ски соединенными через зазоры сквозных линий травления разделительной перегородки, чем обеспечивается пневматическая обратная связь между камерами по аналогии с капиллярным каналом в классической схеме ОАП и устраняется увеличение жесткости за счет сжатия газа в компенсационной камере 17.

Заключение

Предложенная свободно подвешенная мембрана образует третью группу сенсорных элементов ОАП (мембрана, кантилевер, свободный подвес). Подобный свободный подвес известен как 4-х точечный Z-образный косо-симметричный подвес осевых акселерометров [17], однако как подвес мембраны датчика давления в известной литературе не рассматривался. Подвес обеспечивает увеличение чувствительности более чем на три порядка по сравнению с круглой мембраной, выполненной из того же материала и имеющей ту же толщину и активную площадь. Поступательное перемещение свободно подвешенного проводящего мембранного элемента обеспечивает эффективное преобразование изменения давления в расширительной камере в изменение емкости. Если на поверхность мембранного элемента нанесена штриховая отражательная маска, то за счет вращательного движения подвес одновременно допускает оптическое считывание перемещения с применением схемы Теплера.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках

выполнения работ по проекту № 124041700103-1 государственного задания ИАиЭ СО РАН на 2024–2026 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибин И. С., Котляр П. Е. / Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90–97.
2. Котляр П. Е., Потатуркин О. И. / Автометрия. 2025. № 3. С. 77–95.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. С. 463.
4. Hasikin K., Soin N., Ibrahim F. / Proc. of the IEEE Int. Conference on Semiconductor Electronics. Malacca, Malaysia, 2010. P. 293–296.
5. Палатник Л. С., Ильинский А. И. / УФН. 1968. Т. 95. Вып. 4. С. 613–645.
6. Дедкова А. А. и др. / Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 10. С. 1054–1465.
7. Полиимидные пленки DuPont™ Kapton®. / www.dupont.com. 03.04.2023.
8. Baglioni G. et al. / Nanoscale. 2023. Vol. 15. P. 6343–6352.
9. Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J. / Opt. Express. 2017. Vol. 25. № 21. P. 25318–25325.
10. Тун Пью Вин, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. / Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28 (2). С. 222–231.
11. de Paula M. H. et al. / J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. P. 3722–3724.
12. Гетманенко Н. Ю. / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. Т. 4/7 (52). С. 30–35.
13. Mikko Saarinen. Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy. – Finland: Aalto university school of science and technology, 2010. P. 83.
14. Lindley R. E. et al. / Applied Physics B. 2007. Vol. 86. P. 707–713.
15. Быков А. В. / Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. С. 141–151.
16. Феодосьев В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1967.
17. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007.

Optical-acoustic radiation receivers with a freely suspended membrane

P. E. Kotlyar

*Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Novosibirsk, 630090 Russia
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su*

Received 18.09.2025; revised 25.09.2025; accepted 11.12.2025

The evolution of the main unit of an optical-acoustic pressure transducer-sensor is considered. A consistent transition from a membrane pressure sensor with rigid fixation of the membrane along the contour, leading to uncontrolled mechanical stresses and changes in the main metrological parameters to cantilever pressure sensors in which only one side is fixed, which leads to an increase in sensitivity by more than 140 times, is shown. It is shown that by chemical etching of four L-shaped narrow through grooves on a membrane foil in one technological cycle, a four-point Z-shaped skew-symmetric suspension can be formed, containing a completely deformation-free central membrane element of a square shape, a four-point angular elastic suspension in the form of four narrow elastic sensor elements located along the lateral sides of the non-deformable membrane element and rigidly fixed to the support contour, and a support contour.

Keywords: sensitive element; membrane; cantilever; sensitivity; elastic suspension.

REFERENCES

1. Gibin I. S. and Kotlyar P. E., Applied Physics, № 2, 90–97 (2020) [in Russian].
2. Kotlyar P. E. and Potaturkin O. I., Avtometriya, № 3, 77–95 (2025).
3. Andreyeva L. Ye. Uprugiy elementy priborov. Moscow, Mashinostroyeniye, 1981, p. 463.
4. Hasikin K., Soin N. and Ibrahim F. Proc. of the IEEE Int. Conference on Semiconductor Electronics. Malacca, Malaysia, 2010, pp. 293–296.
5. Palatnik L. S. and Il'inskiy A. I., UFN **95** (4), 613–645 (1968).
6. Dedkova A. A. et al., Zhurnal tekhnicheskoy fiziki **91** (10), 1054–1465 (2021).
7. Poliimidnyye plenki DuPont™ Kapton®. www.dupont.com. 03.04.2023.
8. Baglioni G. et al., Nanoscale **15**, 6343–6352 (2023).
9. Fan K., Suen J. Y. and Padilla W. J., Opt. Express **25** (21), 25318–25325 (2017).
10. Tun P'o Vin., Simonov B. M. and Timoshenkov S. P., Izvestiya vuzov. Elektronika **28** (2), 222–231 (2023).
11. de Paula M. H. et al., J. Appl. Phys. **64**, 3722–3724 (1988).
12. Getmanenko N. Yu., Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy **4/7** (52), 30–35 (2011).
13. Mikko Saarinen. Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy. Finland, Aalto university school of science and technology, 2010, p. 83.
14. Lindley R. E. et al., Applied Physics B **86**, 707–713 (2007).
15. Bykov A. V., Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, 141–151 (2014).
16. Feodos'yev V. I. Izbrannye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov. Moscow, Nauka, 1967.
17. Raspopov V. Y. Mikromekhanicheskiye pribory. Moscow, Mashinostroyeniye, 2007.

Об авторе

Котляр Петр Ефимович, д.г.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1). E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su
AuthorID: 60366

**Сводный перечень статей, опубликованных в журнале
«Прикладная физика» в 2025 г.**

	Номер выпуска	Стр.
ОБЩАЯ ФИЗИКА		
<i>Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н.</i> Параметры метеорных потоков и периодичность образования серебристых облаков в ограниченных широтах Земли	3	5
<i>Василяк Л. М., Кудрявцев Н. Н., Костюченко С. В., Сивин Д. О., Тимофеев И. С.</i> Применение УФ-излучения 222 нм эксимерных КС1-ламп для дезинфекции	5	7
<i>Денисов Д. Г.</i> Экспериментальная оценка качества лазерного излучения в методе дифференциального рассеяния	2	5
<i>Кравчук Д. А.</i> Визуализация опухоли на основе обработки вейвлет-преобразования эластографического сигнала с помощью нейросети	3	12
<i>Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д., Хафизов Р. З.</i> Расчет спектральной плотности излучения чёрных (серых) тел и субволновых частиц	4	5
<i>Телегин А. М., Калаев М. П., Воронов К. Е.</i> Исследование модели расчёта наведенного импульса тока в измерительных сетках датчика микрометеороидов и частиц космического мусора	1	5
ФОТОЭЛЕКТРОНИКА		
<i>Белов А. Г., Козлов Р. Ю., Журавлев Е. О., Молодцова Е. В., Хихеев Н. Г., Саркисов Н. А., Панков М. А., Куликов В. Б.</i> Сравнение расчетных и экспериментальных значений собственной концентрации свободных носителей заряда в антимониде индия	5	43
<i>Белов А. Г., Молодцова Е. В., Журавлев Е. О., Козлов Р. Ю., Комаровский Н. Ю., Кузнецов А. Н., Ларионов Н. А.</i> Расчет частот смешанных плазмон-фононных мод для <i>p</i> -InSb и <i>p</i> -GaSb при $T = 295$ К	2	31
<i>Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Седнев М. В., Трухачев А. В., Иродов Н. А., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Войцеховский А. В., Горн Д. И., Михайлов Н. Н.</i> Матричное фотоприемное устройство средневолнового ИК диапазона спектра с <i>n</i> Vn-архитектурой из CdHgTe с барьерным слоем на основе сверхрешетки	1	38
<i>Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А., Попов К. А., Жукович-Гардеева А. А., Егоров А. В.</i> Влияние локальных дефектов в окисных слоях на вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов	6	7

	Номер выпуска	Стр.
<i>Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Иродов Н. А., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Малыгин В. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А.</i> Образование дефектов диэлектрических слоев в процессах диффузии в кремнии	2	39
<i>Войцеховский А. В., Дзядух С. М., Горн Д. И., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В.</i> Исследование токов поверхностной утечки $n\text{Вп}$ HgCdTe фоточувствительной структуры со сверхрешеточным барьером, детектирующей излучения в длинноволновом инфракрасном диапазоне спектра	5	15
<i>Грекова А. А., Климов Е. А., Виниченко А. Н., Бурлаков И. Д.</i> Исследование оптических свойств эпитаксиальных пленок CdTe/GaAs(100), выращенных при различных температурных режимах	2	46
<i>Грузевич Ю. К., Альков П. С., Балясный Л. М., Волков Д. В.</i> Гибридный фотоприемный модуль для оптико-телевизионных систем подводного видения	1	70
<i>Зотов А. В., Панин Г. Н., Тулина Н. А., Борисенко Д. Н., Колесников Н. Н.</i> Фотомемристивные переключения в кристаллах селенида висмута	1	55
<i>Кабальнов Ю. А., Иванова М. М.</i> Радиационная стойкость светоизлучающих структур с наноструктурами Ge(Si) на подложках «кремний на изоляторе»	5	33
<i>Кармоков А. М., Козырев Е. Н., Агоев А. З., Молоканов О. А., Кармокова Р. Ю.</i> Модель и расчет скорости генерации и рекомбинации носителей зарядов для структуры ZnO/CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /NiO перовскитного солнечного элемента	4	24
<i>Комаровский Н. Ю., Князев С. Н., Трофимов А. А., Савиных Е. А., Соколовская Э. А., Кудря А. В.</i> Анализ данных производственного контроля для управления качеством монокристаллов GaAs	6	14
<i>Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Барышева К. В., Гришина А. Н.</i> Характеристики малоформатных матричных фотоприемников	1	60
<i>Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Барышева К. В., Лопатин В. В.</i> Тестовые структуры для исследования зависимости фотоэлектрических характеристик крупноформатных МФПУ от топологии элементов на основе InSb	5	25
<i>Полесский А. В., Семенченко Н. А., Зарипов Ш. И., Машошин Д. А.</i> Метод экспресс-контроля интегрального коэффициента пропускания оптических элементов	4	16
<i>Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Деев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Лазарев П. С., Мирофьянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спиринов М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Дёмкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф.</i> Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 для области спектра 0,4–2,0 мкм из коллоидных квантовых точек ККТ PbS с транспортным слоем для дырок на основе ККТ $p\text{-PbS-EDT}$	1	45

	Номер выпуска	Стр.
Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Деев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Зарипов Ш. И., Лазарев П. С., Мирофьянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спириин М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 с расширенной областью чувствительности 0,4–2,0 мкм на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS со слоем из <i>p</i> -NiO _x , блокирующим электроны	2	12
Попов К. А., Антонова В. Е., Родина А. М., Климанов Е. А., Ляликов А. В. Влияние режимов отжига контактных систем Si-Al и Si-Ti-Al на коэффициент усиления <i>n-p-n</i> биполярных транзисторов	3	19
Романов Е. К., Бурлаков В. И., Чеботаренко Д. Д., Юдовская А. Д. Анализ надежности фотомодуля инфракрасного диапазона с режимом временной задержки и накопления с цифровыми выходами	3	25
Сакуненко Ю. И., Кондратенко В. С., Трофимов А. А. Конформные тепловые метаматериалы – новые возможности управления тепловыми потоками в электронике	6	21
Шуклов И. А., Дёмкин Д. В., Вершинина О. В. Синтез коллоидных квантовых точек сульфида свинца в децене-1 в качестве растворителя	1	64
Шуклов И. А., Миленкович Т., Вершинина О. В., Дубровина Н. В., Сацова О. А., Попов В. С., Иванов В. В. Получение коллоидных квантовых точек PbSe и тонких пленок на их основе с использованием раствора селена в децене-1	3	34
Шуклов И. А., Серая А. В., Шалагин А. Ю., Лим В. В., Миленкович Т., Вершинина О. В., Яковлев В. О., Попов В. С., Иванов В. В. Новый прекурсор серы для синтеза экологически безопасных коллоидных квантовых точек CuInS ₂	2	21
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ		
Баринев Ю. А., Забелло К. К., Логачев А. А., Полуянова И. Н., Школьник С. М. Излучение короткой сильноточной вакуумной дуги с медными электродами	1	11
Бычков В. Л., Логунов А. А., Ваулин Д. Н., Шваров А. П., Изотов А. М., Тарасенко Б. А., Дударев Д. П. Обеззараживание семян подсолнечника при воздействии отрицательного коронного разряда	6	26
Бычков В. Л., Шваров А. П., Логунов А. А., Бычков Д. В., Ваулин Д. Н. Воздействие плазмы коронного разряда на окислительно-восстановительные процессы в почве	5	51
Дудник Ю. Д., Сафронов А. А., Ширяев В. Н., Васильев М. И., Васильева О. Б. Исследование динамики горения дугового разряда в метан-водородосодержащей атмосфере в плазмотроне переменного тока	2	69
Золотухин Д. Б., Шандриков М. В., Юшков Г. Ю. Ионный состав плазмы планарного магнетрона в газовом и вакуумном режимах функционирования	1	16

	Номер выпуска	Стр.
<i>Казаков Е. Д., Орлов М. Ю., Смирнова А. Р., Стрижаков М. Г., Сунчугашев К. А., Юсупова Л. М., Ткаченко С. И.</i> Оценка влияния плазменных процессов в вакуумном диоде сильноточного электронного ускорителя «Кальмар» на развитие ударно-волновых процессов в мишенях	2	55
<i>Каранин Н. С.</i> Исследование процесса плазмохимического травления диоксида кремния для изготовления изделий МЭМС	3	49
<i>Курбанисмаилов В. С., Рагимханов Г. Б., Терешонок Д. В., Халикова З. Р., Майоров С. А., Абакарова Х. М.</i> Особенности формирования импульсного разряда в предварительно ионизированном гелии	6	31
<i>Лисин Е. А., Лисина И. И.</i> О среднеквадратичном смещении активной броуновской частицы с инерцией вращения в гармонической ловушке	6	44
<i>Майоров С. А., Голятина Р. И., Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю.</i> О характеристиках положительного столба тлеющего разряда при низком давлении инертного газа	4	51
<i>Марциновский А. М., Гавриш С. В., Коренюгин Д. Г., Гуслин А. С., Кузин В. Н.</i> Сильноточный фотоэмиссионный тлеющий разряд в смеси Хе–Сs	2	76
<i>Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.</i> Эффект глубины погружения электрода на развитие предпробойных течений в дистиллированной воде	1	31
<i>Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.</i> Визуализация электрического поля в трансформаторном масле с помощью взвешенных микрокапель воды	2	62
<i>Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.</i> Определение напряженности электрического поля в трансформаторном масле с помощью микрокапель воды	4	30
<i>Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.</i> Влияние локальных неоднородностей проводимости на форму разрядного канала в воде	5	57
<i>Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.</i> Направленный электрический разряд в воде по каналу с ионами соли NaCl	6	38
<i>Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М.</i> Накопление ионов в плазменной электростатической ловушке внутри облака заряженных микрочастиц в электрическом разряде	4	37
<i>Тазмеев Г. Х., Тазмеев А. Х.</i> Влияние температуры электролита на образование мелкомасштабных пульсаций тока в газовом разряде с жидким катодом	4	45
<i>Тарасенко В. Ф., Виноградов Н. П., Бакиш Е. Х.</i> Стример, плазменная диффузная струя и тлеющий разряд при пробое в воздухе низкого давления импульсом напряжения с фронтом около 20 мс	5	64
<i>Тюньков А. В., Андронов А. А., Золотухин Д. Б., Климкин Т. О., Нестеренко А. К., Сальников С. А., Юшков Ю. Г.</i> Влияние состава рабочего газа на масс-зарядовый состав ионов пучковой плазмы при испарении YSZ мишени электронным пучком	1	24

	Номер выпуска	Стр.
<i>Чернов Д. О., Гасин А. С., Дворниченко М. Е., Михайлов А. Д., Никифоров А. С., Саркаров Н. Э., Иванов А. И.</i> Регистрация спектров излучения плазмы гадолиния при воздействии лазерами на твердотельную мишень	3	54
<i>Чистолинов А. В., Казанский П. Н., Якушин Р. В., Чепелев В. М., Тюфтяев А. С.</i> Исследование газовых потоков, создаваемых разрядом с жидким электролитным катодом	5	71
<i>Шершунова Е. А., Небогаткин С. В., Клубков А. В., Романов К. И.</i> Оценка заряда, формируемого на выходе из коаксиального плазменного реактора с микрополым катодом	5	78

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Бурдовицин В. А., Нгон А Кики Л. Ж., Окс Е. М., Суховольский Ф. А.</i> Электрические и оптические свойства кремний-углеродных пленок, осажденных электронно-лучевым испарением карбида кремния в газовой среде	6	50
<i>Вальяно Г. Е., Бородина Т. И., Маликов М. М., Сажнова О. В.</i> Некоторые результаты модификации лазерным излучением нанопорошка диоксида циркония в растворе нитрата серебра	3	60
<i>Гребенщикова Е. А., Шутаев В. А., Добрычев Ф. А., Губанова Н. Н., Яковлев Ю. П.</i> Электрофизические свойства структур (Pd-SiO ₂)/InP в атмосфере водорода	4	81
<i>Ильин М. Е., Тойкка А. С., Каманина Н. В.</i> Вариация свободных поверхностных энергий пленок термически восстановленного оксида графена, полученных на подложках оксида индия и олова	3	67
<i>Комаровский Н. Ю., Князев С. Н., Соколовская Э. А., Кудря А. В., Суханова А. С., Антонова В. Е., Молодцова Е. В.</i> Метрологическое обеспечение цифровых измерений изображений неоднородности ямок травления в монокристаллах GaAs	4	59
<i>Комаровский Н. Ю., Князев С. Н., Соколовская Э. А., Кудря А. В., Суханова А. С., Антонова В. Е., Молодцова Е. В.</i> Измерение масштабов неоднородности размещения дислокационных ямок травления на цифровых изображениях монокристаллов GaAs	5	85
<i>Кузнецова П. Д., Муханова Е. А., Волик К. К., Панкин И. А., Солдатов А. В.</i> Оптические свойства вольфрамата кальция, допированного различными лантаноидами (Pr, Nd, Eu, Ce, Sm)	2	84
<i>Лихоманова С. В., Каманина Н. В.</i> Механизмы взаимодействия молекул поливинилового спирта и углеродных наночастиц в водных растворах	1	78
<i>Локтионова И. В., Абакумов П. В., Кузьменко А. П., Колпаков А. И., Новиков Е. А., Мамонтов В. А., Петрова Л. П.</i> Исследования полиамидных мембран, модифицированных наночастицами нитрида бора, для фильтрации наночастиц серебра	6	56
<i>Печеркин В. Я., Дешева Е. А., Василяк Л. М., Фиалкина С. В.</i> Длительные полевые испытания коррозии и биообрастания образцов из нержавеющей стали в условиях тропического климата	4	68

	Номер выпуска	Стр.
<i>Рабаданова А. Э., Гаджимагомедов С. Х., Палчаев Д. К., Рабаданов М. Х., Фараджев Ш. П., Мурлиева Ж. Х., Майоров С. А., Рагимханов Г. Б., Эмиров Р. М.</i> Сверхпроводящая микрокристаллическая керамика YBCO: корреляции структуры и свойств	1	84
<i>Саенко А. В., Билык Г. Е., Хубежов С. А., Козюменко К. А., Смирнов В. А.</i> Влияние термического отжига на свойства пленок оксида меди, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления	3	73
<i>Семенов А. П., Цыренов Д. Б.-Д., Улаханов Н. С., Семенова И. А.</i> Синтез покрытий TiN в парах Cu на сплаве T15K6 методом гибридной плазменной технологии	2	97
<i>Сокурченко В. А., Сахаров Ю. В., Артищев С. А.</i> Исследование влияния величины сопротивления толстоплёночных резистивных компонентов на мощность низкочастотного шума	3	81
<i>Фролов Н. Ю., Клоков А. Ю., Шарков А. И., Николаев С. Н., Чернощцкий М. А., Ченцов С. И., Пугачев М. В., Шуплецов А. В., Кривобок В. С., Кунцевич А. Ю.</i> Исследование акустических свойств Ван-дер Ваальсовых гетероструктур, содержащих монослой WSe ₂ , методом гиперзвуковой микроскопии	2	90
<i>Шенгуров В. Г., Титова А. М., Алябина Н. А., Денисов С. А., Чалков В. Ю., Трушин В. Н., Кудрин А. В., Бузынин Ю. Н.</i> Моно- и поликристаллические пленки германия и германий-олова, легированные атомами галлия в процессе газофазного осаждения	4	74
ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ		
<i>Железнов В. Ю., Лычковский В. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Хомич Ю. В., Чумаков А. Н.</i> Абляция бескислородной меди бихроматическими наносекундными лазерными импульсами в воздушной среде	4	87
<i>Меджидов И. М., Харламов В. А., Титова Д. И., Басырова Д. В., Чиж Т. В., Павлов А. Н.</i> Количественный ЭПР-анализ гамма-облученных семян пшеницы	4	94
ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ		
<i>Бабенко Д. Д., Банников М. В., Некрасов Г. И.</i> Развитие модели расчета теплопритоков для применения в разработке конструкции вакуумного криостатируемого корпуса фотоприемных устройств	4	101
<i>Васильева Н. А., Тихонов В. Н., Фролова Н. А., Губина О. А., Иванов И. А., Горбатов С. А., Тихонов А. В.</i> Влияние времени воздействия СВЧ-излучения на микробную деконтаминацию и потребительские свойства какаофеллы молотой	3	42
<i>Воеводин В. В., Жарков Я. Е., Кириллов А. С., Коржова О. И., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю.</i> Исследование эффективности канальной системы охлаждения воздуха с использованием электрогидродинамических потоков	6	69

	Номер выпуска	Стр.
<i>Декопов А. С., Лукьянов А. А., Масленников С. П., Михайлов С. В.</i> Количественная оценка качества радиографического контроля с учетом специфики генерации и формирования рабочих пучков проникающего излучения	5	100
<i>Кононов М. А., Светиков В. В., Пустовой В. И.</i> Получение GeO ₂ -SiO ₂ ионным распылением для изучения генерации лазерного диода с внешним планарным волноводным отражателем	4	107
<i>Коротаев Е. Д., Гурьев Д. И., Гурьев А. И., Зиньковский А. А., Морозов Д. И., Шаров А. А.</i> Исследование свойств вакуумно-плотных паяных соединений, применяемых для изготовления держателей матричных фотоприёмных устройств	6	63
<i>Котляр П. Е.</i> Опτικο-акустические приемники со свободно подвешенной мембраной	6	75
<i>Овчаров В. В., Куреня А. Л., Пригара В. П.</i> Динамики переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние при бистабильном режиме радиационного теплообмена с элементами лампового реактора	4	113
<i>Соловьев Д. Г., Буравцова В. В., Красавин А. А., Кочнов К. Д., Куликов В. Б.</i> Стенд для проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах фотомодуля из состава фотоприемного устройства космического базирования	5	94
<i>Тихонов В. Н., Антипов С. Н., Иванов И. А., Тихонов А. В., Гаджиев М. Х., Ильичев М. В., Тюфтяев А. С.</i> Экспериментальный комплекс для СВЧ-плазменной модификации дисперсных материалов при атмосферном давлении	5	106
<i>Шершунова Е. А., Мошкунов С. И., Небогаткин С. В., Романов К. И., Воеводин В. В., Рябинин А. А., Роговая О. С., Воротеляк Е. А., Мищенко В. В., Крюков А. И., Ильин М. М.</i> Влияние наносекундных импульсов напряжения на клетки модельных мембран млекопитающих	3	88

Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей (в редакции 2025 г.)

1. Журнал «Прикладная физика» ориентирован в основном на срочную публикацию кратких статей о последних достижениях в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения. Журнал входит в новый Перечень ВАК, вступивший в действие 1 декабря 2015 г.

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии, учредителю и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т. ч. «авторское право»). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи _____ предоставляем редколлегии, учредителю и издателю журнала «Прикладная физика» безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций. Подписи авторов: _____ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9, АО «НПО «Орион», Редакция журнала «Прикладная физика» или по электронной почте: advance@orion-ir.ru

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке.

3. Рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке.

4. Объем статьи (вместе с рисунками, библиографией и англоязычной частью) не должен превышать **7 страниц** формата А4 при однократном межстрочном интервале. (Статью большего объема предлагается направлять в аффилированный журнал "**Успехи прикладной физики**", предназначенный для публикации развернутых статей и обзоров). Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word (гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 12), причем текст уже должен содержать в нужном месте рисунки и подписи под ними. Однако следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

- название раздела журнала;
- индекс УДК;
- код классификации PACS (https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf);
- заголовок статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- аннотация статьи (10–15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);
- ключевые слова;
- шифр научной специальности.

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

Внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (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, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв – наклонный шрифт (курсив). Векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее) или стрелкой над курсивным символом вектора (менее желательно). Для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п. Размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

10. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка – наименование данных и размерность; следующие строки – сами данные.

11. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

12. Рукописи, а также CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

13. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

14. При публикации в журнале каждая статья сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов). В статье указывается также дата поступления статьи в редакцию.

Прикладная физика: Научно-технический журнал / ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2025. № 6. С. 1–92.

Подписано в печать 19.12.2025
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