

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2023. Том 18, № 2

СОДЕРЖАНИЕ

Радиофизика и электроника

- Орозобаков А. Т., Саякбаева Б. Б., Орозобаков Э. У., Аманкулова Н. А.* Определение общего содержания стратосферного озона на миллиметровых волнах над регионом Средней Азии 5

Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

- Борин В. М., Горностаев П. Б., Мешков О. И., Кучьянов А. С., Рева С. В.* Разработка и апробация автокоррелятора для измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона 16
- Ерохин А. И., Кремнев А. А., Шкаруба В. А., Пята Е. Э., Булатов А. В., Бедарева Т. В.* Система вывода энергии из сверхпроводящего соленоида с током 5100 А и запасённой энергией 22 МДж 26
- Аникеева К. И., Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Сотников О. З., Финашин Р. А., Шиховцев И. В.* Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода 36

Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

- Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А.* Экспериментальное исследование взаимодействия контролируемых возмущений от двух источников в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла 46
- Гапонов С. А.* Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя с внутренним подводом тепла и инъекцией однородного газа через пористую стенку 54

Физика твердого тела, полупроводников, наноструктур

- Заворин А. В., Мосеенков С. И., Столярова С. Г., Окотруб А. В., Кузнецов В. Л.* Использование композитов на основе МУНТ и Si в качестве анодного материала в литий-ионных аккумуляторах 66
- Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г.* Теплофизические свойства халькогенидных полупроводниковых соединений и влияние дефектов на их свойства 76

Учебно-методическое обеспечение преподавания физики

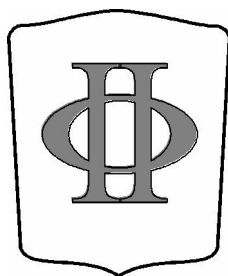
Зарвин А. Е., Галашов Е. Н., Ездин Б. С., Коробейщиков Н., Пасько П. Г., Яскин А. С.

Отдел прикладной физики физического факультета 83

Филиппов В. В., Заворотний А. А., Смирнов М. Ю., Зияутдинов В. С., Лыков Д. Д.

Изучение электрофизических свойств анизотропных полупроводников в лабораторном практикуме вузовского курса физики 105

Информация для авторов 118



Сибирский физический журнал

Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal
Since 2006
In Russian

2023. Volume 18, № 2

CONTENTS

Radiophysics and Electronics

- Orozobakov A. T., Sayakbayeva B. B., Orozobakov E. U., Amankulova N. A.* Determination of Total Stratospheric Ozone on Millimeter Waveband over the Central Asian Region 5

High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma

- Borin V. M., Gornostaev P. B., Meshkov O. I., Kuch 'yanov A. S., Reva S. V.* Development and Testing of an Autocorrelator for Measuring the Duration of Picosecond Pulses of Near-infrared Radiation 16
- Erokhin A. I., Kremnev A. A., Shkaruba V. A., Pyata E. E., Bulatov A. V., Bedareva T. V.* Energy Extraction System for the Superconductive Solenoid with Current 5100 A and Stored Energy 22 MJ 26
- Anikeeva K. I., Vointsev V. A., Gavrisenko D. Y., Sotnikov O. Z., Finashin R. A., Shikhovtsev I. V.* Development and Testing of a High-Frequency Driver for a Charge-Exchange Source of Negative Hydrogen Ions 36

Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

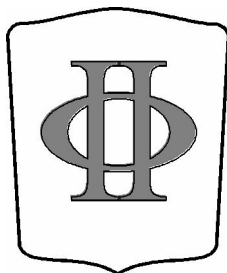
- Kolosov G. L., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A.* Experimental Study of the Interaction of Controlled Disturbances from Two Sources in the Supersonic Boundary Layer of a Swept Wing 46
- Gaponov S. A.* Stability of Supersonic Boundary Layer with Internal Heat Supply and Injection of Homogeneous Gas through a Porous Wal 54

Solid-State and Semiconductor Physics, Physics of Nanostructures

- Zavorin A. V., Moseenkov S. I., Stolyarova S. G., Okotrub A. V., Kuznetsov V. L.* Investigation of Composites Based on MWCNTs and Si as an Anode Material in Lithium-ion Batteries 66
- Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.* Thermophysical Properties of Chalcogenide Semiconductor Compounds and the Effect of Defects on Their Properties 76

Educational and Methodological Provision of Teaching of Physics

- Zarvin A. E., Galashov E. N., Ezdin B. S., Korobeishchikov N. G., Pasko P. G., Yaskin A. S.* Department of Applied Physics of the Faculty of Physics 83



Siberian Journal of Physics

The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physico-technical computer science.

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite scientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum Optics, Quantum Electronics;
- Radiophysics and Electronics;
- The theoretical and Mathematical Physics;
- Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases;
- High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma;
- Solid-state and semiconductor physics, physics of nanostructures;
- Chemical, Biological and Medical Physics;
- Computer Science, Information-Communication Technologies;
- Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

Periodicity of an exit of the edition – 4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov
Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar
S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, V. A. Volodin, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev
A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin
V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

The series is published quarterly in Russian since 2006
by Novosibirsk State University Press

The address for correspondence
Physics Department, Novosibirsk State University
Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia
Tel. +7 (383) 363 44 25

E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru
On-line version: <http://www.phys.nsu.ru/vestnik/>

Научная статья

УДК 621.372:551.508.8

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-5-15

Определение общего содержания стратосферного озона на миллиметровых волнах над регионом Средней Азии

Алманбет Токтосунович Орозобаков¹, Бурул Бапаевна Саякбаева²,
Эрмек Учтурукович Орозобаков³, Нургуль Асимкановна Аманкулова⁴

¹⁻³Институт физики им. акад. Ж. Ж. Жеенбаева НАН КР
Бишкек, Кыргызстан

⁴Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Бишкек, Кыргызстан

¹a.orozobakov@mail.ru

²burulsayakbaeva@mail.ru

³orozobakov82@mail.ru

⁴a_nur4@mail.ru

Аннотация

Приведены принципы действия основных блоков радиоспектрометра миллиметрового диапазона по исследованию озонового слоя. Представлены некоторые результаты измерений высотного распределения озона над регионом Средней Азии, по данным которых подтверждены зоны максимальной концентрации озона по высоте, определен суммарный озон в интервале высот 20–60 км.

Ключевые слова

радиоволны, длина волны, излучение, обтюратор, концентрация озона, озоновый слой, спектр, миллиметровые волны, спектро радиометр.

Для цитирования

Орозобаков А. Т., Саякбаева Б. Б., Орозобаков Э. У., Аманкулова Н. А. Определение общего содержания стратосферного озона на миллиметровых волнах над регионом Средней Азии // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 5–15. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-5-15

Determination of Total Stratospheric Ozone on Millimeter Waveband over the Central Asian Region

Almanbet T. Orozobakov¹, Burul B. Sayakbayeva²,
Ermek U. Orozobakov³, Nurgul A. Amankulova⁴

¹⁻³ Institute of Physics named after J. J. Jeenbaeva NAS KR Bishkek
Bishkek, Kyrgyzstan

⁴ Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov
Bishkek, Kyrgyzstan

¹ a.orozobakov@mail.ru

² burulsayakbaeva@mail.ru

³ orozobakov82@mail.ru

⁴ a_nur4@mail.ru

Abstract

The principles of operation of the main blocks of the radio spectrometer of the millimeter range for the study of the ozone layer are presented. Some results of measurements of the altitude distribution of ozone over the region of Central Asia are presented, according to which the zones of maximum ozone concentration in height are confirmed, and total ozone is determined in the altitude range of 20–60 km.

Keywords

radio waves, wavelength, radiation, shutter, concentration of ozone, ozone layer, spectrum, millimeter waves, spectro-radiometer

For citation

Orozobakov A. T., Sayakbaeva B. B., Orozobakov E. U., Amankulova N. A. Determination of total stratospheric ozone on millimeter waveband over the central asian region. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 5–15 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-5-15

Радиофизические исследования озонового слоя над регионом Средней Азии были начаты благодаря проектам МНТЦ сотрудниками ИФ НАН КР совместно с ИПФ РАН и НИИИС им. Седакова. На берегу оз. Иссык-Куль была организована радиофизическая атмосферная обсерватория, позволяющая вести круглосуточные наблюдения за озоновым слоем в пределах высот 20–60 км на миллиметровых волнах [1–3]. Определение содержания озона в стратосфере выполнялось методом микроволнового пассивного зондирования. В России подобные исследования атмосферы были начаты в 60-х гг. прошлого века [4–7]. Совместные наблюдения спектральных линий озона на частотах 142,2 и 101,7 ГГц, выполненные в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (г. Москва) и в Институте прикладной физики РАН (г. Апатиты) [7], показывают высокую эффективность радиофизических методов исследования озоносферы из наземных пунктов, находящихся на большом расстоянии друг от друга.

В Киргизии исследования озонового слоя были начаты в 80-х гг. XX в. [8–11] оптическими методами и на лидарной станции. Были получены среднемесячные значения общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии (Иссык-Куль) за 1980–2006 гг., линейный тренд и плавные изменения озона от года к году, определенные скользящим 12-месячным усреднением. За период этих наблюдений среднегодовое содержание озона в атмосфере упало примерно на 14 % с 349 е.Д. в 1980 г. до 300 е.Д. в 2006 г. Отрицательный линейный тренд составил – 0,3 % в год, эта величина превышает скорость истощения озона для равнинных и океанических регионов для средней широты северного полушария.

В Иссыккульской обсерватории наблюдения ведутся с помощью радиометрического спектрометра (РМС-001) миллиметрового диапазона, основанного на измерении спектра селективного теплового радиоизлучения молекул атмосферного озона в окрестности одной из линий вращательного спектра этого газа. Исследуется вращательный переход молекулы O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$),

резонансная частота которого близка 110836 МГц. Конструктивно озонметрический комплекс состоит из СВЧ-блока, установленного на опорном устройстве и блока управления, содержащего источники питания, спектральные фильтры и блоки согласования с системой ввода и обработки информации. Компонировка СВЧ-блока на опорном устройстве приведена на рис. 1.

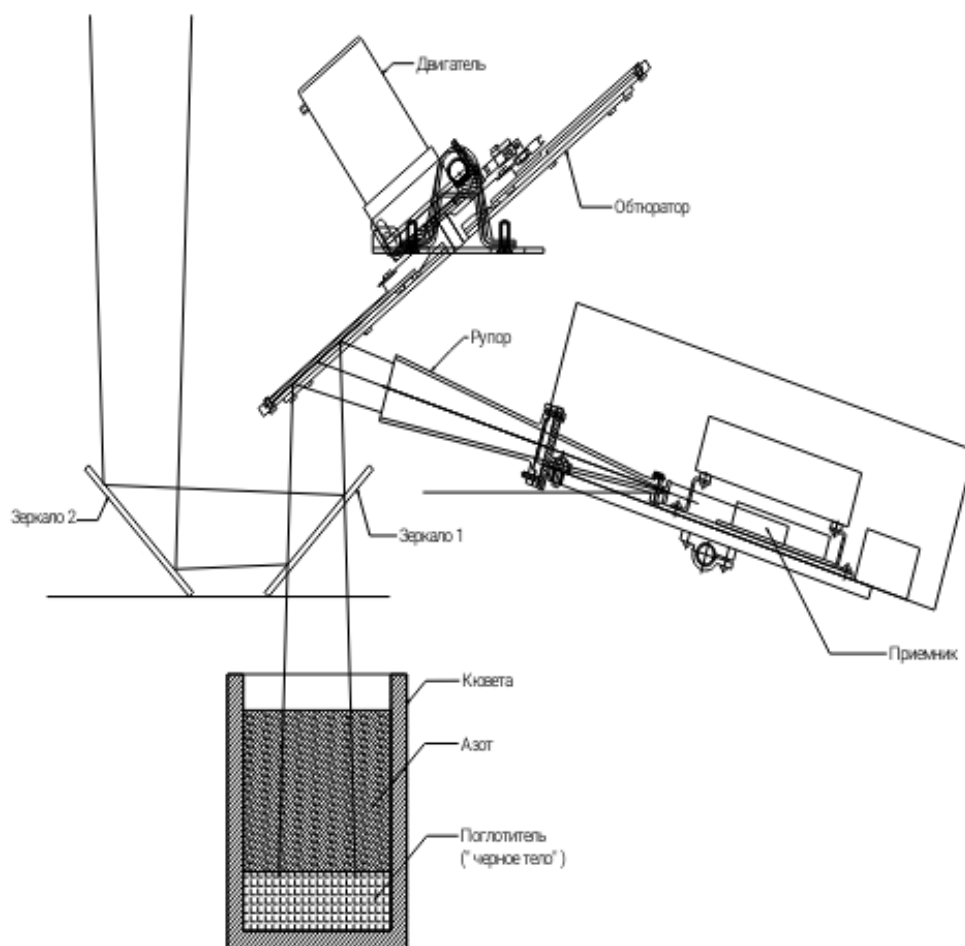


Рис. 1. Схема расположения озонметрического комплекса
Fig. 1. Scheme of location of the ozonometric complex

В зависимости от режимов в различные интервалы времени на вход приемника поступают: сигналы от эталонных нагрузок зенита или «черного тела» при температуре жидкого азота; излучения атмосферы под углом наблюдения и «черного» тела на обтюраторе. Принятый антенной сигнал 2,7-миллиметрового диапазона преобразуется смесителем приемника в сигнал промежуточной частоты ПЧ1 в диапазоне 1250...1800 МГц, который далее усиливается включенными последовательно малошумящим усилителем МШУ ($N_{\text{Ш}} \sim 1$ дБ, $K_{\text{р}} = 34,5$ дБ) и УПЧ ($N_{\text{Ш}} \sim 3$ дБ, $K_{\text{р}} = 29$ дБ).

Компоновка блока ММ (внешний вид), включающего в себя основные узлы (рупорную антенну, плату приемника с СВЧ-узлами приемного и гетеродинного трактов, синтезатор, стабилизаторы питающих напряжений – СН) и дополнительные узлы для модуляционного режима работы (генератор НЧ управляющего напряжения), приведена на рис. 2.

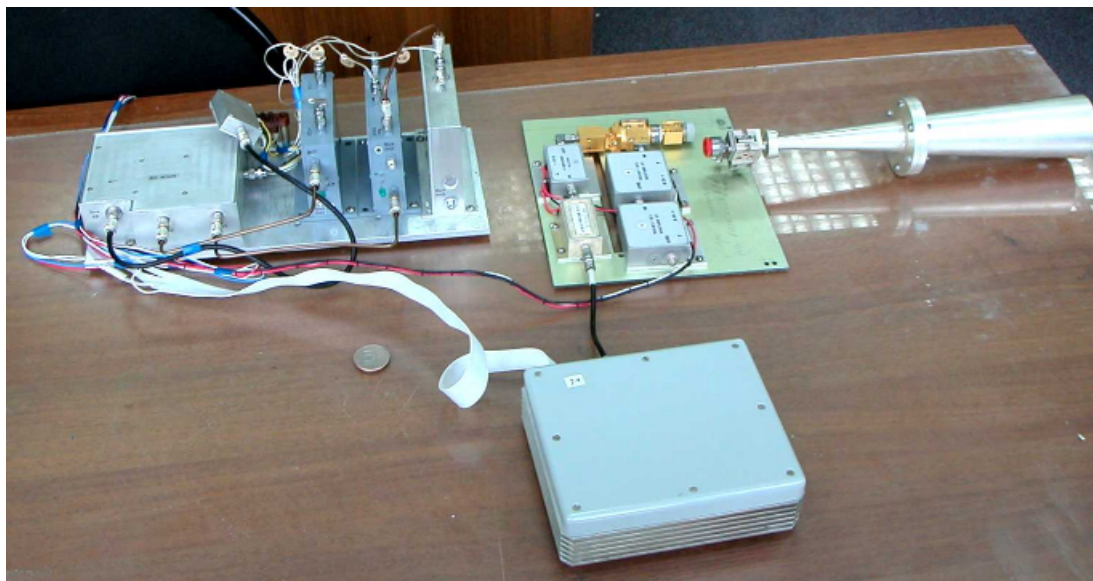


Рис. 2. Узлы блока ММ
Fig. 2. Units of the MM block

С выхода блока ММ сигнал диапазона ПЧ₁ поступает на блок ПЧ-2, предназначенный для дальнейшего преобразования диапазона частот ПЧ₁ в диапазон более низких частот ПЧ₂.

Выделенные фильтрами спектральных каналов анализируемые сигналы подаются на квадратичные детекторы (на базе диодов 2A202A) и далее поступают на УНЧ. Каждый УНЧ собран по схеме с использованием прецизионных УПТ. С выходов УНЧ сигналы напряжением $\sim 2,25$ В (при сигнале, эквивалентном 300 °K) через устройства коммутации поступают в вычислитель, где с помощью АЦП преобразуются в цифровую форму. На входе АЦП включен электронный коммутатор на 32 положения с быстродействием не хуже 0,5 мкс. Оцифрованные сигналы поступают на вход ПЭВМ, где проводится их обработка по заданным алгоритмам и накопление данных измерений. Полученные зависимости оптической толщины линии от частоты позволяют решить уравнение переноса теплового излучения в атмосфере относительно величины содержания озона на луче зрения, т. е. определить вертикальное распределение озона.

Для получения спектров атмосферного озона в основном была использована методика абсолютной калибровки интенсивности линии озона [12, 13], которая включает в себя последовательный прием излучения «черного тела» при температуре кипящего жидкого азота, в направлении угла места 16° и от «черного тела» при температуре окружающего воздуха. Средняя продолжительность такого скана составляла около 4,5 мин. Время усреднения выбиралось в зависимости от поставленной задачи и менялось от 1 часа (для анализа суточных вариаций содержания озона) до нескольких часов (для получения среднесуточных значений).

Измерения, результаты которых приведены в данной статье, проводились в течение 6 дней. Осадков не было, стояла обычная для данного района летняя погода, в дни измерений малооблачная. В результате измерений были получены спектры поглощения в линии озона с резонансной частотой 110836 МГц. На рис. 3 приведена панель восстановления высотного распределения озона по спектру дневного наблюдения за 25 июля.

В таблице приведен спектр поглощения озона, измеренный и рассчитанный по трехпараметрической модели вертикального профиля озона. Иначе говоря, это зависимость оптической толщины (поглощения) озона от частоты в единицах Непер. Ошибка в столбце – это погрешность измерения (тоже в Неперах). Она колеблется от 1 % в первом канале до 100 % в послед-

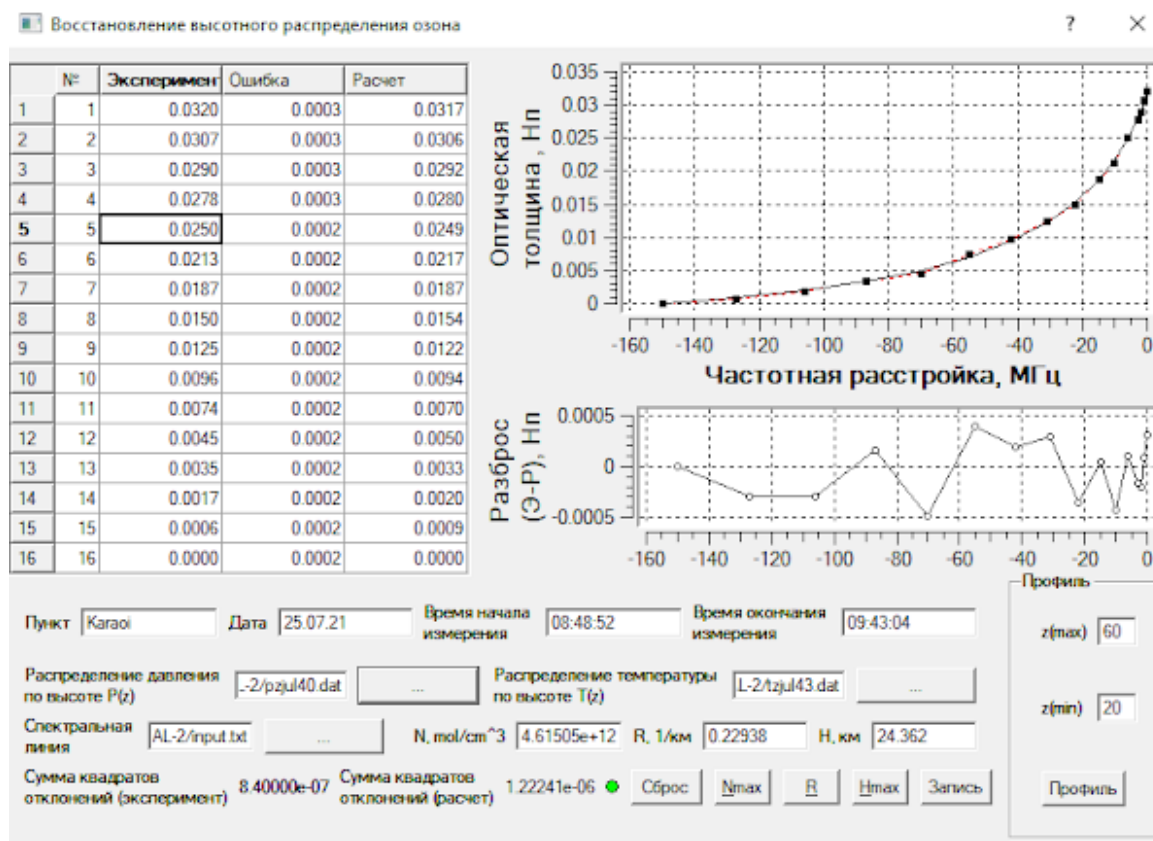


Рис. 3. Панель восстановления высотного распределения озона

Fig. 3. Altitude Ozone Recovery Panel

нем. Внизу таблицы приведена суммарная по всем каналам среднеквадратичная погрешность измерений $1,05 \times 10^{-6}$ ($1,05 \pm 10^{-6}$).

Полученные зависимости оптической толщины линии от частоты позволяют решить уравнение переноса теплового излучения в атмосфере относительно величины содержания озона на луче зрения, т. е. определить вертикальное распределение озона (ВРО). Связь измеряемой оптической толщины озона $\tau_{oz}(\nu)$ и его высотного профиля концентрации $N_{oz}(z)$ определяется известным уравнением Фредгольма 1-го рода:

$$\tau_{oz}(\nu) = \int N_{oz}(z) \cdot K(\nu, z) dz, \quad (1)$$

где $K(\nu, z)$ – весовая функция, описывающая конкретный вращательный переход.

В данном случае при регуляризации решения использовался метод подбора параметров заданной модели озонового слоя путем минимизации среднеквадратичных разностей измеренных спектров и рассчитанных по восстановленным профилям озона. Он основан на использовании априорной информации о характере вертикального распределении озона, которое задается аналитически в виде «параболического» слоя:

$$N_{oz}(z) = 4N_m \frac{\exp[(z - z_m)R]}{\{1 + \exp[(z - z_m)R]\}^2}. \quad (2)$$

Изменяя параметры слоя – концентрацию в максимуме N_m , высоту максимума z_m и фактор убывания концентрации R , а также используя методику последовательных приближений, достигли, чтобы в результате решения прямой задачи расчетный спектр $\Delta\tau_{oz}^c(\nu_i)$ был близок к экспериментальному $\Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)$, т. е. выполнялось условие

$$D = \sum_i [\Delta\tau_{oz}^c(\nu_i) - \Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]^2 = \min. \quad (3)$$

Из условия равенства нулю производных функционала D по N_m , z_m , R можно получить параметры искомого профиля. Критерием завершения процедуры подбора параметров озонового слоя является величина среднеквадратичных ошибок измерения спектра O_3 в каналах спектро радиометра – $\delta[\Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]$. На практике условие (3) сводится к следующему:

$$\sum_i [\Delta\tau_{oz}^c(\nu_i) - \Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]^2 \leq \sum_i \{\delta[\Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]\}^2. \quad (4)$$

В нашем случае характерное разрешение по высоте данного метода восстановления (ВРО) составляет около 10 км. В процедуре восстановления использовались как модельные зависимости давления и температуры от высоты, так и реальные, полученные в результате измерений в пункте микроволновых наблюдений. Точность восстановления ВРО зависит в основном от ошибок радиометрических измерений спектров озона и от погрешности определения профиля температуры. С помощью численного эксперимента были получены оценки влияния на точность восстановления ВРО ошибок первого типа путем добавления к измеренному спектру шума с дисперсией, равной дисперсии результатов измерений. Для типичных значений погрешности измерения спектров O_3 около 1 % разброс восстановленных профилей по 100 реализациям достигал 10 % в интервале высот 25–50 км. Для уровня 60 км погрешность восстановления увеличивалась до 30 %. Влияние возможных отклонений температурного профиля от реального профиля оценивается в 10–20 %. И, наконец, следует упомянуть о система-



Рис. 4. Высотное распределение озона
Fig. 4. Altitude distribution of ozone

тической погрешности измерений спектра, связанной с возникновением интерференционных эффектов в высокочастотном тракте приемника. В целом верхний предел неопределенности восстановления ВРО на высотах 30–50 км не превышает 20 %, увеличиваясь до 30 % на высоте 25 км и 40 % на высоте 60 км. Справедливость этих оценок подтверждают многочисленные результаты сопоставления наших данных с данными спутниковых измерений и другими наземными микроволновыми измерениями [2, 14].

По данным спектрам, которых в течение часа набирается около 12, определяются концентрация озона по высоте и содержания стратосферного озона. На рис. 4 представлен результат обработки усредненных за один час измерений, по нему можно определить суммарный озон в стратосфере в пределах высот 20–60 км, зоны максимальной его концентрации. В данном случае это – 5.398×10^{18} молекул в столбе от 20 до 60 км с сечением 1 см или 200 единиц Добсона ($1 \text{ е.Д.} \approx 2,687 \times 10^{16} \text{ молекул/см}^2$) и 24.4–25.2 км.

За другие дни данные измерений о содержании озона в слоях 20–30 и 30–60 км приведены в таблице. Здесь заметны превышения содержания озона в утренние часы над дневными на 3–5 %, обычный ли это процесс – предстоит еще выяснить. Для определения суточного хода содержания озона необходимы более длительные измерения. Ранее были замечены ночные превышения озона над дневными [14].

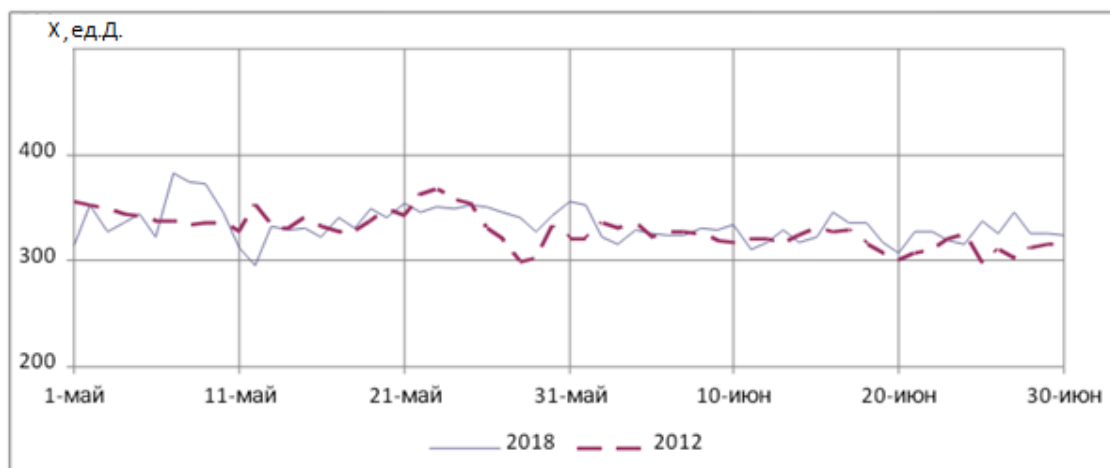
Содержание стратосферного озона по данным микроволновых измерений

Stratospheric ozone concentration according to microwave measurements

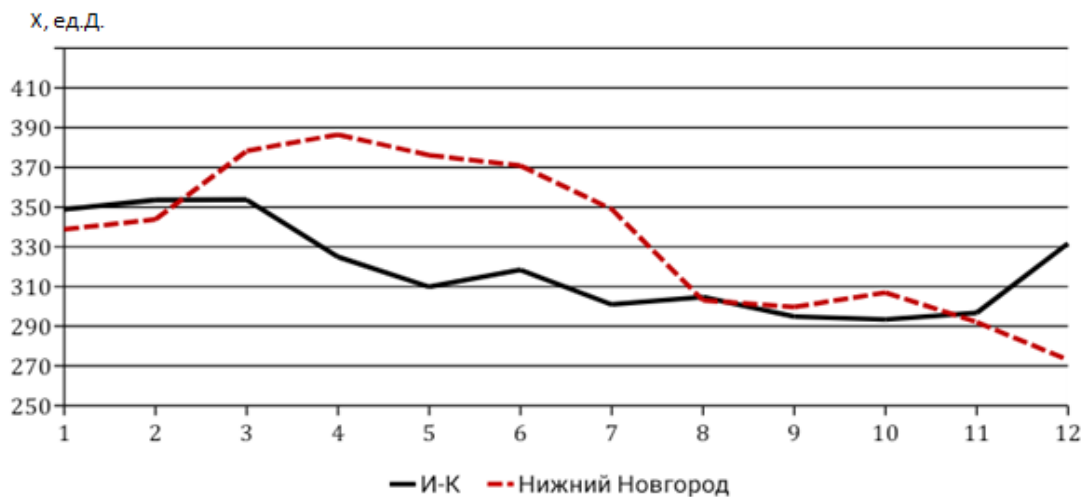
Дата	20.07.21	22.07.21	23.07.21	24.07.21	25.07.21	26.07.21
Местное время	17:38–19:19	18:40–19:58	9:25–10:19	10:06–11:05	8:48–9:43	8:22–9:14
X(20–30) км 10^{18} мол/см^2	3,671	3,684	3,646	3,630	3,797	3,772
X(30–60) км 10^{18} мол/см^2	1,635	1,583	1,925	1,639	1,601	1,675
X(20–60) км 10^{18} мол/см^2	5,306	5,267	5,571	5,269	5,398	5,447
X(20–60) км ед.Д.	197	195	206	195	200	202

Видно, что в столбе с сечением в один квадратный сантиметр от 20 до 30 км озона содержится почти вдвое больше, чем в находящемся выше 30. Известно, что в низких широтах основной максимум озонового слоя находится выше, чем в верхних. В нашем случае наиболее насыщенным озоном является интервал высот 22–35 км, что подтверждается многолетними наблюдениями.

По данным наземных станций [15], над районом измерений обсерватории (рис. 5, а) общее содержание озона составляет около 290–340 ед.Д. В верхних широтах, над другим районом наземных радиофизических измерений (Нижний Новгород), в весенне-летний период содержание озона больше (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Общее содержание X озона над районами наземных радиофизических измерений по данным [15]: а – над оз. Иссык-Куль; б – над двумя районами

Fig. 5. The total content of X ozone over the areas of ground-based radiophysical measurements according to the world network data [15]: а – over the lake. Issyk-Kul; б – over two districts

Таким образом, по данным обсерватории (см. таблицу), в пределах высот 20–60 км озона содержится около 65–75 % от всего общего содержания. В зависимости от поставленных задач по высотным распределениям озона в обсерватории отслеживаются суточный и сезонный ходы содержания стратосферного озона, а также его межгодовые вариации.

Список литературы

1. Вдовин В. Ф., Зинченко И. И., Кисляков А. Г., Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Носов В. И., Носова Е. В., Рыскин В. Г., Орозобаков А. Т., Орозобаков Т. О., Орехов Ю. И., Шкелев Е. И., Хохрин Л. П. Обсерватория для мониторинга озонового слоя земли в мм диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. Первые наблюдения // Меж-

- дународный симпозиум «Физика атмосферы: Наука и образование». 11–13 сент. 2007 г. Санкт-Петербург, 2007. С. 118–122.
2. **Орозобаков Т. О., Зинченко И. И., Рыскин В. Г., Орозобаков А. Т.** Об особенностях распределения озона в стратосфере по результатам одновременных наземных микроволновых измерений в Нижнем Новгороде и Кыргызстане // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 24–32.
 3. **Орозобаков Т. О., Кисляков А. Г., Орехов Ю. И., Орозобаков А. Т. и др.** Мониторинг озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Центральноазиатском регионе // Известия НАН КР. 2008. № 1. С. 44–46.
 4. **Кисляков А. Г., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г.** Поглощение микрорадиоволн примесными газами атмосферы // Труды ИПФ АН СССР / Сб. «Спектральные исследования космического и атмосферного излучения». Горький, 1979. С. 84–123.
 5. **Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н., Пономаренко Н. И., Розанов С. Б.** О вариациях атмосферного озона на миллиметровых волнах // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 8. С. 525–531.
 6. **Соломонов С. В., Гайкович К. П., Кропоткина Е. П.** Определение вертикального профиля атмосферного озона по наземным измерениям излучения в миллиметровом диапазоне // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 1. С. 86–95.
 7. **Кропоткина Е. П., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г., Соломонов С. В.** Исследование изменений вертикального распределения озона над Москвой и Апатитами на миллиметровых волнах // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 11. С. 10–11.
 8. **Токтомышев С. Ж.** Об измерении концентрации атомарных частиц кислорода в диссоциированных газах // Журнал прикладной механики и технической физики. 1970. № 1. С. 146–149.
 9. **Семенов В. К., Синяков В. П., Токтомышев С. Ж.** Соотношение между общим содержанием озона и солнечной УФ-В радиации в районе озера Иссык-Куль // Семинар «Конверсионный потенциал Кыргызской Республики и проекты МНТЦ», 7–12 сентября 1998.
 10. **Токтомышев С. Ж., Колбаев К. Б., Семенов В. К., Синяков В. П.** Озоновый слой и геоморфологические процессы горного региона Кыргызского Тянь-Шаня // Известия НАН КР. 2007. № 4. С. 49–67.
 11. **Чен Б. Б., Петров Ю. М.** Некоторые вопросы организации климатического мониторинга стратосферного аэрозоля в Киргизии // Материалы IV съезда ГО Кирг. ССР. Фрунзе: Илим, 1985. С. 77–79.
 12. **Орозобаков А. Т., Саякбаева Б. Б.** Наблюдения стратосферного озона над оз. Иссык-Куль радиоастрономическими методами в миллиметровом диапазоне длин волн // Наука и новые технологии. 2009. № 3. С. 276–279.
 13. **Орозобаков А. Т., Саякбаева Б. Б., Токтосунов Э. К.** Наземные измерения высотного распределения озона на миллиметровых волнах в Иссыккульской обсерватории // Наука и новые технологии. 2020. № 4. С. 3–9.
 14. **Орозобаков А. Т., Рыскин В. Г.** Микроволновые наземные измерения суточных вариаций озона в верхней стратосфере над Киргизией // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. № 1. Т. 51. С. 88–95.
 15. Scientific assessment of ozone depletion: 1998. WMO. Global ozone research and monitoring project // Report No. 44. Geneva. WMO. 1999.

References

1. **Vdovin V. F., Zinchenko I. I., Kislyakov A. G., Krasilnikov A. A., Kulikov Yu. Yu., Nosov V. I., Nosova E. V., and Ryskin V. G., Orozobakov A. T., Orozobakov T. O., Orekhov Yu. I., Shkelev E. I., Khokhrin L. P.** Observatory for monitoring the earth's ozone layer in the mm

- wavelength range in the Central Asian region. First observations // International Symposium «Atmospheric Physics: Science and Education». September 11-13, 2007. St. Petersburg, 2007, pp.118-122.
2. **Orozobakov T. O., Zinchenko I. I., Ryskin V. G., Orozobakov A. T.** On the features of ozone distribution in the stratosphere based on the results of simultaneous ground-based microwave measurements in Nizhny Novgorod and Kyrgyzstan // *Meteorology and Hydrology*. 2012. No. 10. P. 24–32.
 3. **Orozobakov T. O., Kislyakov A. G., Orekhov Yu. I., Orozobakov A. T.** et al. Monitoring of the Earth's ozone layer in the millimeter wave range in the Central Asian region // *Izvestiya NAS KR*. 2008. № 1. P. 44-46.
 4. **Kislyakov A. G., Kulikov Yu. Yu., and Ryskin V. G.** Absorption of microradio waves by impurity gases of the atmosphere // *Proceedings of the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR. Collection «Spectral studies of cosmic and atmospheric radiation»*. Gorky, 1979. P. 84-123.
 5. **Solomonov S. V., Kropotkina E. P., Lukin A. N., Ponomarenko N. I., and Rozanov S. B.** On atmospheric ozone variations at millimeter waves // *Izv. AN. Physics of the atmosphere and ocean*. 1993. Vol. 29. No. 8. P. 525-531.
 6. **Solomonov S. V., Gaikovich K. P., Kropotkina E. P.** Determination of the vertical profile of atmospheric ozone from ground-based measurements of radiation in the millimeter range // *Izvestiya AN Atmospheric and oceanic physics*. 1999. Vol. 35, iss. 1. P. 86-95.
 7. **Kropotkina E. P., Kulikov Yu. Yu., Ryskin V. G., Solomonov S. V.** Study of changes in the vertical distribution of ozone over Moscow and Apatity on millimeter waves // *Izvestiya VUZov. Radiophysics*. 2005. Vol.11. P. 10-11.
 8. **Toktomyshev S. Zh.** On measuring the concentration of atomic oxygen particles in dissociated gases // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1970. No. 1. P. 146-149.
 9. **Semenov V. K., Sinyakov V. P., Toktomyshev S. Zh.** Correlation between total ozone and solar UV-B radiation in the area of the Lake Issykkul // *Seminar «Conversion potential of the Kyrgyz Republic and ISTC projects»*, 7-12 September 1998.
 10. **Toktomyshev S. Zh., Kolbaev K. B., Semenov V. K., Sinyakov V. P.** Ozone layer and geomorphological processes of the mountainous region of the Kyrgyz Tien Shan // *Izvestiya NAS KR*. 2007. No. 4. P. 49–67.
 11. **Chen B. B., Petrov Yu. M.** Some issues of organizing climate monitoring of stratospheric aerosol in Kyrgyzstan // *Materials of the IV congress of GO Kirg. SSR*. Frunze: Ilim, 1985. P. 77–79.
 12. **Orozobakov A. T., Sayakbaeva B. B.** Observations of stratospheric ozone over Lake Issyk-Kul by radio astronomical methods in the millimeter wavelength range // *Science and New Technologies*. 2009. No. 3. P. 276–279.
 13. **Orozobakov A. T., Sayakbaeva B. B., Toktosunov E. K.** Ground-based measurements of the altitude distribution of ozone at millimeter waves in the Issyk-Kul Observatory // *Science and New Technologies*. 2020. No. 4. P. 3–9.
 14. **Orozobakov A. T., Ryskin V. G.** Microwave ground-based measurements of diurnal ozone variations in the upper stratosphere over Kyrgyzstan // *Izvestiya RAS Physics of the atmosphere and ocean*. 2015. No. 1, vol. 51. P. 88–95.
 15. Scientific assessment of ozone depletion: 1998. WMO. Global ozone research and monitoring project // Report No. 44. Geneva. WMO. 1999.

Сведения об авторах

Алманбет Токтосунович Орозобаков, кандидат физико-математических наук

Бурул Бапаевна Саякбаева, кандидат физико-математических наук

Эрмек Учтурукович Орозобаков, инженер

Аманкулова Нургуль Асимкановна, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Almanbet T. Orozobakov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Burul B. Sayakbayeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Ermek U. Orozobakov, Engineer

Nurgul A. Amankulova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 25.10.2022; одобрена после рецензирования 13.05.2023;
принята к публикации 12.09.2023*

*The article was submitted 25.10.2022; approved after reviewing 13.05.2023;
accepted for publication 12.09.2023*

Научная статья

УДК 535.015

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

**Разработка и апробация автокоррелятора
для измерения длительности пикосекундных импульсов излучения
ближнего инфракрасного диапазона**

**Владислав Михайлович Борин^{1,2,3}, Петр Борисович Горностаев⁴,
Олег Игоревич Мешков^{1,2}, Александр Сергеевич Кучьянов⁵,
Станислав Владимирович Рева^{1,2}**

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

⁴Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
Москва, Россия

⁵Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия

V.M.Borin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8317-5855>
vor@kapella.gpi.ru

O.I.Meshkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-6304-7525>
aleks@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5292-2555>
s.reva@g.nsu.ru

Аннотация

В работе представлена схема автокоррелятора, изготовленного для измерения длительности инфракрасных пикосекундных импульсов излучения 3-го лазера установки «Новосибирский лазер на свободных электронах», а также результаты тестирования автокоррелятора при измерении длительности пикосекундных импульсов в видимом диапазоне.

Ключевые слова

лазер на свободных электронах, интерферометрия, автокорреляция, длительность, инфракрасный, пикосекунда.

Для цитирования

Борин В. М., Горностаев П. Б., Мешков О. И., Кучьянов А. С., Рева С. В. Разработка и апробация автокоррелятора для измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 16–25. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

Development and Testing of an Autocorrelator for Measuring the Duration of Picosecond Pulses of Near-infrared Radiation

Vladislav M. Borin^{1,2,3}, Petr B. Gornostaev⁴, Oleg I. Meshkov^{1,2},
Alexandre S. Kuch'yanov⁵, Stanislav V. Reva^{1,2}

¹Institute of Nuclear Physics of the SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

⁴Prokhorov General Physics Institute of the RAS
Moscow, Russian Federation

⁵Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

V.M.Borin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8317-5855>
vor@kapella.gpi.ru

O.I.Meshkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-6304-7525>
aleks@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5292-2555>
s.reva@g.nsu.ru

Abstract

A scheme of an autocorrelator developed for measuring the duration of picosecond pulses of infrared radiation from the 3rd Novosibirsk Free Electron Laser is presented, as well as the results of approbation of the autocorrelator when measuring the duration of picosecond pulses in the visible range.

Keywords

Free Electron Laser, interferometry, autocorrelation, pulse length, infrared, picosecond

For citation

Borin V. M., Gornostaev P. B., Meshkov O. I., Kuchyanov A. S., Reva S. V. Development and testing of an autocorrelator for measuring the duration of picosecond pulses of near-infrared radiation. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 16–25 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-16-25

Введение

Третий лазер Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) установлен на 4-й дорожке ускорителя-рекуператора (рис. 1), его магнитная структура достаточно сложна: пучки электронов имеют различный энергетический разброс на разных дорожках ускорителя, кроме того в ускорителе находятся одновременно несколько пучков электронов, ускоряющихся и замедляющихся.

Условия генерации лазерного излучения на четвертой дорожке Новосибирского ЛСЭ накладывают строгие требования на параметры электронного пучка и настройку ускорителя [1], поэтому оптимальная работа лазера невозможна без оперативного измерения параметров электронных пучков и лазерного излучения. Одними из основных характеристик лазерного излучения является временная и спектральная ширина сигнала. В данный момент существует возможность измерения только спектральных характеристик и средней мощности излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. Измерение длительности импульса излучения является важным для пользователей установки, однако до сих пор провести такие измерения не удалось.

Одна из основных проблем, связанных с диагностикой параметров излучения Новосибирского ЛСЭ, – отсутствие в нашем распоряжении готовых измерительных приборов, способных

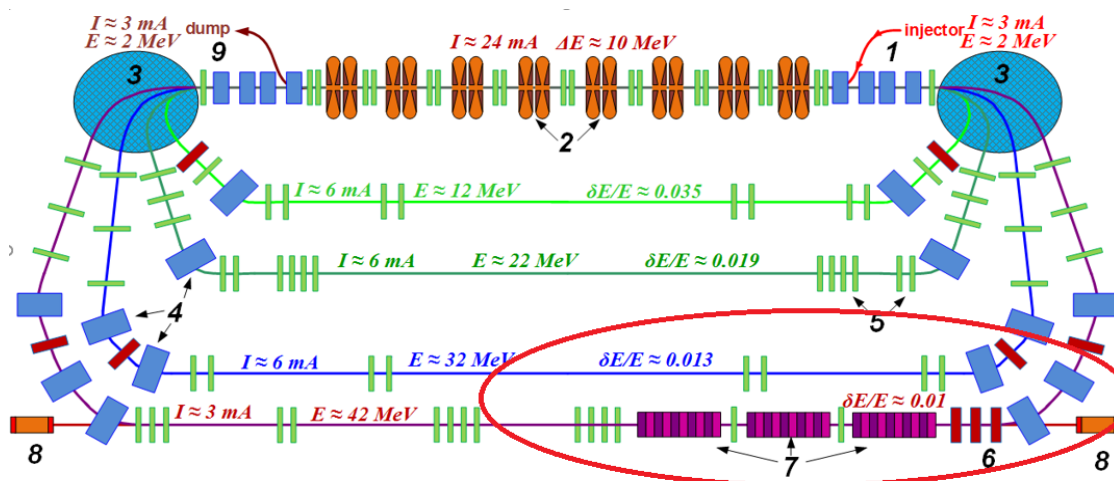


Рис. 1. Схема Новосибирского лазера на свободных электронах: 1 – инжектор электронов; 2 – ускоряющая секция; 3 и 4 – дипольные магниты; 5 и 6 – квадрупольные линзы; 7 – ондуляторы; 8 – зеркала оптического резонатора ЛСЭ; 9 – поглотитель электронов. На схеме показаны примерные значения энергий, токов и энергетических разбросов пучков на разных дорожках. Красным отмечена область размещения диагностических станций для измерения параметров пучков

Fig. 1. Layout of the Novosibirsk free electron laser: 1 – electron injector, 2 – accelerating section; 3, 4 – dipole magnets; 5, 6 – quadrupole lenses; 7 – undulators; 8 – FEL optical cavity mirrors; 9 – electron beam dump. The figure shows approximate values of energies, currents and energy spreads of beams on different tracks. The area where diagnostic stations are located for measuring beam parameters is marked in red

Таблица 1

Параметры третьего лазера Новосибирского ЛСЭ

Table 1

Parameters of the third laser of the Novosibirsk FEL

Диапазон длин волн, мкм	8–11
Рабочая частота повторения пучков, МГц	3,76
Максимальная средняя мощность, кВт	0,1
Энергия пучка, МэВ	38–42
Средний ток, мА	3

измерить длительность пикосекундных импульсов в диапазоне длин волн генерации лазера. Для решения данной проблемы была разработана оптическая схема автокоррелятора, основанная на оптических компонентах, имеющихся в нашем распоряжении.

1. Автокорреляционное измерение длительности импульса излучения

Одним из наиболее распространенных методов оптических измерений является измерение корреляционных функций [2]. Корреляционная функция двух комплексных функций $f(x)$ и $g(x)$ определяется следующим образом:

$$(f * g)(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g^*(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где g^* обозначает комплексно-сопряженную функцию к g . Корреляционная функция показывает степень сходства между одним сигналом и другим сигналом для разных значений τ –

чем больше значение корреляционной функции, тем это сходство сильнее. Если $f(t) = g(t)$, то такая функция называется автокорреляционной функцией. В оптике автокорреляционная функция электромагнитных полей обычно называется автокорреляционной функцией первого порядка $A(\tau)^{(1)}$:

$$A(\tau)^{(1)} = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)E^*(t - \tau) dt. \quad (2)$$

Для регистрации автокорреляционной функции первого порядка необходимо поделить сигнал и направить на приемник излучения обе составляющие с изменяемой задержкой во времени относительно друг друга. Результирующий сигнал, регистрируемый детектором, позволяет определить автокорреляционную функцию. В оптике для таких измерений хорошо подходят интерферометрические методы. Согласно теореме Винера – Хинчина [3] автокорреляционная функция сигнала первого порядка связана с его частотным спектром излучения $I(\omega)$ через Фурье-преобразование:

$$F(\tau) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega)e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (3)$$

Для импульса с гауссовой формой можно получить следующее соотношение между длительностью автокорреляционной функции первого порядка и шириной спектра:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\sigma_{\omega}} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi c \sigma_{\lambda}}. \quad (4)$$

Автокорреляционная функция интенсивности обычно называется автокорреляционной функцией второго порядка $A(\tau)^{(2)}$:

$$A(\tau)^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I^*(t - \tau) dt. \quad (5)$$

Длительность автокорреляционной функции второго порядка τ_{ac} связана с длительностью исходного импульса τ_p следующим соотношением:

$$\tau_{ac} = k\tau_p, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы импульса. Коэффициент можно рассчитать из уравнения (5), для импульса гауссовой формы $k = \sqrt{2}$, для импульса формы гиперболического секанса, часто встречающегося в лазерной физике, $k = 1,543$.

Таким образом, измерив автокорреляционную функцию первого и второго порядка, можно определить соответственно спектральную ширину и длительность импульса излучения.

Схема предложенного автокоррелятора для измерений длительности импульса на Новосибирском ЛСЭ представлена на рис. 2. Предложенная схема по устройству близка к схеме интерферометра Майкельсона [4], однако плечи интерферометра представляют собой тонкие плоские зеркала, расположенные в направлении распространения излучения и разнесенные в поперечной, к излучению плоскости относительно друг друга, для получения двух отдельных импульсов излучения. Изменение положения одного из зеркал, установленного на моторизованной подставке, позволяет контролировать длину пути одного из лучей и, соответ-

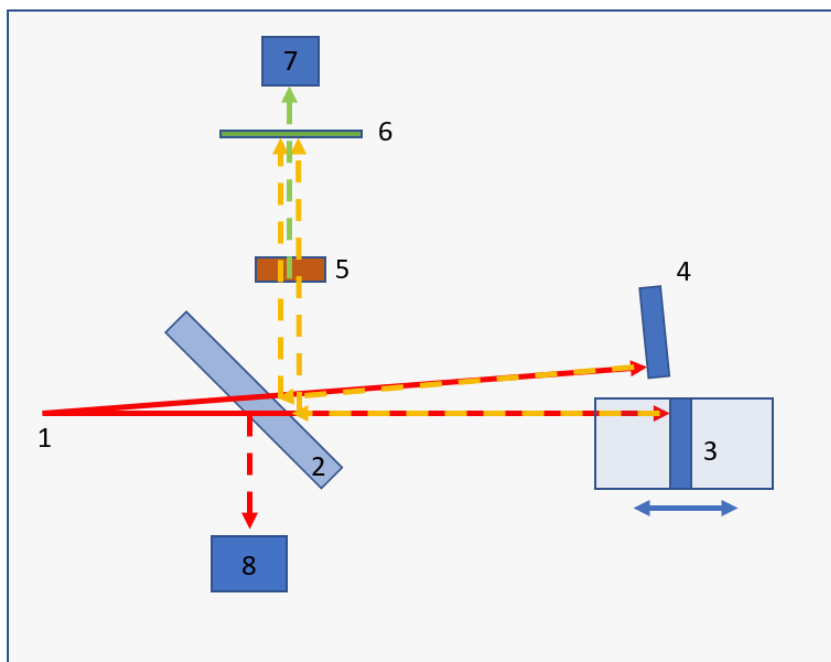


Рис. 2. Предложенная оптическая схема для измерения автокорреляционных функций: 1 – излучение от источника; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – зеркало на моторизированной подставке; 4 – неподвижное зеркало; 5 – нелинейный кристалл; 6 – полосовой фильтр; 7 – детектор излучения; 8 – место для установки дополнительной диагностики основной гармоники излучения

Fig. 2. Proposed optical scheme for measuring of autocorrelation functions: 1 – radiation from the source; 2 – translucent mirror; 3 – mirror on a motorized stand; 4 – fixed mirror; 5 – nonlinear crystal; 6 – bandpass filter; 7 – detector; 8 – place for installing additional diagnostics of the fundamental radiation harmonic

ственно, его временную задержку относительно другого. Смещение зеркала на длину a вносит задержку $\tau = \frac{2a}{c}$, где c – скорость света.

Свет от источника излучения (1) проходит через полупрозрачное зеркало (2) и после отражения от плеч интерферометра (3, 4) лучи направляются полупрозрачным зеркалом в направлении нелинейного кристалла (5). Для измерений на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ был выбран кристалл дифосфида цинка-германия (ZnGeP_2)¹, который имеет квадратичную нелинейность и предназначен для работы в диапазоне длин волн излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. В нелинейном кристалле происходит генерация второй гармоники излучения, а ее интенсивность на выходе из нелинейного кристалла пропорциональна произведению квадратов поля интерферирующих в нем электромагнитных волн, т. е. произведению их интенсивностей [5]:

$$I_{SH}(\tau) \propto I^2(t) + I^2(t - \tau) + 4I(t - \tau)I(t), \quad (7)$$

где I_{SH} – интенсивность второй гармоники, I – интенсивность изучаемого импульса. Если импульсы приходят в кристалл с большой задержкой, то имеются лишь отдельные сигналы генерации второй гармоники от пришедших импульсов, а если задержка сопоставима с длительностью импульса, то появляется слагаемое, отражающее степень наложения интенсивностей $I(t)$

¹ См.: <http://loc-ltd.com/zngcp2/>

импульсов (рис. 3). Измеряя зависимость интенсивности излучения второй гармоники от задержки τ , можно восстановить длительность импульса.

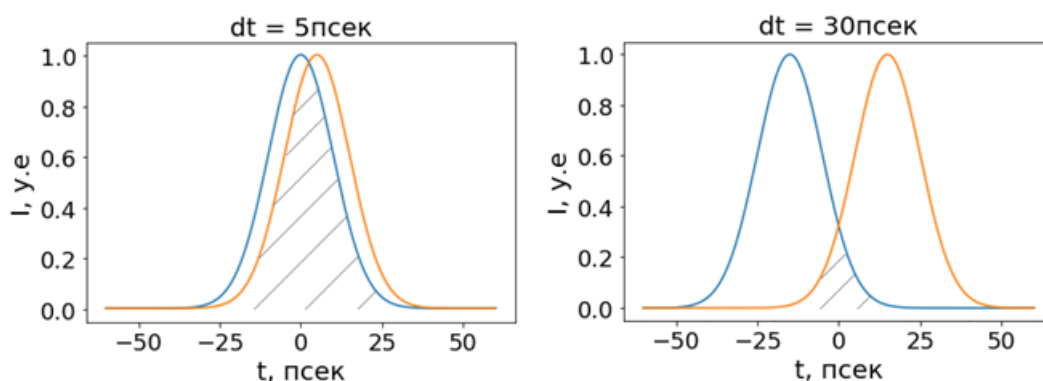


Рис. 3. Наложение интенсивностей импульсов излучения. Заштрихованная часть – область перекрытия импульсов
Fig. 3. Overlap of radiation pulse intensities. The shaded part is the area of pulse overlap

При первоначальной юстировке схемы путем изменения положения зеркала, установленного на моторизированной подставке, соосность зеркал проверяется по отсутствию изменения положения изображения на приемнике излучения во время изменения положения зеркала, установленного на моторизированной подставке, управляемой шаговым двигателем. Максимальная интенсивность излучения второй гармоники достигается за счет небольшого поворота неподвижного зеркала для достижения максимального перекрытия световых потоков, отраженных от разных зеркал. Интенсивность второй гармоники регистрируется с помощью болометрической матрицы (7 на рис. 2). Частота второй гармоники вдвое больше частоты изначального излучения (основная гармоника), которое в большинстве своем проходит через кристалл в неизменном виде. Поэтому перед матрицей располагается полосовой фильтр, не пропускающий исходный импульс. Поскольку время экспозиции одного кадра у болометрической матрицы много больше длительности импульса излучения, то возможно только интегральное измерение всего излучения второй гармоники, сгенерированного за один лазерный импульс. В таком случае регистрируемый матрицей сигнал является усреднением выражения (7) по большому числу периодов, усреднение же перекрестного слагаемого представляет собой автокорреляционную функцию второго порядка. Для регистрации автокорреляционной функции изображения с болометрической матрицы регистрируются при различных задержках сигнала τ , и из полученной автокорреляционной функции вычисляется длительность импульса. Среди положительных особенностей предложенной схемы измерения автокорреляционной функции стоит отметить: простоту процедуры юстировки схемы, отсутствие дорогостоящих оптических элементов, возможность легко перестроить схему для работы в другом диапазоне длин волн, возможность измерения импульсов с длительностью меньше 1 псек, так как минимальный шаг смещения механизированной подставки составляет 1,4 мкм, что соответствует задержке оптического сигнала порядка 10 фс.

2. Проверка работоспособности автокоррелятора в оптическом диапазоне

Предложенная схема была протестирована на неодимовом лазере с длительностью импульса порядка 10 пикосекунд по основанию с длиной волны излучения 1064 нм [6; 7]. Помимо автокоррелятора, длительность импульса лазерного излучения измерялась с помощью стрик-камеры PS-1/S20 с разрешающей способностью порядка 1 пс.

Схема эксперимента представлена на рис. 4.

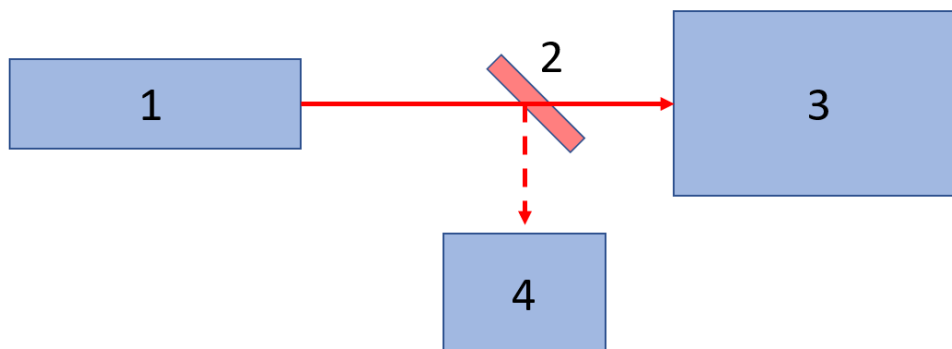


Рис. 4. Схема эксперимента по измерению на пикосекундном лазере с длиной волны 1064 нм: 1 – лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – схема для измерения автокорреляционной функции; 4 – дополнительный детектор излучения / стрик-камера

Fig. 4. Schematic of the 1064 nm picosecond laser measurement experiment: 1 – Laser; 2 – translucent mirror; 3 – scheme for measuring the autocorrelation function; 4 – additional detector/streak camera

Для проведения измерений в оптическом диапазоне был использован нелинейный кристалл бета-бората бария (β -BaB₂O₄)², а в качестве детектора излучения использовалась цифровая ПЗС-камера. Интенсивность импульсов лазера дополнительно контролировалась детектором (8) (рис. 3).

Во время экспериментов с помощью предложенной схемы была проведена регистрация длительности автокорреляционной функции второго порядка. Излучение первой гармоники лазера отсекалось фильтром СЗС-23. Одновременно с измерениями автокорреляционным методом часть света через дополнительное полупрозрачное зеркало направлялась на стрик-камеру (4) (рис. 4) для прямой регистрации временного профиля импульса лазерного излучения.

3. Результаты апробации автокорреляционной схемы

Измеренная с помощью стрик-камеры длительность импульса неодимового лазера в серии из 40 измерений составляет $3,4 \pm 0,5$ пс, точность измерения в данном эксперименте определялась разрешающей способностью стрик-камеры. Пример полученного временного профиля лазерного импульса представлен на рис. 5.

Измерения с нелинейным кристаллом позволили измерить автокорреляционную функцию второго порядка, представленную на рис. 6.

Измеренная длительность автокорреляционной функции второго порядка (5) составила $5,4 \pm 1,2$ пс, таким образом длительность импульса лазерного излучения, определенная по измеренной автокорреляционной функции с помощью соотношения (6), составляет $3,6 \pm 0,8$ пс, что в пределах погрешности измерений совпадает со значением, полученным с помощью стрик-камеры. Кроме того, для наглядности совпадения полученных результатов на рис. 6 показана автокорреляционная функция второго порядка для профиля интенсивности пучка, показанного на рис. 5, совпадение между расчетной и измеренной автокорреляционными функциями находится в пределах ошибки измерений. Таким образом, можно заключить, что предложенная схема позволяет измерять длительность импульсов лазерного излучения с точностью не хуже, чем 1 пс.

² См.: <http://ru.sdhengjing1.com/beta-barium-borate-product/>

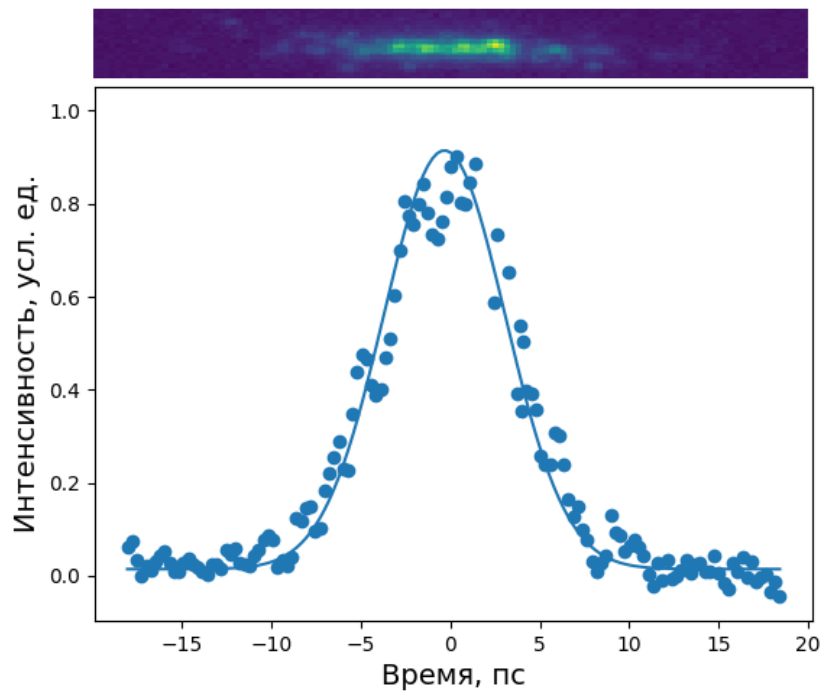


Рис. 5. Профиль лазерного импульса, зарегистрированный стрик-камерой
 Fig. 5. Laser pulse profile recorded by streak camera

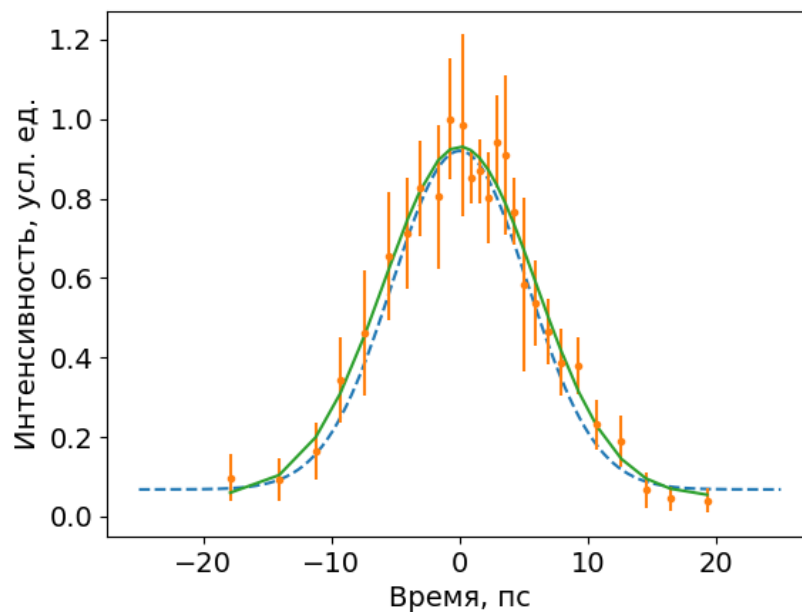


Рис. 6. Измеренная автокорреляционная функция второго порядка импульса неодимового лазера (оранжевый), ее аппроксимация (зеленый) и расчетная автокорреляционная импульса, зарегистрированного стрик-камерой (синий пунктир)

Fig. 6. Measured second-order autocorrelation function of a neodymium laser pulse (orange), its approximation (green) and calculated second-order autocorrelation function of the streak camera pulse (blue dotted line)

Помимо проверки возможности предложенной оптической схемы, на данный момент с использованием этой схемы автокоррелятора измерена автокорреляционная функция первого порядка для третьего лазера Новосибирского ЛСЭ (рис. 7).

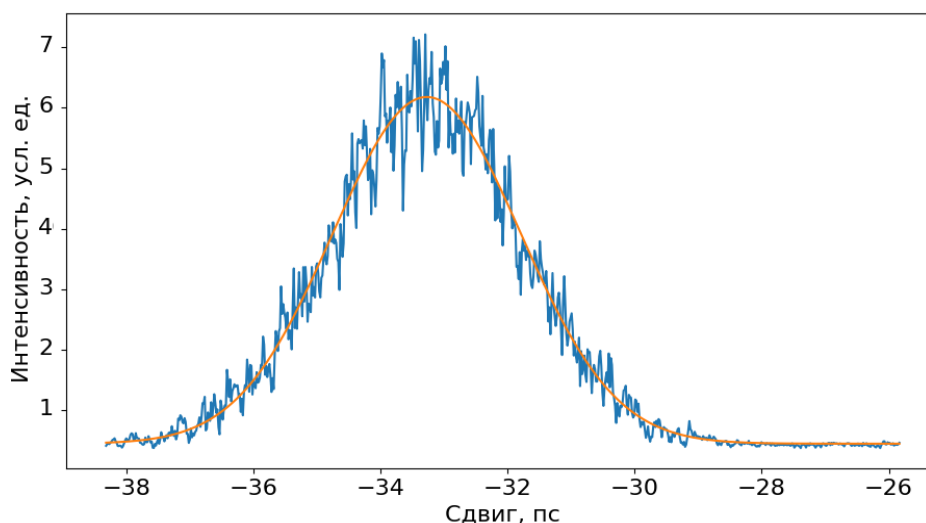


Рис. 7. Автокорреляционная функция первого порядка, измеренная на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ
Fig. 7. First-order autocorrelation function measured at the third laser of the Novosibirsk FEL

Измеренная функция хорошо аппроксимируется гауссовой формой с длительностью $\sigma_\tau = 2,4 \pm 0,2$ псек. Воспользовавшись соотношением (4) и параметрами измеренного монохроматора спектра излучения, получим ожидаемую длительность автокорреляционной функции излучения $\sigma_\tau = 2,5 \pm 0,2$ псек. Два разных метода измерений хорошо согласуются между собой, что также подтверждает корректность работы предложенной схемы автокоррелятора.

Заключение

В результате экспериментов была успешно апробирована схема измерения длительности пикосекундных импульсов излучения ближнего инфракрасного диапазона. Измерения спектральной ширины, проведенные с использованием данной схемы на Новосибирском ЛСЭ, находятся в согласии с прямым измерением спектральной ширины, проведенным ранее [8]. В дальнейшем данная схема автокоррелятора будет использоваться с кристаллом дифосфида цинка-германия (ZnGeP_2) для измерений длительности лазерного импульса третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.

Список литературы

1. **Shevchenko O. A. et al.** Current status of the Novosibirsk infrared FEL and the third stage lasing // Phys. Part. Nuclei Lett. 2016. Vol. 13. P. 1002–1005.
2. **Yaglom A. M.** An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice–Hall, 1962.
3. **Wiener N.** Time Series. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964. P. 42.
4. **Michelson A., Morley E.** On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether // American Journal of Science. 1887. Vol. 34 (203). P. 333–345.
5. **Trebino R.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses : монография / R. Trebino. New York: Springer, 2002. 425 p.
6. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S., Ugozhaev V. D.** Generation of stationary ultrashort pulses by a passive mode-locking solid state laser // Optics communications. 1986. Vol. 5, № 4. P. 279–284.

7. **Комаров К. П., Кучьянов А. С.** О предельной длительности УКИ света, генерируемых твердотельными лазерами в режиме пассивной синхронизации мод // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 2. С. 207–210.
8. **Getmanov Ya. et al.** Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility // JINST. 2020. Vol. 15. P. T06004.

References

1. **Shevchenko O. A. et al.** Current status of the Novosibirsk infrared FEL and the third stage lasing // Phys. Part. Nuclei Lett. 2016. Vol. 13. P. 1002–1005.
2. **Yaglom A. M.** An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice–Hall, 1962.
3. **Wiener N.** Time Series. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964. P. 42.
4. **Michelson A., Morley E.** On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether // American Journal of Science. 1987. Vol. 34 (203). P. 333–345.
5. **Trebino R.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses : монография / R. Trebino. New York: Springer, 2002. 425 p.
6. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S., Ugozhaev V. D.** Generation of stationary ultrashort pulses by a passive mode-locking solid state laser // Optics communications. 1986. Vol. 5, № 4. P. 279–284.
7. **Komarov K. P., Kuch'yanov A. S.** On the limiting duration of UKI light generated by solid-state lasers in the mode of passive mode synchronisation // Quantum Electronics. 1991. Vol. 18, no. 2. P. 207–210.
8. **Getmanov Ya. et al.** Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility // JINST. 2020. Vol. 15. P. T06004.

Сведения об авторах

Борин Владислав Михайлович, младший научный сотрудник

Горностаев Петр Борисович, кандидат физико-математических наук

Мешков Олег Игоревич, доктор физико-математических наук

Кучьянов Александр Сергеевич, кандидат физико-технических наук

Рева Станислав Владимирович, старший лаборант

Information about the Authors

Vladadislav M. Borin, Research Assistant

Petr B. Gornostaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Oleg I. Meshkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Alexander S. Kuch'yanov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Stanislav V. Reva, Senior Laboratory Assistant

*Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023;
принята к публикации 19.07.2023*

*The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 18.07.2023;
accepted for publication 19.07.2023*

Научная статья

УДК 621.314

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

Система вывода энергии из сверхпроводящего соленоида с током 5100 А и запасенной энергией 22 МДж

**Александр Иванович Ерохин¹, Артём Андреевич Кремнев²,
Виталий Аркадьевич Шкаруба³, Евгений Эдуардович Пята⁴,
Александр Витальевич Булатов⁵, Татьяна Васильевна Бедарева⁶**

¹⁻⁶ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹A.I.Erokhin@inp.nsk.su

²A.A.Kremnev@inp.nsk.su

³V.A.Shkaruba@inp.nsk.su

⁴E.E.Pyata@inp.nsk.su

⁵A.V.Bulatov@inp.nsk.su

⁶T.V.Bedareva@inp.nsk.su

Аннотация

На строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) одним из ключевых является эксперимент PANDA. Основное поле спектрометра детектора PANDA обеспечивается сверхпроводящим соленоидом. Энергия магнитного поля, запасенная в сверхпроводящем соленоиде, достигает 22 МДж при рабочем токе 5100 А. В случае перехода сверхпроводящего кабеля, из которого состоит обмотка соленоида, в резистивное состояние для защиты магнита требуется безопасный вывод запасенной энергии. Предложенная авторами система обеспечивает своевременный вывод и диссипацию энергии во внешнем балластном резисторе, а не только на участке сверхпроводящего кабеля, перешедшего в резистивное состояние, предотвращая при этом его повреждение. Наиболее ответственными элементами системы вывода энергии являются размыкатель тока, с помощью которого в цепь питания сверхпроводящего соленоида вводится балластный резистор, и сам балластный резистор. В качестве размыкателя тока выбран модернизированный трехфазный автоматический выключатель. Разработана уникальная конструкция системы вывода энергии и балластного резистора с низкой паразитной индуктивностью.

Ключевые слова

сверхпроводящий соленоид, запасенная энергия магнитного поля, резистивное состояние сверхпроводящего кабеля, система вывода энергии, балластный резистор, размыкатель тока

Для цитирования

Ерохин А. И., Кремнев А. А., Шкаруба В. А., Пята Е. Э., Булатов А. В., Бедарева Т. В. Система вывода энергии из сверхпроводящего соленоида с током 5100 А и запасенной энергией 22 мДж // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 26–35. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

© Ерохин А. И., Кремнев А. А., Шкаруба В. А., Пята Е. Э., Булатов А. В., Бедарева Т. В., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2
Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Energy Extraction System for the Superconductive Solenoid with Current 5100 A and Stored Energy 22 MJ

Alexandr I. Erokhin¹, Artem A. Kremnev², Vitaly A. Shkaruba³,
Eugeny E. Pyata⁴, Alexandr V. Bulatov⁵, Tatyana V. Bedareva⁶

¹⁻⁶Budker Institute of Nuclear Physics
Of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science
Novosibirsk, Russian Federation

¹A.I.Erokhin@inp.nsk.su

²A.A.Kremnev@inp.nsk.su

³V.A.Shkaruba@inp.nsk.su

⁴E.E.Pyata@inp.nsk.su

⁵A.V.Bulatov@inp.nsk.su

⁶T.V.Bedareva@inp.nsk.su

Abstract

At the FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt, Germany) accelerator complex under construction, one of the key experiments is the PANDA experiment. The main field of the PANDA spectrometer is provided by a superconducting solenoid. The energy of the magnetic field stored in a superconducting solenoid reaches 22 MJ at an operating current of 5100 A. In the case of the transition of the superconducting cable used for the solenoid winding into a resistive state, the safe extraction of stored energy is required to protect the magnet. The energy extraction system proposed by the authors provides energy dissipation inside the external dump resistor, and not in the section of the superconducting cable that has passed into resistive state, while preventing its damage. The most critical elements of the energy extraction system are the current breaker, with the help of which the dump resistor is introduced into the power circuit of the superconducting solenoid, and the dump resistor itself. A modernized three-phase circuit breaker was chosen as current breaker. A unique design of the energy extraction system including dump resistor with a low parasitic inductance has been developed.

Keywords

superconducting solenoid, stored magnetic field energy, resistive state of superconducting cable, energy extraction system, dump resistor, current breaker

For citation

Erokhin A. I., Kremnev A. A., Shkaruba V. A., Pyata E. E., Bulatov A. V., Bedareva T. V. Energy extraction system for the superconductive solenoid with current 5100 A and stored energy 22 MJ. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 26–35 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

Введение

Сверхпроводящий соленоид (далее – магнит) детектора PANDA питается от источника тока 5100 А [1]. Общая блок-схема питания магнита представлена на рис. 1. В случае срыва сверхпроводимости (перехода участка сверхпроводника в резистивное состояние) детектором срыва сверхпроводимости генерируется сигнал «Квенч» (quench – срыв сверхпроводимости), при возникновении которого размыкатели тока системы вывода энергии переходят в состояние «разомкнуто», вводя в цепь питания внешний балластный резистор. Таким образом, большая часть запасённой энергии магнитного поля выделится в балластном резисторе. Здесь крайне важна надёжность и скорость размыкания системы.

Основные требования к системе вывода энергии:

- номинальный ток в цепи 5100 А;
- количество запасённой энергии при выводе из магнита – 22 МДж;
- величина балластного резистора для вывода энергии – 0,1 Ом;
- перегрев активных элементов резистора не должен превышать 60 °С;
- средняя точка балластного резистора должна быть заземлена для минимизации величины напряжения на обмотках магнита относительно земли при выводе энергии;

- паразитная индуктивность балластного резистора должна быть минимальна. Резистор должен быть установлен в непосредственной близости от размыкателя тока;
- минимально возможное падение напряжения на системе, что необходимо для минимизации тепловых потерь;
- время размыкания цепи должно быть не более 20 мс;
- надежность срабатывания системы при внештатных ситуациях;
- резервирование системы.

Несмотря на то что выходное напряжение источника тока ограничено 10 В, при выводе энергии максимальное напряжение на обмотках магнита может достигать 510 В (при токе 5100 А и сопротивлении балластного резистора 0,1 Ом). Для минимизации этого напряжения средняя точка балластного резистора должна быть заземлена, тогда максимальное напряжение на обмотке магнита относительно земли не превысит 255 В, что является безопасным для изоляции сверхпроводящей обмотки и кабелей цепи питания.

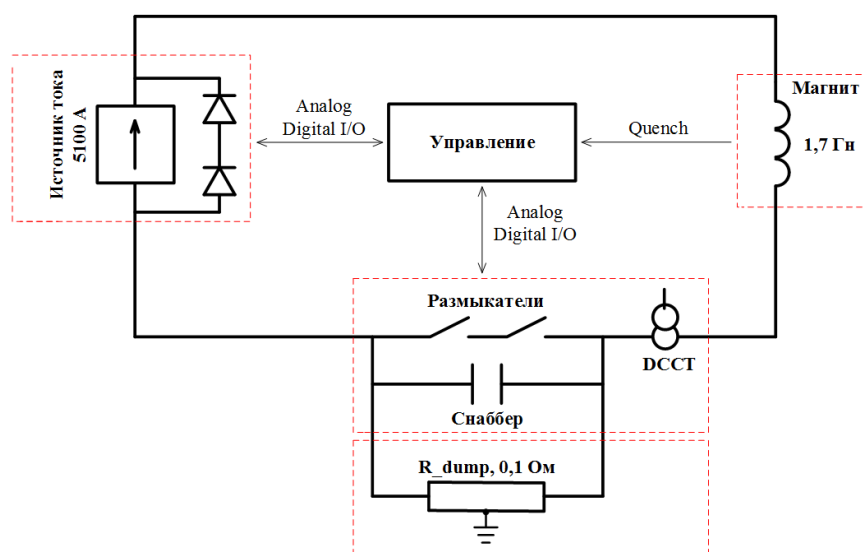


Рис. 1. Общая блок-схема питания магнита

Fig. 1. Magnet's general powering diagram

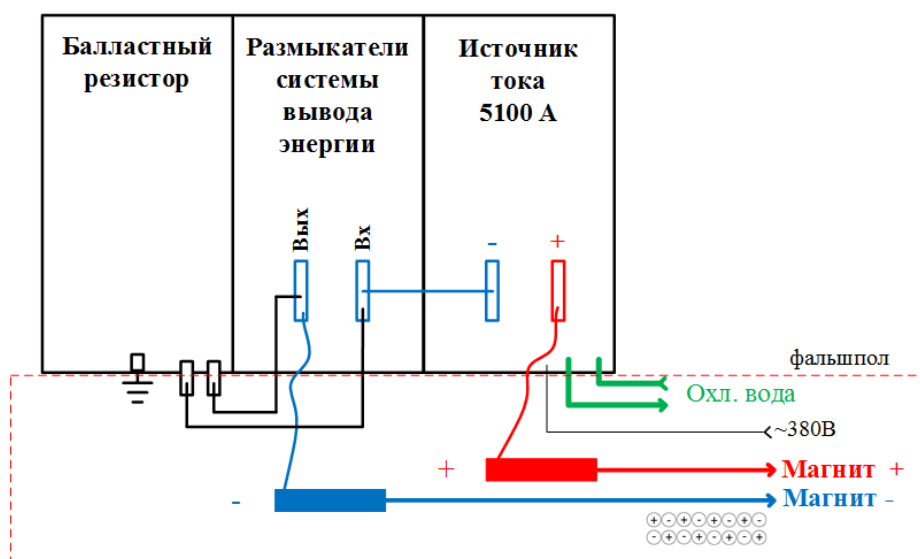


Рис. 2. Коммутация элементов цепи питания магнита

Fig. 2. Commutation of the magnet powering circuit's elements

Радиотехнические стойки с размыкателями системы вывода энергии, балластным резистором и источником тока, а также их коммутация, показаны на рис. 2. Для минимизации электромагнитных наводок от кабельных трасс между источником тока, системой вывода энергии и нагрузкой кабели проложены так, что они образуют систему квадрупольей $\begin{smallmatrix} + & - \\ - & + \end{smallmatrix}$, как показано на рис. 2.

Общий вид и элементы системы вывода энергии

Система вывода энергии состоит из двух электромеханических размыкателей тока, балластного резистора сопротивлением 0,1 Ом и снабберных конденсаторов (рис. 3).

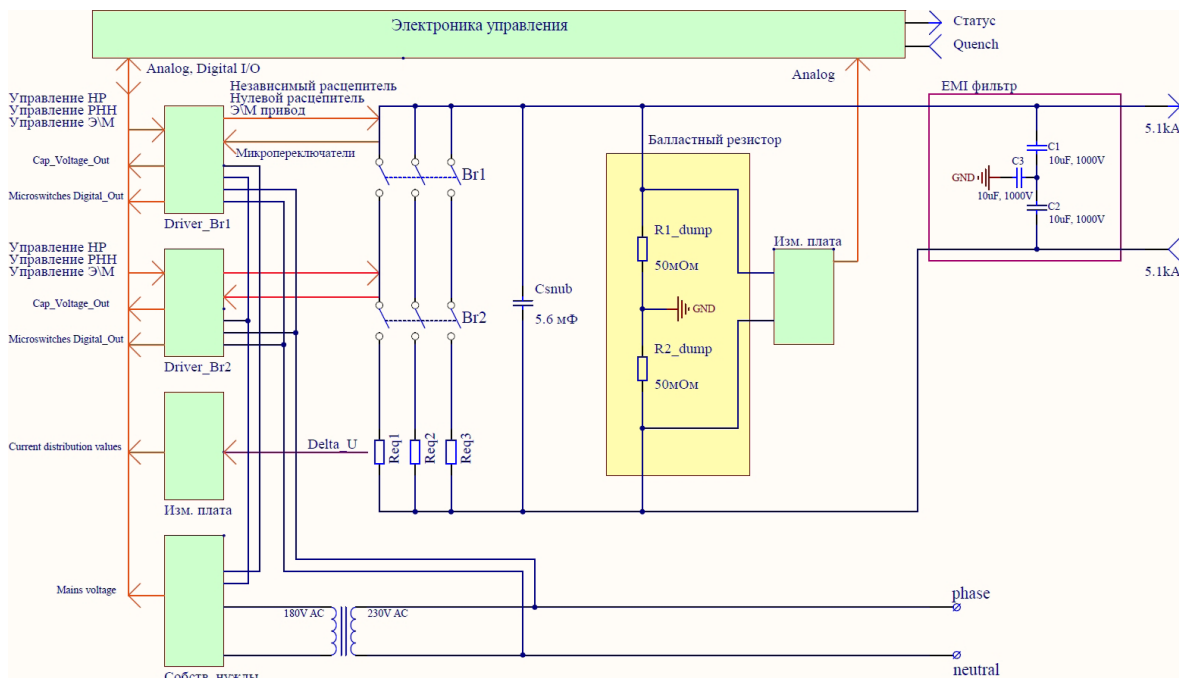


Рис. 3. Блок-схема и элементы системы вывода энергии

Fig. 3. General diagram and elements of the energy extraction system

Два размыкателя тока Br1 и Br2 устанавливаются для надежного срабатывания системы вывода энергии, обеспечивая резервирование системы. Снабберный конденсатор предназначен для предотвращения возникновения электрической дуги между контактами размыкателя тока в момент их размыкания. Электрические платы Driver_Br1 and Driver_Br2 формируют сигналы для внутренних активных устройств размыкателей.

Три фазы размыкателей, каждая из которых рассчитана на ток до 2000 А, соединены параллельно. Такое соединение позволяет коммутировать ток до 5400 А. Для симметричного распределения фазных токов размыкателя установлены разравнивающие резисторы R_{eq} сопротивлением 20 мкОм, которые вносят дополнительное сопротивление в каждую фазу, что уменьшает общий дисбаланс токов в случае разброса сопротивлений контактных групп размыкателя. Для контроля фазных токов, а также падения напряжения на системе вывода энергии, установлена плата аналоговых измерений.

Размыкатели тока

В качестве электромеханического размыкателя тока выбран коммерчески доступный трехфазный автоматический выключатель ВА55-43 производства КЕАЗ (Курский электроаппарат-



Рис. 4. Автоматический выключатель ВА55-43

Fig. 4. Automatic circuit breaker VA55-43

ный завод, РФ) с дополнительной модернизацией. Выключатель (рис. 4.) рассчитан на фазные токи до 2000 А.

Автоматические выключатели ВА55-43 содержат следующие управляющие устройства:

- электромагнитный привод, питающийся переменным напряжением 220 В, который переводит автоматический выключатель в состояния «замкнуто» и «разомкнуто»;
- расцепитель нулевого напряжения (РНН), питающийся постоянным напряжением 220 В. В активном состоянии, т. е. когда через обмотки РНН течет ток, РНН позволяет перевести автоматический выключатель в положение «замкнуто». В неактивном состоянии, т. е. когда ток через обмотки не течет, РНН не позволяет замкнуть выключатель. Если же выключатель находится в состоянии «замкнуто», то деактивация РНН приводит к размыканию выключателя. Таким образом, РНН обеспечивает пассивную безопасность, т. е. в случае потери контакта,

обрыва кабеля или пропажи электропитания РНН приводит к размыканию автоматического выключателя;

- независимый расцепитель (НР). В нормальном состоянии должен быть неактивным. При сигнале «разомкнуть» выключатель на НР подается импульс постоянного напряжения длительностью 5 мс, что приводит к размыканию выключателя;

- микропереключатели, показывающие статус выключателя «замкнуто» или «разомкнуто».

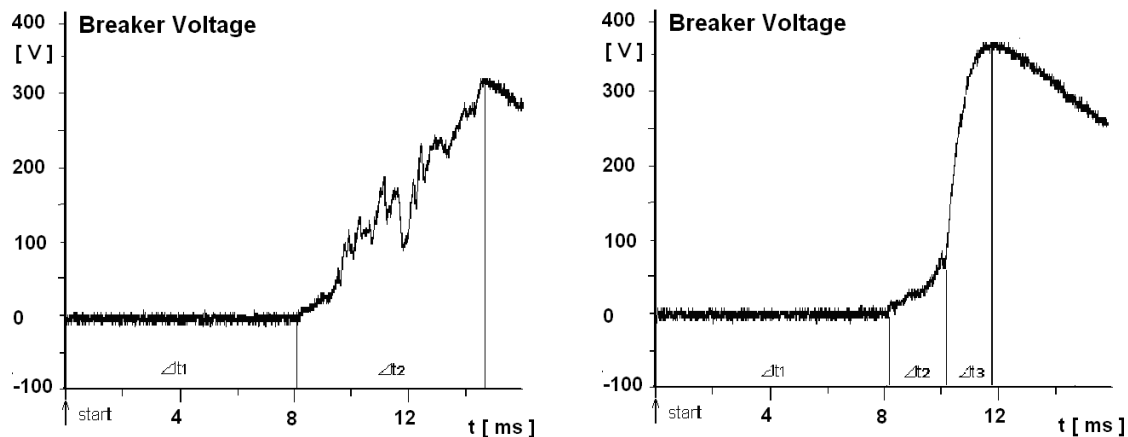
Предложенная модернизация позволяет одновременное использование расцепителей РНН и НР, что позволяет повысить надежность размыкания выключателя. Последовательное включение двух автоматических выключателей, каждый из которых имеет три различных способа расцепления, позволяет нам гарантировать надежное размыкание выключателей и безопасный вывод энергии из магнита при внештатных ситуациях.

Предыдущие НИОКР, выполненные в ИЯФ, а также двадцатилетний опыт использования подобных автоматических выключателей на меньшие токи в качестве размыкателя тока систем вывода энергии из сверхпроводящих магнитов Большого адронного коллайдера (БАК) показал их исключительную надежность [2; 3].

Снабберные конденсаторы

Для предотвращения возникновения электрической дуги между контактами выключателя в момент размыкания под полным током индуктивной нагрузки установлены снабберные конденсаторы C_{snub} (см. рис. 3). На рис. 5. показан пример результата применения снабберного конденсатора параллельно выключателю, где a – результат размыкания без снаббера, b – со снаббером. Здесь Δt_1 – механическая задержка срабатывания выключателя, Δt_2 – время горения дуги, Δt_3 – зарядка конденсатора до полного напряжения.

Из рисунков видно, что применение снаббера существенно уменьшает время горения дуги, следовательно, и время размыкания выключателя. Помимо уменьшения времени размыкания, применение снаббера предотвращает деградацию поверхностей контактов выключателя, – энергия, выделяемая во время горения дуги, прямо пропорциональна площади, заштрихованной графиком за время Δt_2 . Наличие небольшой дуги при применении снаббера обусловлено небольшой паразитной индуктивностью монтажа, набегавшей между размыкателем и снаббером. Теоретически ее можно уменьшить до нуля при нулевой индуктивности монтажа, но в данном конкретном случае величина дуги и время ее горения незначительны, как для системы в целом, так и для контактов автоматического выключателя.



а) напряжение между контактами при $C_{snab} = 0$
 а) contacts voltage with $C_{snab} = 0$

б) напряжение между контактами при $C_{snab} = 0,8 \text{ мФ}$
 б) contacts voltage with $C_{snab} = 0,8 \text{ мФ}$

Рис. 5. Пример результатов использования снаббера

Fig. 5. Use of snubber results

3D-модель стойки с выключателями ВА55-43, снаббером и разравнивающими сопротивлениями приведена на рис. 6. Из-за конструктивных особенностей в эту же стойку установлен датчик тока DCCT.

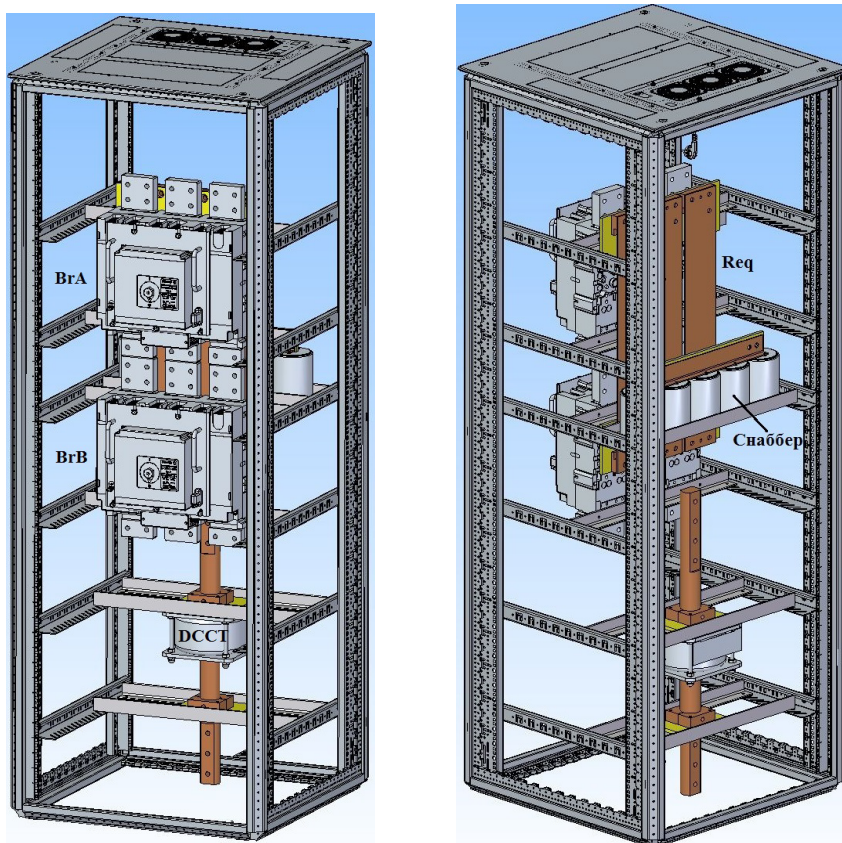


Рис. 6. 3D-модель стойки с основными элементами системы вывода энергии

Fig. 6. 3D model with the general components of the energy extraction system's rack

Балластный резистор

Балластный резистор необходим для диссипации энергии, запасённой в сверхпроводящем магните, в случае срыва сверхпроводимости. Для минимизации переходных процессов при размыкании автоматических выключателей балластный резистор, а также коммутирующие шины между балластным резистором и выключателями должны иметь низкую паразитную индуктивность. Сопротивление балластного резистора выбирается из компромисса между скоростью вывода энергии, где постоянная времени вывода определяется как L/R , и максимальным напряжением, приложенным к обмотке магнита при выводе энергии, $-RI$.

3D-модель балластного резистора представлена на рис. 7, изображение изготовленного изделия – на рис. 8. Балластный резистор состоит из шести секций, каждая из которых собрана из набора пластин, изготовленных из листов нержавеющей стали толщиной 1,5 мм. Ширина каждого листа равна 50 см. Общая длина листов, из которых изготовлен балластный резистор, составляет 120 м, что обеспечивает полное сопротивление 0,1 Ом. Две пластины, сваренные по одной кромке листа, U-образную форму, а 10 подобных форм после последовательного соединения образуют «гармошку». Две такие «гармошки» вставляются одна в другую встречно, их последние листы свариваются между собой по кромке, образуя секцию сопротивлением 1/60 Ом (рис. 7, *справа*). Таким образом, уникальная конструкция резистора состоит из пластин, собранных бифилярно, что позволяет минимизировать его паразитную индуктивность.

Измеренная величина паразитной индуктивности балластного резистора составила менее 1,5 мкГн, что соответствует предварительным расчетам.

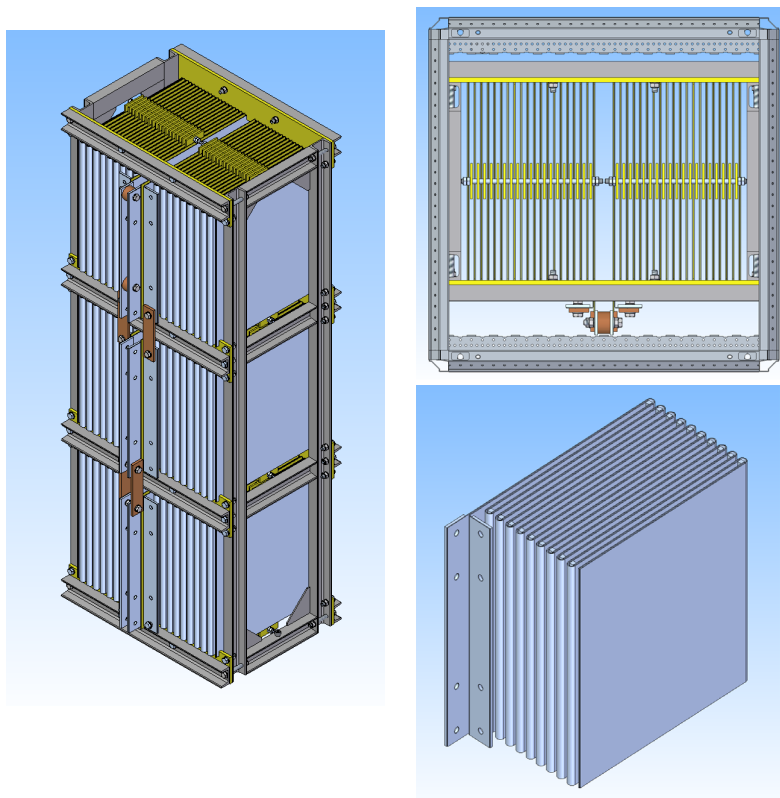


Рис. 7. Балластный резистор в сборе (слева), вид сверху и отдельная секция резистора (справа)

Fig. 7. Assembled dump resistor (left), top view and one section of the resistor (right)



Рис. 8. Фотография изготовленного балластного резистора без корпуса

Fig. 8. Picture of the manufactured dump resistor without rack

Электроника управления

Как было сказано выше, для надежности размыкатель тока в системе вывода энергии продублирован вторым. В целях резервирования каждый размыкатель управляется независимым каналом электроники. Управление системой вывода происходит при помощи контроллеров ICM_1 и ICM_2 (рис. 9). Эти контроллеры являются стандартными на ускорительном комплексе FAIR. Контроллеры типа ICM включают в себя четыре АЦП, необходимые для измерения аналоговых сигналов, входные и выходные регистры, а также последовательный интерфейс USI, по которому происходит обмен данными с контроллером верхнего уровня ACU. ACU, так же как и ICM, является стандартным на FAIR.

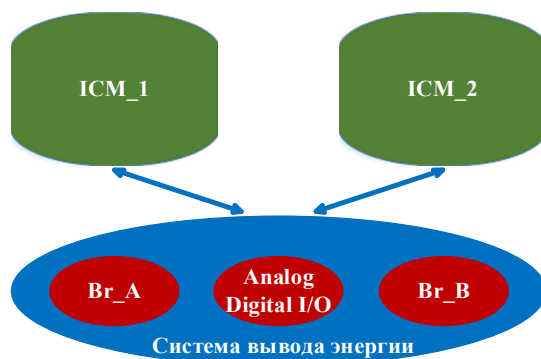


Рис. 9. Блок-схема электроники управления

Fig. 9. Control electronics general diagram

Контроллеры ICM собирают аналоговые и цифровые сигналы с плат Driver_BrA, Driver_BrB и измерительной платы. Также с ICM приходят управляющие сигналы на платы Driver_BrA и Driver_BrB, ответственные за активацию размыкающих устройств автоматических выключателей (рис. 10). Команды на замыкание или размыкание автоматических выключателей поступают на контроллеры ICM_1 и ICM_2 от контроллера верхнего уровня ACU. Команда на размыкание может быть как плановой, так и в случае срыва сверхпроводимости. В последнем случае сигнал приходит от внешнего детектора срыва сверхпроводимости.

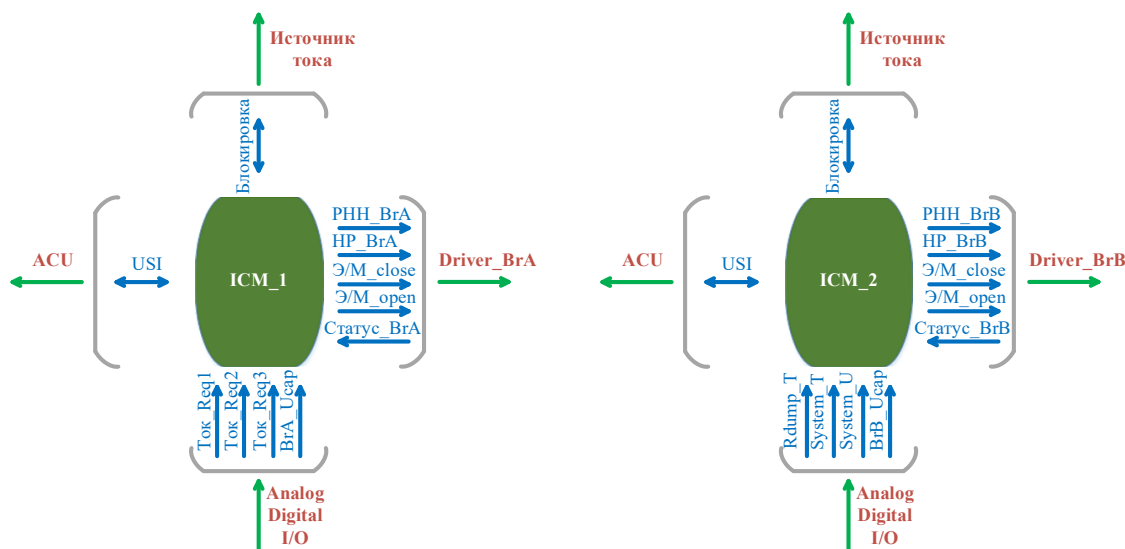


Рис. 10. Аналоговые и цифровые сигналы системы вывода энергии

Fig. 10. Analog and digital signals of the energy extraction system

Заключение

Учитывая опыт разработки подобных систем на меньшие токи, можно утверждать, что разработанная система вывода энергии на ток 5100 А отвечает всем поставленным техническим требованиям, а также требованиям по надежности системы. Проект прошел техническую проверку FAIR, был утвержден и получил одобрение на производство. Измеренные параметры изготовленного балластного резистора, такие как сопротивление и паразитная индуктивность, совпадают с расчетными.

Данная разработка ляжет в основу системы вывода энергии для детектора SPD на коллайдере NICA [4].

Список принятых обозначений

FAIR	– Facility for Antiproton and Ion Research, установка для антипротонных и ионных исследований
NICA	– Nuclotron-based Ion Collider facility
SPD	– Spin Physics Detector
БАК	– Большой адронный коллайдер
Rdump	– балластный резистор
Csnub	– снабберный конденсатор
Quench	– срыв сверхпроводимости
ICM	– interlock and control module, модуль блокировок и контроля
ACU	– adaptive control unit, адаптивный модуль контроллера
USI	– universal series interface, универсальный последовательный интерфейс
DCCT	– direct current-current transformer, трансформатор постоянного тока
Analog I/O	– аналоговые входные и выходные каналы
Digital I/O	– входные и выходные каналы
BrA	– автоматический выключатель А.
BrB	– автоматический выключатель В.
Driver_BrA	– плата драйвера автоматического выключателя А.
Driver_BrB	– плата драйвера автоматического выключателя В.
Req	– разравнивающий резистор
HP	– независимый расцепитель
RHN	– расцепитель нулевого напряжения
Ucap	– напряжение на накопительном конденсаторе платы драйвера
Э/М	– электромагнитный привод
Э/М_close	– команда на замыкание выключателя электромагнитным приводом
Э/М_open	– команда на размыкание выключателя электромагнитным приводом

Список литературы

1. **Турани М., Шмидт Л. и др.** Технический дизайн проект соленоида и дипольного спектрального магнита PANDA. Коллаборация PANDA, Дармштадт, 2009.
2. **Ерохин А. И.** Вывод и рекуперация энергии в индуктивных и емкостных накопителях: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2010.
3. **Ерохин А. И., Медведко А. С., Куулинг Г. Я. и др.** Разработка и испытания систем вывода энергии для корректирующих магнитных цепей БАК // Материалы Междунар. конф. по модуляторам мощности. Май 2008. Лас-Вегас, США. DOI 10.1109/IPMC.2008.4743691
4. **Абазов А. И. др.** Концептуальный дизайн детектора спиновой физики. E-print: 2102.00442v3

References

1. **Turany M., Shmidt L., etc.** Technical design report for the PANDA solenoid and dipole spectrometer magnets. PANDA collaboration, 2009. (in Russ.)
2. **Erokhin A.** Energy extraction and recuperation at the inductive and capacitive storages. PhD in Tech. Sci. Diss. Novosibirsk, 2010. (in Russ.)
3. **Erokhin A., Medvedko A., Coelingh G. etc.** Design and commissioning of the energy extraction systems for the LHC corrector magnets circuits. IEEE International Power Modulator Conference, proceedings. May 2008, Las Vegas. DOI 10.1109/IPMC.2008.4743691
4. **Abazov A., etc.** Conceptual design of the Spin Physics Detector. E-print: 2102.00442v3

Сведения об авторах

Александр Иванович Ерохин, кандидат технических наук

Артём Андреевич Кремнев, младший научный сотрудник

Евгений Эдуардович Пята, старший научный сотрудник

Виталий Аркадьевич Шкаруба, доктор технических наук

Александр Витальевич Булатов, ведущий инженер

Татьяна Васильевна Бедарева, ведущий инженер

Information about the Authors

Alexandr I. Erokhin, PhD in technical sciences

Artem A. Kremnev, Scientist

Vitaly A. Shkaruba, Doctor of Technical Sciences

Eugeny E. Pyata, Senior Scientist

Alexandr V. Bulatov, Lead-Engineer

Tatyana V. Bedareva, Lead-Engineer

*Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.04.2023;
принята к публикации 11.09.2023*

*The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.04.2023;
accepted for publication 11.09.2023*

Научная статья

УДК 537.562; 537.563; 537.565; 533.9.03

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода

**Кристина Игоревна Аникеева¹, Вадим Александрович Воинцев²,
Даниил Юрьевич Гаврисенко³, Олег Захарович Сотников⁴,
Роман Андреевич Финашин⁵, Игорь Владимирович Шиховцев⁶**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹chris.yushkova1@gmail.com

²vointsev1998@mail.ru

³d.gavrisenko@g.nsu.ru

⁴Sotnikov@inp.nsk.su

⁵R.A.Finashin@inp.nsk.su

⁶I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Аннотация

Источник отрицательных ионов водорода на основе перезарядки пучка положительных ионов в газовой мишени разрабатывается в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Перезарядный источник может быть использован для инъекции в тандемный ускоритель нейтронного источника, предназначенного для бор-нейтронозахватной терапии. Одним из важных элементов источника является плазменный эмиттер, создающий положительные ионы для первичного ускорения. В качестве эмиттера выбран высокочастотный драйвер, основанный на индукционном разряде и рассчитанный на многосекундный режим работы. В данной работе проведены измерения эмиссионных характеристик высокочастотного драйвера с использованием подвижного сеточного зонда. В результате достигнуты параметры, необходимые для применения драйвера в перезарядном источнике отрицательных ионов. Проведен анализ экспериментально измеренных тепловых нагрузок в многосекундном режиме.

Ключевые слова

индукционный разряд, ионный источник, отрицательные ионы, стационарный режим работы.

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-32-90053. Проектирование, изготовление и покупка оборудования частично поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования

Аникеева К. И., Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Сотников О. З., Финашин Р. А., Шиховцев И. В. Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 36–45. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

© Аникеева К. И., Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Сотников О. З., Финашин Р. А.,
Шиховцев И. В., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2

Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Development and Testing of a High-Frequency Driver for a Charge-Exchange Source of Negative Hydrogen Ions

Kristina I. Anikeeva¹, Vadim A. Vointsev², Daniil Y. Gavrisenko³,
Oleg Z. Sotnikov⁴, Roman A. Finashin⁵, Igor V. Shikhovtsev⁶

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia

¹chris.yushkova1@gmail.com

²vointsev1998@mail.ru

³d.gavrisenko@g.nsu.ru

⁴Sotnikov@inp.nsk.su

⁵R.A.Finashin@inp.nsk.su

⁶I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Abstract

A source of negative hydrogen ions based on the recharging of a beam of positive ions in a gas target is being developed at the Institute of Nuclear Physics. G.I. Budker SB RAS. The charge exchange source can be used to inject into the tandem accelerator a neutron source intended for boron neutron capture therapy. One of the important elements of the source is the plasma emitter, which creates positive ions for primary acceleration. As an emitter, a high-frequency driver based on an induction discharge and designed for a multi-second operating mode was chosen. In this work, we measured the emission characteristics of a high-frequency driver using a moving grid probe. As a result, the parameters necessary for the use of the driver in a rechargeable source of negative ions have been achieved. The analysis of experimentally measured thermal loads in the multisecond mode is carried out.

Keywords

induction discharge, ion source, negative ions, stationary operation

Funding

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-32-90053. The design, manufacture and purchase of equipment were supported in part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation

Anikeeva K. I., Vointsev V. A., D. Gavrisenko D. I., Sotnikov O. Z., Finashin R. A., Shikhovtsev I. V. Development and testing of a high-frequency driver for a charge-exchange source of negative hydrogen ions. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 36–45 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

Введение

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разработана серия нагревных и диагностических инжекторов [1]. Одним из новых перспективных направлений разработки является перезарядный источник отрицательных ионов водорода с многосекундной длительностью импульса [2]. Одним из применений перезарядного источника отрицательных ионов может быть создание интенсивного пучка для бор-нейтронозахватной терапии [3]. В перезарядном источнике пучок отрицательных ионов водорода формируется при диссоциации и перезарядке ускоренного пучка положительных молекулярных ионов водорода H_2^+ в водородной мишени. Неперезарядившиеся положительные ионы отделяются от пучка с помощью магнитного сепаратора. Для создания первичного пучка положительных ионов используется ионный источник с высокочастотным драйвером. Пучок положительных ионов вытягивается из высокочастотного индукционного разряда [4] и ускоряется ионно-оптической системой до энергии 30 кэВ. Разряд создается и поддерживается в ВЧ-драйвере внешней антенной. Одной из основных проблем получения пучка в режиме многосекундных импульсов является нагрев элементов ВЧ-драйвера при взаимодействии с плазмой и джоулевым нагревом индукционными токами, которые наводятся ВЧ-полем антенны ВЧ-драйвера.

Целью данной работы является достижение стабильной работы ВЧ-драйвера при длительных режимах работы, более 10 секунд, и получение эмиссионной плотности тока ионов $\sim 100\text{--}150\text{ мА/см}^2$.

1. ВЧ-драйвер для стационарного режима работы

Схема ВЧ-драйвера представлена на рис. 1. Цилиндрическая часть драйвера 2 изготовлена из керамики (Al_2O_3) с внутренним диаметром 200 мм, зажата с торцов задним и передним фланцами. Для вакуумного уплотнения и повышения теплопроводности между керамикой и фланцами используется прокладка из индия. Снаружи на керамику намотана 3-витковая антенна 1, изготовленная из медной трубки диаметром 6 мм и покрытая термоусаживающейся изоляцией. В центре задней стенки располагается узел поджига 4, состоящий из канала подачи газа и изолированного электрода. Для снижения потока плазмы на заднюю стенку и повышения эффективности разряда на задней стенке расположены магниты, формирующие мультипольное магнитное поле. Для охлаждения элементов ВЧ-драйвера через антенну, каналы в узле поджига, периферию заднего и переднего фланцев прокачивается дистиллированная вода.

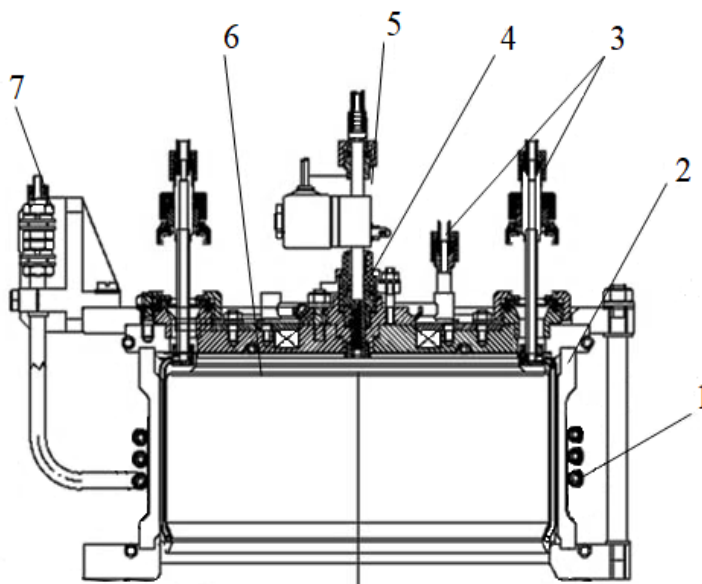


Рис. 1. Схема ВЧ-драйвера для стационарного источника отрицательных ионов: 1 – антенна; 2 – керамика; 3 – подвод воды к системе охлаждения; 4 – узел поджига; 5 – система напуска газа; 6 – медный защитный экран; 7 – клеммы антенны

Fig. 1. RF driver circuit for a stationary source of negative ions: 1 – antenna; 2 – ceramics; 3 – water supply to the cooling system; 4 – ignition unit; 5 – gas starting system; 6 – copper screen; 7 – antenna terminals

Внутри газоразрядной камеры установлен защитный цилиндрический экран из меди с продольными щелями, предназначенный для защиты керамики от взаимодействия с плазмой, которое может приводить к перегреву, покрытию и распылению керамики. Схема экрана представлена на рис. 2. Экран имеет активное охлаждение: с двумя входами и двумя выходами. Каждая ламель охлаждается с помощью припаянной медной трубки диаметром 3 мм с толщиной стенки 0,5 мм, через которую протекает дистиллированная вода. Каналы охлаждения ламелей 2 углублены в керамику 1 для уменьшения расстояния от антенны до внутренней стенки

экрана. Для защиты от перегрева задней стенки перед ней установлена молибденовая пластина с припаянной медной трубкой, через которую протекает дистиллированная вода.

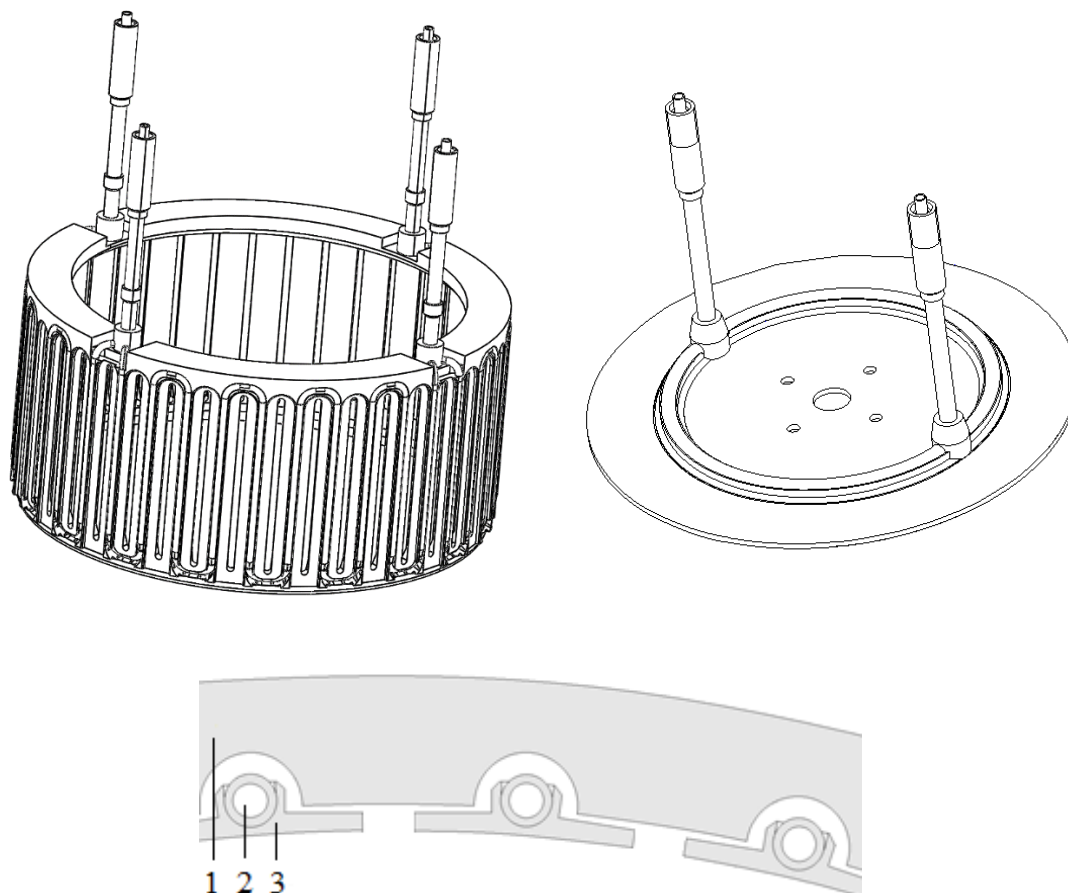


Рис. 2. Конфигурация защитного экрана (слева), экран задней стенки с охлаждением (справа), сечение защитного экрана (снизу): 1 – керамика, 2 – медные трубки охлаждения, 3 – ламель экрана
 Fig. 2. Configuration of the protective screen (left), rear wall screen with cooling (right), section of the protective screen (bottom): 1 – ceramics; 2 – copper cooling tubes; 3 – screen lamella

Создание ионов в ВЧ-драйвере происходит следующим образом. Сначала в камеру напускается водород. Затем на антенну подается переменное напряжение амплитудой несколько киловольт и частотой 4 МГц. Ток в антенне создает переменное магнитное поле внутри камеры. Такое магнитное поле индуцирует переменное азимутальное электрическое поле. На изолированный электрод узла поджига подается импульс напряжения 4 кВ и длительностью 10 мкс, который создает пробой между электродом и корпусом задней стенки. Электроны, возникшие в результате пробоя, ускоряются высокочастотным электрическим полем антенны и ионизуют газ. После зажигания разряд поддерживается переменным электромагнитным полем.

2. Экспериментальный стенд

Схема стенда по испытанию ВЧ-драйверов плазмы представлена на рис. 3. Экспериментальный стенд представляет собой цилиндрический вакуумный объем 9. К верхнему торцу объема пристыкован исследуемый ВЧ-драйвер 2. Объем откачивается турбомолекулярным насосом (ТМН) до давления $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ Па. Переменное напряжение на антенне создается при помощи

ВЧ-генератора на основе тетрода. Для увеличения тока в антенне используется параллельный колебательный контур, индуктивностью которого является антенна 8. Между ВЧ-генератором и ВЧ-драйвером находится разделительный трансформатор. Подача газа осуществляется с помощью двух клапанов. Первый клапан – поджиговый, создает давление 1–2 Па, необходимое для зажигания разряда. Он включается в начале импульса на 0,1 сек. Второй клапан – рабочий необходим для поддержания рабочего давления 0,3–0,6 Па при получении пучка. Экспериментальный стенд оборудован рядом диагностик. Для измерения плотности ионного тока и его профиля используется сеточный зонд, описанный в [5], который может передвигаться вдоль диаметра ВЧ-драйвера с помощью подвижного вакуумного ввода. Для измерения температуры элементов ВЧ-драйвера и защитного экрана использовался тепловизор FLIR 650. В нижней части объема находится инфракрасно-прозрачное окно из фторида бария, для температурного контроля внутренних поверхностей ВЧ-драйвера. Водяное охлаждение элементов ВЧ-драйвера, защитного экрана и задней стенки осуществляется через разные каналы. На выходных каналах установлены измерители потока и температуры.

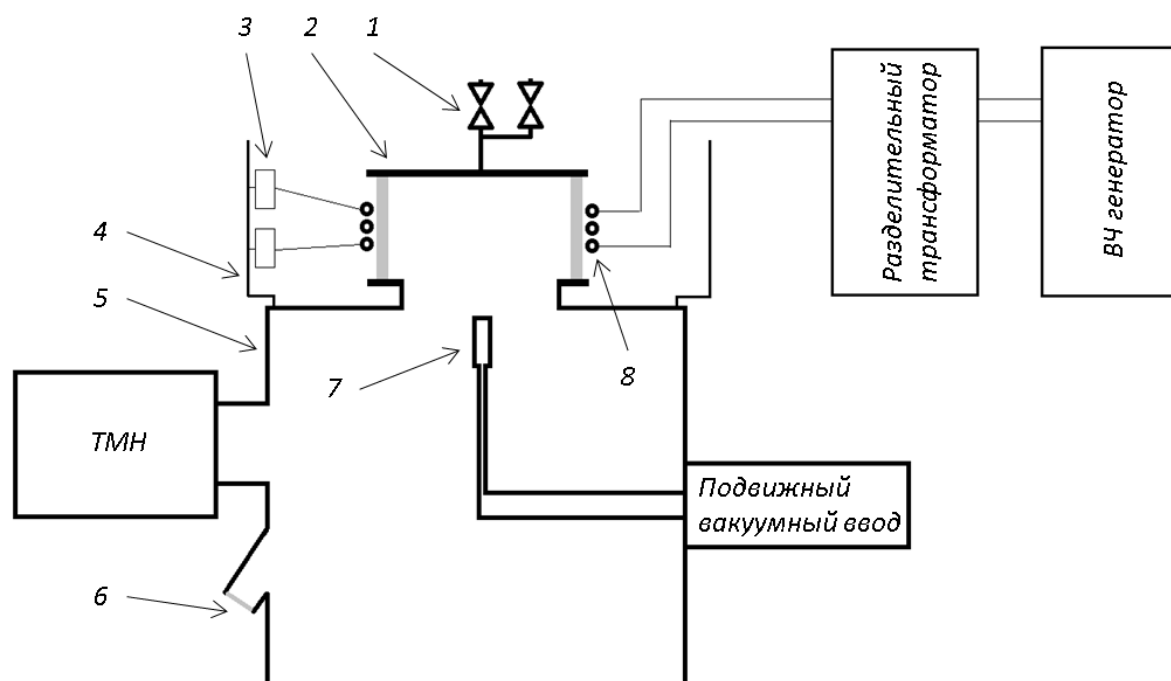


Рис. 3. Экспериментальный стенд ВЧ-генератора плазмы: 1 – система подачи газа с двумя клапанами; 2 – ВЧ-драйвер; 3 – конденсаторы антенного колебательного контура; 4 – внешний цилиндрический экран; 5 – цилиндрический вакуумный объем; 6 – окно с видом на защитный экран; 7 – сеточный зонд для измерения плотности ионного тока; 8 – внешняя трехвитковая антенна

Fig. 3. Experimental stand for a high-frequency plasma generator: 1 – gas supply system with two valves; 2 – HF driver; 3 – capacitors of the antenna oscillatory circuit; 4 – external cylindrical screen; 5 – cylindrical vacuum volume; 6 – window overlooking the protective screen; 7 – grid probe for measuring ion current density; 8 – external three-turn antenna

3. Зондовые измерения плотности ионного тока

Зондовые измерения производились в режиме импульсов длительностью 50 мс. В этом случае давление в ВЧ-драйвере и вакуумной камере определяется поджиговым клапаном. Зонд находился на выходе ВЧ-драйвера, на уровне переднего фланца, на оси ВЧ-драйвера. На рис. 4 представлена зависимость плотности ионного тока от ВЧ-мощности. Полученная зависимость является линейной. Плотность тока составила 204 мА/см² при ВЧ мощности

13,8 кВт, соответствующая напряжению на антенне 5,7 кВ. Для формирования пучка в ионном источнике необходима плотности тока не более 100 мА/см², которая получается при мощности порядка 6–8 кВт и напряжении 4,5–5 кВ на антенне.

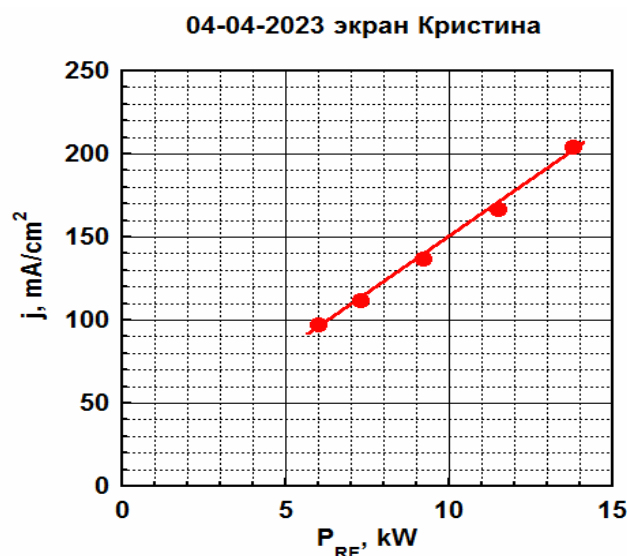


Рис. 4. Зависимость плотности ионного тока на сеточный зонд от выходной мощности ВЧ-генератора. Давление в вакуумном объеме 0,46 Па

Fig. 4. Dependence of the ion current density on the grid probe on the output power of the RF generator. The pressure in the vacuum volume is 0,46 Pa

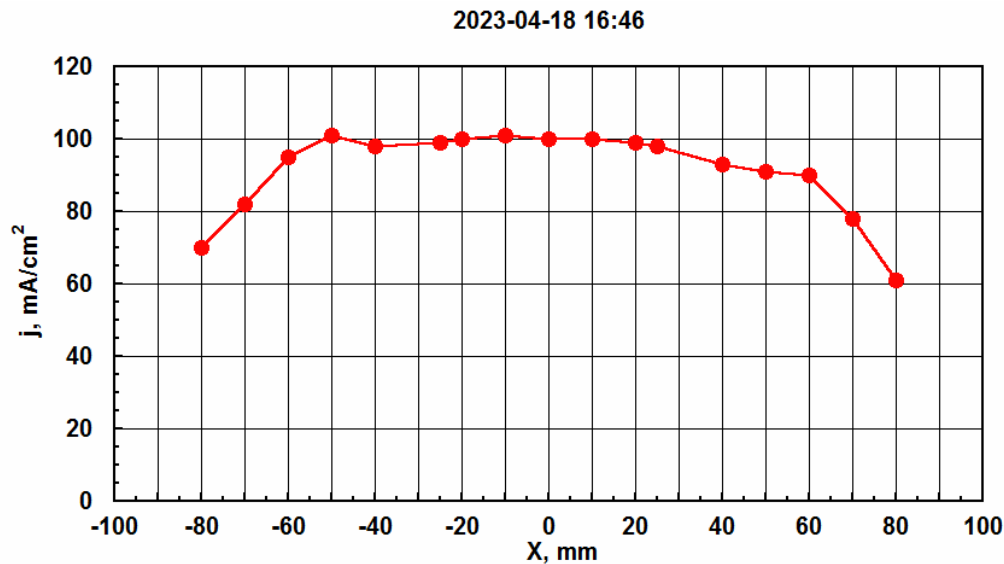


Рис. 5. Профиль плотности ионного тока вдоль диаметра на выходе ВЧ-драйвера при ВЧ-мощности 7,6 кВт. Давление в вакуумном объеме 0,42 Па

Fig. 5. Profile of the ion current density along the diameter at the output of the RF driver at an RF power of 7,6 kW. The pressure in the vacuum volume is 0,42 Pa

Профиль плотности ионного тока, измеренный вдоль диаметра ВЧ-драйвера, представлен на рис. 5. Профиль имеет однородную область эмиссии 100 мА/см² в диаметре 120 мм. Для ионно-оптической системы диаметром 70 мм получается ток 3,8 А, а профиль плотно-

сти ионного тока имеет однородность порядка 3 %. Это соответствует высокой однородности эмиссии ионов в разработанном драйвере.

4. Тепловые нагрузки на элементы ВЧ-драйвера

Для изучения тепловых нагрузок была проведена серия экспериментов в режиме работы ВЧ-драйвера длительностью 30 с. Давление газа в разряде составляет 0,55 Па. Осциллограмма такого импульса представлена на рис. 6. На рисунке показана выходная мощность ВЧ-генератора и мощности, отводимые водяным охлаждением, которые характеризуют нагрев элементов ВЧ-драйвера: мощность охлаждения защитного экрана, мощность охлаждения задней стенки, мощность охлаждения фланцев, узла поджига и антенны. В начальный период времени с 0 до 1 сек наблюдался выброс 16 кВт выходной мощности ВЧ-генератора, затем мощность выходит на уровень 9 кВт. Это связано с уменьшением давления в ВЧ драйвере с 1,8 Па до 0,55 Па за первые 2 с импульса. Мощность охлаждения всех элементов вышла на стационарный режим за 20 сек и составила 4,5 кВт.

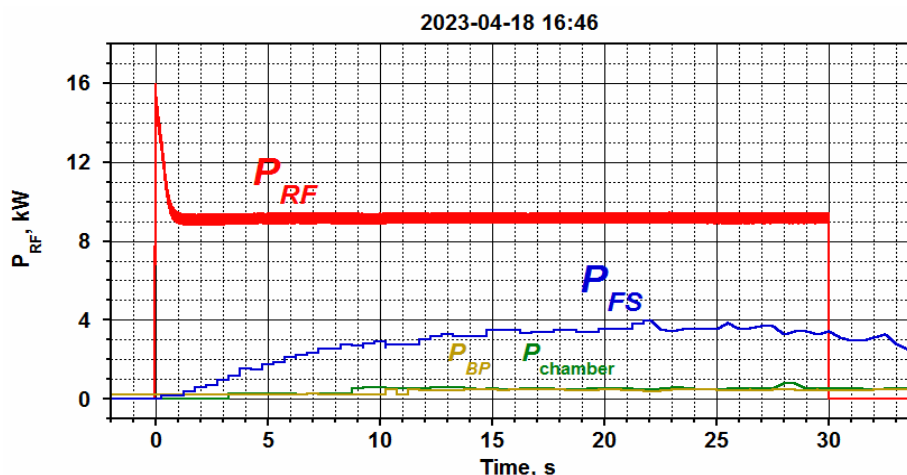


Рис. 6. Осциллограмма ВЧ-мощности на выходе генератора и мощностей, отводимой с элементов драйвера в 30-секундном импульсе: P_{RF} – выходная мощность ВЧ-генератора; P_{FS} – мощность, отводимая водяным охлаждением с защитного экрана; P_{BP} – мощность, отводимая водяным охлаждением с молибденовой пластины; $P_{chamber}$ – мощность, отводимая водяным охлаждением с переднего и заднего фланцев, узла поджига и антенны

Fig. 6. Oscillogram of the RF power at the output of the generator and the power removed from the driver elements in a 30 second pulse. P_{RF} is the output power of the RF generator, P_{FS} is the power dissipated by water cooling from the protective screen, P_{BP} is the power dissipated by water cooling from the molybdenum plate, $P_{chamber}$ is the power dissipated by water cooling from the front and rear flanges, the ignition unit and the antenna

Были измерены температуры поверхностей элементов ВЧ-драйвера после импульса ВЧ-разряда мощностью 9 кВт и длительностью 30 с. Результаты представлены на рис. 7. Керамика нагрелась до 35 °С, при этом максимальная температура нагрева внешних поверхностей не превысила 50 °С. Самую высокую температуру имеют стальные шпильки, которые стягивают задний и передний фланцы, и стальные хомуты, которые фиксируют зажимы антенны. Это связано с тем, что эти стальные элементы расположены близко к антенне и подвержены индукционному нагреву и не имеют активного охлаждения.

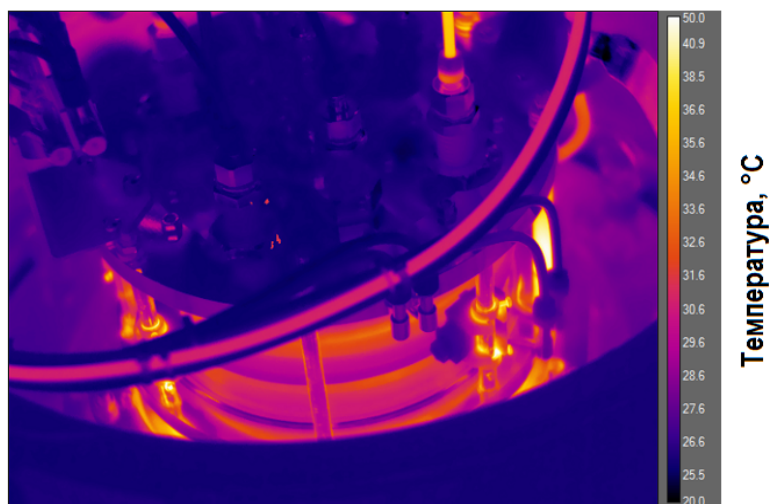


Рис. 7. Температура внешних поверхностей ВЧ-драйвера сразу после выстрела. Длительность импульса – 30 с, ВЧ-мощность – 9 кВт, давление в драйвере – 0,55 Па

Fig. 7. Temperature of the external surfaces of the HF driver immediately after the shot. Pulse duration – 30 seconds, RF power – 9 kW, driver pressure – 0,55 Pa

Для измерения температуры защитного экрана и задней стенки газоразрядной камеры использовалось инфракрасно-прозрачное окно из фторида бария. На рис. 8 показано изображение с тепловизора после импульса ВЧ-разряда мощностью 9 кВт и длительностью 30 с. Экран нагрелся однородно. Максимальная температура не превысила 50 °С. Внутренняя поверхность керамики имеет температуру ~35 °С, что совпадает с измерениями снаружи, показанными на рис. 7. После десяти импульсов длительностью 30 сек при визуальном осмотре изменений внутренней поверхности ВЧ-драйвера не обнаружено.

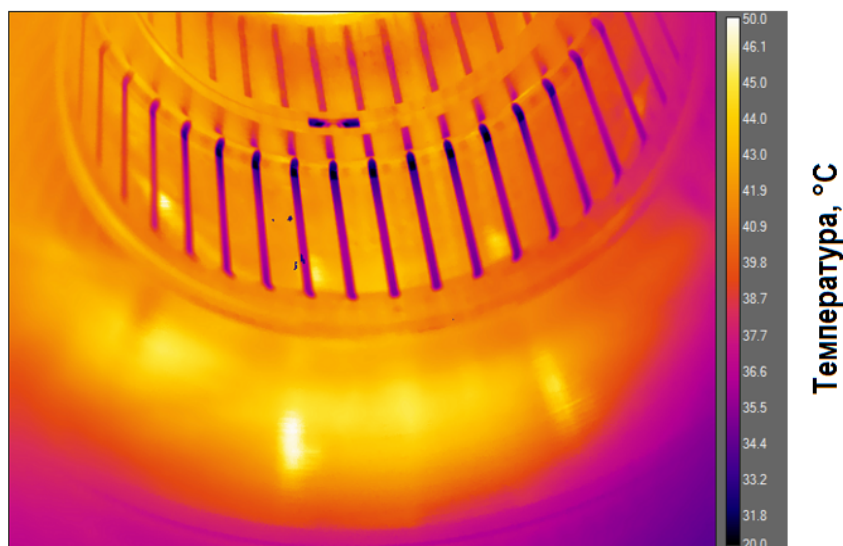


Рис. 8. Температура внутренних поверхностей ВЧ-драйвера сразу после выстрела. Длительность импульса – 30 с, ВЧ-мощность – 9 кВт, давление в драйвере – 0,55 Па

Fig. 8. Temperature of the internal surfaces of the HF driver immediately after the shot. Pulse duration – 30 seconds, RF – power 9 kW, driver pressure – 0,55 Pa

Выводы

В статье приведены результаты исследования драйвера с медным щелевым экраном. Достигнуты необходимые параметры эмиссии: плотность тока – 100 мА/см² при ВЧ-мощности 6–8 кВт, однородность профиля плотности ионного тока – 3 % в области плазменного электрода диаметром 70 мм. Продемонстрирована работа ВЧ-драйвера в многосекундном режиме работы: 30 сек при ВЧ-мощности на выходе ВЧ-генератора 9 кВт. Защитный экран с прямыми щелями и отдельным охлаждением каждой ламели обеспечил достаточную защиту керамики от нагрева. Нагрев элементов ВЧ-драйвера и экрана не превысил 70 °С. Плазменный драйвер испытан и готов к следующим этапам работ с перезарядным источником отрицательных ионов.

Список литературы

1. Бельченко Ю. И., Давыденко В. И., Дейчули П. П., Емелев И. С., Иванов А. А., Колмогоров В. В., Константинов С. Г., Краснов А. А., Попов С. С., Санин А. Л., Сорокин А. В., Ступишин Н. В., Шиховцев И. В., Колмогоров А. В., Атлуханов М. Г., Абдрашитов Г. Ф., Драничников А. Н., Капитонов В. А., Кондаков А. А. Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 6. С. 595–650.
2. Shikhovtsev I., Amirov V., Anikeeva K., Davydenko V., Emelev I., Ivanov A., Mishagin V., Rashchenko V., Maslakov I., Shubin E. A 10 mA, steady-state, charge exchange negative ion beam source // AIP Conference Proceedings 30 July 2021. Vol. 2373 (1). P. 040001. <https://doi.org/10.1063/5.0057483>
3. Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
4. Shikhovtsev I. et al. Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2052. P. 040016.
5. Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Кондаков А. А., Сотников О. З., Финашин Р. А. Исследование высокочастотного генератора плазмы с многосекундной длительностью работы // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, вып. 3. С. 5-11. doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

References

1. Belchenko Yu. I., Davydenko V. I., Deychuli P. P., Emelev I. S., Ivanov A. A., Kolmogorov V. V., Konstantinov S. G., Krasnov A. A., Popov S. S., Sanin A. L., Sorokin A. V., Stupishin N. V., Shikhovtsev I. V., Kolmogorov A. V., Atlukhanov M. G., Abdrashitov G. F., Dranichnikov A. N., Kapitonov V. A., Kondakov A. A. Research on the physics and technology of ion and atomic beams at the Institute of Nuclear Physics SB RAS. *Advances in Physical Sciences*, 2018, vol. 188, no. 6, pp. 595-650.
2. Shikhovtsev I., Amirov V., Anikeeva K., Davydenko V., Emelev I., Ivanov A., Mishagin V., Rashchenko V., Maslakov I., Shubin E. A 10 mA, steady-state, charge exchange negative ion beam source. *AIP Conference Proceedings 30 July 2021*, vol. 2373(1), pp. 040001. <https://doi.org/10.1063/5.0057483>
3. Taskaev Yu. S., Kanygin V. V. Boron-neutron capture therapy. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian branch of the RAS, 2016.
4. Shikhovtsev I. et al. Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2052, p. 040016.
5. Vointsev V. A., Gavrisenko D. Yu., Kondakov A. A., Sotnikov O. Z., Finashin R. A. Study of a high-frequency plasma generator with multi-second operation duration. *Siberian Physical Journal*, 2022, vol. 17(3), pp. 5-11. doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

Сведения об авторах

Кристина Игоревна Аникеева, младший научный сотрудник

Вадим Александрович Воинцев, аспирант

Даниил Юрьевич Гаврисенко, магистрант

Олег Захарович Сотников, кандидат физико-математических наук

Роман Андреевич Финашин, кандидат технических наук

Игорь Владимирович Шиховцев, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Kristina I. Anikeeva, Junior Researcher

Vadim A. Vointsev, Graduate Student

Daniil Y. Gavrisenko, Master's Student

Oleg Z. Sotnikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Roman A. Finashin, Candidate of Technical Sciences

Igor V. Shikhovtsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 22.08.2023;
принята к публикации 12.09.2023*

*The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 22.08.2023;
accepted for publication 12.09.2023*

Научная статья

УДК 532.526

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-46-53

**Экспериментальное исследование взаимодействия
контролируемых возмущений от двух источников
в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла**

**Глеб Леонидович Колосов¹, Александр Дмитриевич Косинов,
Николай Васильевич Семёнов, Алексей Анатольевич Яцких**

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹kolosov@itam.nsc.ru

Аннотация

Представлены экспериментальные результаты взаимодействия возмущений от двух точечных источников периодических контролируемых пульсаций в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2. Показано, что в результате сложения возмущений образуется интерференционная картина, и для определенных значений волновых чисел возможно подавление соответствующих компонент неустойчивых волн.

Ключевые слова

сверхзвуковой поток, экспериментальные исследования, скользящее крыло, ламинарно-турбулентный переход

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (проект FWNE-2021-0012) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Для цитирования

Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А. Экспериментальное исследование взаимодействия контролируемых возмущений от двух источников в сверхзвуковом пограничном слое скользящего крыла // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 46–53. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-46-53

Experimental Study of the Interaction of Controlled Disturbances from Two Sources in the Supersonic Boundary Layer of a Swept Wing

Gleb L. Kolosov¹, Alexandre D. Kosinov,
Nikolay V. Semionov, Alexey A. Yatskikh

S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
SB RAS

¹kolosov@itam.nsc.ru

Abstract

Experimental results of the interaction of disturbances from two point sources of periodic controlled pulsations in the supersonic boundary layer of a swept wing at a Mach number of 2 are presented. It is shown that as a result of the summation of disturbances, an interference pattern is formed and, for certain values of the wave numbers, it is possible to suppress the corresponding components of unstable waves.

Keywords

supersonic flow, experimental studies, swept wing, laminar-turbulent transition

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FWNE-2021-0012). The work was carried out using the equipment of the Equipment Sharing Center "Mechanics" (ITAM SB RAS).

For citation

Kolosov G. L., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A. Experimental study of the interaction of controlled disturbances from two sources in the supersonic boundary layer of a swept wing. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 46–53 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-46-53

Введение

Предсказание положения ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях имеет большое практическое значение. Для этого необходимо понимать доминирующие процессы и механизмы, ответственные за нарушение ламинарного режима. Считается, что турбулизация потока в пограничном слое происходит за счет возникновения и развития различных типов неустойчивых волн, их роста и взаимодействия друг с другом [1–4].

Наиболее эффективным методом экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода является введение в пограничный слой искусственных контролируемых возмущений. Для случая сверхзвуковых скоростей потока чаще всего используется одиночный локализованный источник для возбуждения контролируемых возмущений. Такой подход эффективен при изучении линейной и слабонелинейной эволюции возмущений как в пограничном слое на плоской пластине, так и на скользящем крыле [5–6].

Также представляет интерес использование ряда источников контролируемых возмущений. В дозвуковом пограничном слое плоской пластины [7] было обнаружено, что в зависимости от фазового соотношения между внесенными возмущениями можно управлять положением точки перехода от ламинарного течения к турбулентному. Кроме того, метод генерации возмущений от нескольких локализованных источников эффективен как при изучении механизмов взаимодействия возмущений, так и для дозвуковых скоростей [8].

Что касается сверхзвуковых скоростей потока, также есть небольшое количество работ исследования развития контролируемых возмущений от нескольких источников. В работе [9] в сверхзвуковом пограничном слое на конусе с помощью набора локализованных источников генерировались неустойчивые волны, которые соответствовали наиболее растущим согласно линейной теории. Авторы данной статьи проводили исследования в пограничном слое на мо-

дели плоской пластины при работе двух периодических источников контролируемых возмущений [10]. Получена интерференционная картина взаимодействия волн как в расчетах, так и в эксперименте при числе Маха 2,5. Целью данной работы является экспериментальное моделирование взаимодействия неустойчивых возмущений от двух локализованных источников в сверхзвуковом пограничном слое на скользящем крыле при числе Маха 2.

Постановка эксперимента

Эксперименты проводились в малошумной сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 при числе Маха $M = 2$. В качестве экспериментальной модели использовалось алюминиевое скользящее крыло 45° с острой передней кромкой и пара локализованных источников контролируемых возмущений. Крыло имело следующие размеры: ширина – 200 мм, длина по хорде – 200 мм, максимальная толщина – 12 мм, что соответствует утолщению крыла в 6° . Толщина передней кромки не превышала 0,1 мм. Модель фиксировалась в рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки.

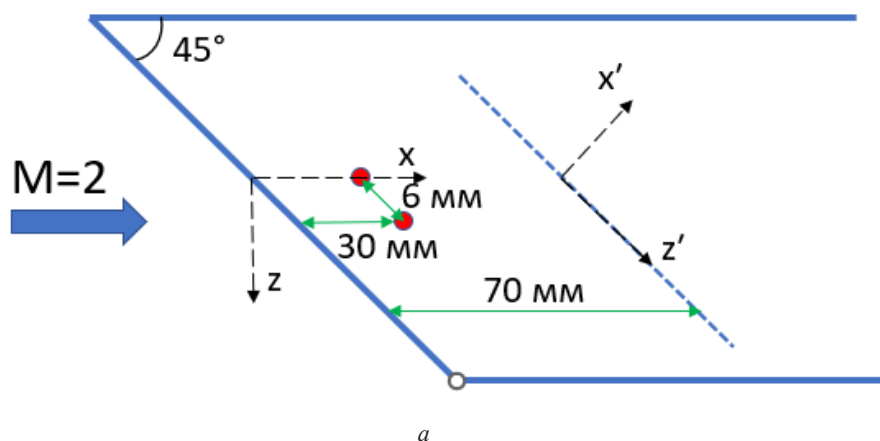


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и фотография модели скользящего крыла с двумя источниками возмущений в рабочей части Т-325 (б)

Fig. 1. Scheme of the experiment (a) and photograph of the swept wing model with two sources of disturbances in the test section of the T-325 (b)

Два источника контролируемых возмущений располагались на расстоянии 30 мм от передней кромки модели на расстоянии 6 мм друг от друга (см. рис. 1). В системе координат (x', z') ось z' параллельна передней кромке модели и ее начало координат лежит на оси x , проходящей через один из разрядов, при $x = 70$ мм. В качестве источников использовались разрядные камеры, расположенные внутри модели и соединенные с пограничным слоем через отверстия диаметром 0,6 мм. Электрод установлен внутри камеры и изолирован от модели. Разряд зажигался при достижении достаточного напряжения между электродом и моделью.

Для возбуждения контролируемых возмущений внутри источников зажигался тлеющий разряд с частотой 14 кГц. Схема зажигания состоит из источника высокого напряжения, балластов для ограничения тока разряда и двух высоковольтных быстродействующих переключателей. Управление переключателями осуществляется с помощью двухканального генератора импульсов. Генератор может подавать идентичные периодические сигналы – синхронный режим работы источников.

Пульсации в сверхзвуковом потоке измерялись с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. Использовалась вольфрамовая нить диаметром 10 мкм и длиной 1,7 мм. Величина перегрева нити датчика термоанемометра устанавливалась равной $0,7 \div 0,8$, что означало, что измеряемые возмущения до 95 % состояли из пульсаций массового расхода (m'). Переменный сигнал термоанемометра оцифровывался с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Частота дискретизации АЦП составляла 750 кГц. В каждой точке измерения синхронно с зажиганием разряда записывалось 4 осциллограммы длиной 65536 точек. Выполнялось дискретное преобразование Фурье по времени и пространству:

$$m'_{f\beta} = \frac{\sqrt{2}}{T \cdot \delta} \sum_{j,k} m'(t_k, z'_j) e^{-i(\beta' z' - 2\pi f t_k) \Delta z'_j \Delta t}, \quad (1)$$

где T – длина осциллограммы, $\delta = 1$ мм – характерная толщина пограничного слоя. Амплитуда возмущений определялась как

$$A_{f\beta} = |m'_{f\beta}|.$$

Результаты и их анализ

На начальном этапе анализировалось развитие естественных пульсаций на модели скользящего крыла без установки источников возмущений. На рис. 2 приведены спектры возмущений для некоторых значений единичного числа Рейнольдса Re_1 . Единичное число Рейнольдса определяется как $Re_1 = U_\infty / \nu_\infty$, где U_∞ – скорость в свободном потоке, ν_∞ – кинематическая вязкость. Измерения выполнены в критическом слое на расстоянии 70 мм от передней кромки крыла. Точного положения точки ламинарно-турбулентного перехода не определено, тем не менее по форме спектров можно сказать, что по крайней мере до значений $Re_1 = 9,3 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ наблюдается линейный рост (как в [6]) неустойчивых бегущих возмущений, тогда как при $Re_1 = 14,6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ спектр соответствует турбулентному состоянию течения. Для того чтобы пронаблюдать взаимодействие возмущений от двух разрядов в переходной области линейного развития возмущений, для экспериментов в контролируемых условиях с двумя источниками было выбрано значение единичного числа Рейнольдса равным $4 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. Кроме того, на рис. 2 показано, что область усиливающихся возмущений в пограничном слое данной модели скользящего крыла ограничена полосой частот от 5 кГц до 50 кГц. Исходя из этого частота вводимых контролируемых возмущений была выбрана равной 14 кГц.

На рис. 3 представлены линии равной амплитуды возмущений A_f на частоте 14 кГц в поперечном направлении z' в зависимости от времени t для двух случаев: при работе одного источника возмущений, расположенного в $z'_0 = 6$ мм (рис. 3, а); при синхронной работе двух

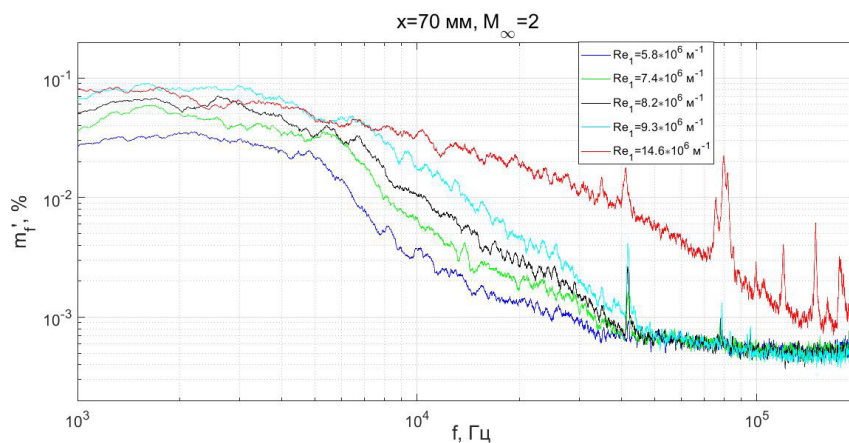


Рис. 2. Спектры естественных возмущений

Fig. 2. Spectra of natural disturbances

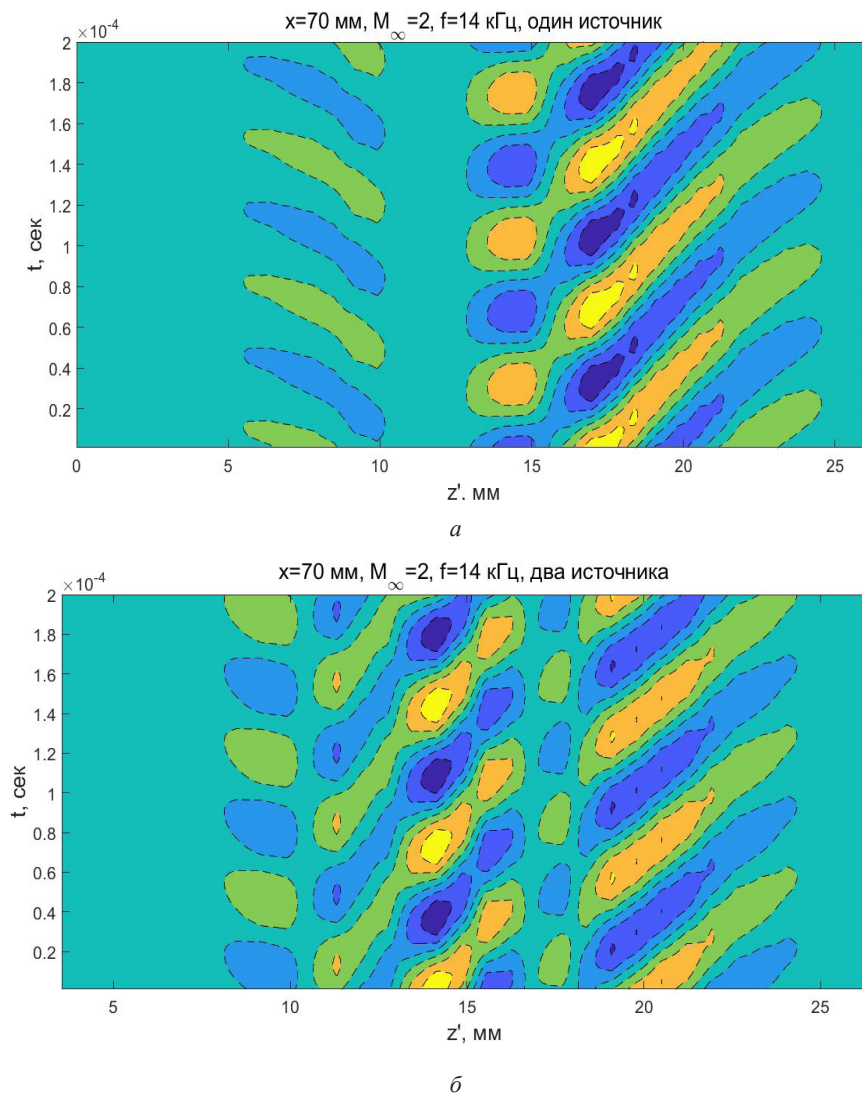


Рис. 3. Изолинии амплитуд контролируемых возмущений

Fig. 3. Isolines of amplitudes of controlled disturbances

источников (рис. 3, б). Желтые области соответствуют положительным значениям амплитуд, синие – отрицательным. Как и ранее в экспериментах на скользящем крыле [6], в отличие от случая плоской пластины, при работе одного источника наблюдается несимметричность в амплитудных распределениях с преобладанием возмущений в сторону увеличения координаты z' от источника. При наличии двух источников возмущений картина изолиний более сложная, указывающая на наличие взаимодействия возмущений в широкой области по поперечной координате z' .

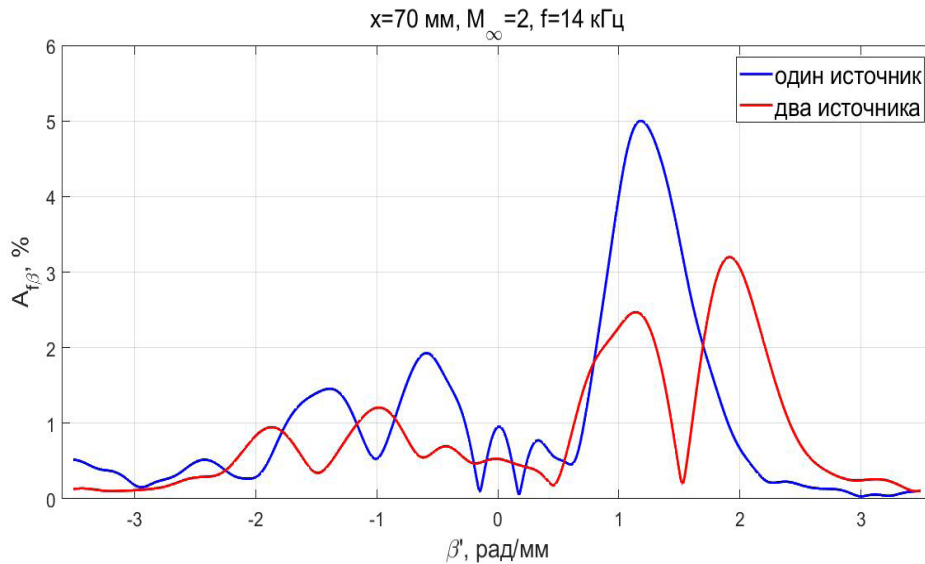


Рис. 4. Амплитудные β -спектры
Fig. 4. Amplitude β -spectra

Более наглядная картина взаимодействия возмущений получается после дискретного преобразования Фурье по пространству (см. формулу (1)) и рассмотрения β -спектров (рис. 4). В случае одиночного разряда имеется основной максимум, расположенный вблизи $\beta' = 1,1$ рад/мм. Это согласуется с экспериментами на скользящем крыле в контролируемых условиях [6]. Иная картина в β -спектре наблюдается для двух источников возмущений, работающих синхронно. Здесь мы видим наличие нескольких максимумов, а также нескольких узлов, где амплитуда возмущений близка к нулю. В области наибольших амплитуд возмущений для пограничного слоя скользящего крыла ($\beta' > 0$) [6], узлы наблюдаются при $\beta' \approx 0,5, 1,5$ рад/мм (рис. 4). Этот эффект можно объяснить следующим образом (как в [10]): в пограничном слое возмущения в точке (x', z') представляют собой сумму периодических волн от двух одиночных источников:

$$\sum_i A_i \sin(2\pi f t + \beta'_i z' + \alpha'_i x') + \sum_i A_i \sin(2\pi f t + \beta'_i (z' + z'_0) + \alpha'_i x'),$$

где амплитуда $A_i(\beta'_i)$ определяется после преобразования Фурье (формула (1)), суммирование производится по всем поперечным волновым числам β'_i, z'_0 – положение одного из источников, $z'_0 = 6$ мм. По известным формулам сумму синусов можно привести к виду:

$$2 \sum_i A_i \sin(2\pi f t + \beta'_i z' + \alpha'_i x' + \beta'_i z'_0/2) \cos(\beta'_i z'_0/2). \quad (2)$$

Под знаком суммирования выражение $\sin(2\pi f t + \beta'_i z' + \alpha'_i x' + \beta'_i z'_0/2)$ определяет спектр от одного источника. Множитель $\cos(\beta'_i z'_0/2)$ определяет ампли-

тудную модуляцию спектра одного источника при переходе к спектру возмущения от двух источников, работающих синхронно. Таким образом, например, можно определить узлы в бета-спектре, исходя из выражения: $\beta_i' 0 = \frac{\pi}{z' 0} + \frac{2\pi n}{z' 0}$, где n – целое число. Это выражение дает значения $\pm 0,52, 1,57, 2,61$ рад/мм. Так, для положительных значений β' , а именно соответствующие волны усиливаются в пограничном слое скользящего крыла [6], получено согласие с экспериментальными данными. Отметим, что согласно формуле (2) должно наблюдаться удвоение амплитуды в местах пучностей, однако на рис. 4 этого не наблюдается. Это можно объяснить тем, что измерения в случае работы одного разряда и двух проводились в различных сериях экспериментов и возможно отличие в амплитуде вводимых в пограничный слой возмущений.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования взаимодействия контролируемых возмущений от двух точечных источников в сверхзвуковом пограничном слое на модели скользящего крыла при числе Маха 2. В случае работы одного источника пульсаций получены волновые характеристики в области линейного развития контролируемых бегущих возмущений. В случае двух источников возмущений, работающих синхронно, выявлен эффект взаимодействия волновых поездов с образованием интерференционной картины с набором из нескольких узлов и пучностей, положение которых можно предсказать.

Список литературы

1. **Жигулев В. Н., Тумин А. М.** Возникновение турбулентности. Новосибирск: Наука, 1987. 282 с.
2. **Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В.** Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 327 с.
3. **Bippes H.** Basic experiments on transition in three-dimensional boundary layers dominated by crossflow instability // *Progress in Aerospace Sciences*. 1999. Vol. 35. P. 363–412.
4. **Kachanov Y. S.** Physical mechanisms of laminar-boundary-layer transition // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1994. Vol. 26. P. 411–482.
5. **Kosinov A. D., Maslov A. A., Shevelkov S. G.** Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 1990. Vol. 219. P. 621–633.
6. **Kosinov A. D., Kolosov G. L., Semionov N. V., Yermolaev Y. G.** Linear development of controlled disturbances in the supersonic boundary layer on a swept wing at Mach 2 // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28. P. 064101.
7. **Гилев В. М., Козлов В. В.** Влияние периодического вдува – отсоса на процесс перехода в пограничном слое // *Ученые записки ЦАГИ*. 1986. Т. XVII, № 3. С. 27–33.
8. **Аблаев А. Р., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Катасонов М. М., Козлов В. В.** Переход к турбулентности в зоне отрыва пограничного слоя, вызванный взаимодействием двух наклонных волн // *Теплофизика и аэромеханика*. 2000. Т. 7, № 3. С. 365–373.
9. **Corke T. C., Cavalieri D. A., Matlis E.** Boundary-layer instability on sharp cone at Mach 3.5 with controlled input // *AIAA Journal*. 2002. Vol. 40. P. 1015–1018.
10. **Kolosov G. L., Kosinov A. D., Semenov A. N., Yatskikh A. A.** Experimental and numerical investigation of controlled disturbances development from two sources in supersonic boundary layer // *Advances in Aerodynamics*. 2019. Vol. 1.

References

1. **Zhigulev V. N., Tumin A. M.** Emergence of turbulence. Novosibirsk: Nauka, 1987. 282 p.
2. **Boyko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** Emergence of turbulence in wall flows. Novosibirsk: Nauka, 1999. 327 p.

3. **Bippes H.** Basic experiments on transition in three-dimensional boundary layers dominated by crossflow instability // *Progress in Aerospace Sciences*. 1999. Vol. 35. P. 363–412.
4. **Kachanov Y. S.** Physical mechanisms of laminar-boundary-layer transition // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1994. Vol. 26. P. 411–482.
5. **Kosinov A. D., Maslov A. A., Shevelkov S. G.** Experiments on the stability of supersonic laminar boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 1990. Vol. 219. P. 621–633.
6. **Kosinov A. D., Kolosov G. L., Semionov N. V., Yermolaev Y. G.** Linear development of controlled disturbances in the supersonic boundary layer on a swept wing at Mach 2 // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28. P. 064101.
7. **Gilev V. M., Kozlov V. V.** Influence of periodic blowing-suction on the transition process in the boundary layer // *Uchenye zapiski TsAGI*. 1986. Vol. XVII, no. 3. P. 27–33.
8. **Ablaev A. R., Grek G. R., Dovgal A. V., Katasonov M. M., Kozlov V. V.** Transition to turbulence in the boundary layer breakaway zone caused by the interaction of two inclined waves // *Teplofizika i aeromechanika*. 2000. Vol. 7, № 3. P. 365–373.
9. **Corke T. C., Cavalieri D. A., Matlis E.** Boundary-layer instability on sharp cone at Mach 3.5 with controlled input // *AIAA Journal*. 2002. Vol. 40. P. 1015–1018.
10. **Kolosov G. L., Kosinov A. D., Semenov A. N., Yatskikh A. A.** Experimental and numerical investigation of controlled disturbances development from two sources in supersonic boundary layer // *Advances in Aerodynamics*. 2019. Vol. 1.

Сведения об авторах

Глеб Леонидович Колосов, кандидат физико-математических наук

Александр Дмитриевич Косинов, доктор физико-математических наук

Николай Васильевич Семёнов, доктор физико-математических наук

Алексей Анатольевич Яцких, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Gleb L. Kolosov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Alexander D. Kosinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Nikolay V. Semionov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Aleksey A. Yatskikh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 03.12.2022;
принята к публикации 15.03.2023*

*The article was submitted 24.11.2022; approved after reviewing 03.12.2022;
accepted for publication 15.03.2023*

Научная статья

УДК 532.526

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-54-65

Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя с внутренним подводом тепла и инъекцией однородного газа через пористую стенку

Сергей Александрович Гапонов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия
gaponov@itam.nsc.ru

Аннотация

В работе исследовано влияние числа Маха и числа Рейнольдса на устойчивость пограничного слоя с внутренним подводом тепла и инъекцией однородного газа через пористую стенку. При фиксированном числе Маха зависимость степеней усиления возмущений от расстояния до передней кромки пластины не монотонна. С увеличением числа Рейнольдса фазовая скорость стремится к скорости в обобщенной точке перегиба. Наиболее растущими в пограничном слое являются двумерные волны. С увеличением числа Маха и при фиксированном расстоянии от кромки пластины имеет место сильная стабилизация пограничного слоя. При $M = 4$ максимальная степень усиления уменьшается по сравнению с соответствующей величиной при $M = 0$ более чем на порядок, а протяженность устойчивого пограничного слоя увеличивается в 2 раза. При этом частота в критической точке нейтральной кривой уменьшается примерно в три раза. Установлено, что как и при отсутствии инъекции газа через пористую стенку, так и при ее наличии внутренний подвод тепла оказывает стабилизирующее влияние на пограничный слой. В рамках принятой модели подвода тепла при $M = 3$ степень усиления понижается примерно в полтора раза в сравнении со случаем без внутреннего подогрева пограничного слоя.

Ключевые слова

сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, внутренний подвод тепла, инъекция газа

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00017, <https://rscf.ru/project/22-21-00017>.

Для цитирования

Гапонов С. А. Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя с внутренним подводом тепла и инъекцией однородного газа через пористую стенку // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 54–65. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-54-65

© Гапонов С. А., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2
Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Stability of Supersonic Boundary Layer with Internal Heat Supply and Injection of Homogeneous Gas through a Porous Wall

Sergey A. Gaponov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

gaponov@itam.nsc.ru

Abstract

The influence of the Mach number and Reynolds number on the stability of the boundary layer with internal heat supply and homogeneous gas injection through the porous wall is studied. At a fixed Mach numbers, the dependence of perturbation amplification rate on the distance to the plate leading edge is not monotonic. As the Reynolds number increases, the phase velocity tends to the velocity at the inflection generalizing point. Two-dimensional waves are the most growing in the boundary layer. With increasing Mach number and a fixed distance from the plate, edge there is a strong stabilization of the boundary layer. At $M=4$ the amplification rate maximum decreases in comparison with the corresponding value at $M=0$ by more than an magnitude order, and the length of the stable boundary layer increases by a factor of 2. At the same time, a frequency at the neutral curve critical point decreases by a factor of about three. It has been establishing that both in the absence of gas injection through a porous wall and in its presence, the internal heat supply has a stabilizing effect on the boundary layer. Within the adopted model of heat supply at $M=3$ the degree of amplification decreases by about one and a half times in comparison with the case without internal heating of the boundary layer.

Keywords

supersonic boundary layer, hydrodynamic stability, internal heat supply, gas injection

Funding

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-21-00017, <https://rscf.ru/project/22-21-00017>.

For citation

Gaponov S. A. Stability of supersonic boundary layer with internal heat supply and injection of homogeneous gas through a porous wall. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 54–65 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-54-65

Введение

Одна из важных задач аэродинамики состоит в снижении сопротивления движущихся тел в газовой среде. Этому вопросу посвящено большое количество исследований. Среди них значительное место уделяется воздействию локального подогрева натекающего на тело газа. Достаточно подробный обзор работ этого направления имеется в [1]. Полезные результаты по влиянию локального подогрева на сопротивление движущихся тел имеются в публикациях [2–7]. Все упомянутые исследования проведены либо в рамках идеального газа, либо в условиях турбулентного обтекания тел. Впервые влияние подвода энергии внутрь турбулентного сверхзвукового пограничного слоя исследовалось в [8; 9]. При этом методы подвода тепла там не обсуждаются. Ярким примером внутреннего подвода тепла в пограничный слой является диффузионное пламя. Подробную информацию о пограничном слое с диффузионным горением топлива, подаваемого через пористую стенку можно найти в [10].

Среди задач управления пограничным слоем важное место занимает проблема его устойчивости и ламинарно-турбулентного перехода. К сожалению, решение задачи устойчивости пограничного слоя с горением в полной постановке осложняется необходимостью учитывать не только возмущения скоростей, давления и температуры, но также концентраций всех газов смеси, источников подвода тепла и порождения (убыли) компонентов смеси. К счастью, как показано в [11], важные выводы об устойчивости пограничного слоя с пламенем могут быть сделаны на примере устойчивости пограничного слоя однокомпонентного газа с внутренним подогревом, обеспечивающим распределение температуры по пограничному слою, близкое к ее распределению в условиях горения. Состояние пограничного слоя при сгорании

топлива, подаваемого через пористую стенку, зависит не только от источника энергоподвода, но и от скорости вдуваемого топлива. Впервые совместное влияние инъекции газа через пористую стенку и внутреннего подвода тепла при $M \ll 1$ изучено в [12].

Цель данных исследований заключалась в исследовании влияния числа Маха на характеристики устойчивости пограничного с внутренним подводом тепла и инъекцией однородного газа через пористую стенку.

1. Основные уравнения

1.1. Стационарное (основное) течение описывается уравнениями пограничного слоя, которые в безразмерной форме имеют вид [12]:

$$\frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = 0, \quad \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial I}{\partial y} + \mu \left(1 - \frac{1}{Pr} \right) u \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \rho Q,$$

$$I = h + u^2 / 2, \quad \mu = T^{3/2} \left(1 + \frac{T_s}{T_e} \right) \left(T + \frac{T_s}{T_e} \right)^{-1}$$

с граничными условиями: $u(0) = 0$, $v(0) = j / (\rho(0))$; $y = \infty$: $u(\infty) = T(\infty) = 1$.

Здесь u и v — проекции вектора скорости на ортогональные координаты: x (параллельная поверхности пластины) и y (нормальная к поверхности) соответственно, ρ — плотность, T — температура, $h = T / (M^2(\gamma - 1))$ — энтальпия, Q — количество тепла введенного в единицу времени на единицу массы, μ — динамический коэффициент вязкости, j — массовый поток газа через стенку, Pr — число Прандтля, M — число Маха на внешней границе пограничного слоя, γ — показатель адиабаты. Предполагается, что число Прандтля постоянно, $T_s = 110$ °K.

Система (1) и граничные условия нормализованы с помощью следующих масштабов: ν_e / u_e — длина, μ_e — вязкость, u_e — скорость, T_e — температура, ρ_e — плотность, u_e^2 — энтальпия, $u_e^4 \rho_e / \mu_e$ — подвод тепла, $\rho_e u_e$ — массовый поток газа через стенку. Индексом e помечены размерные параметры на внешней границе пограничного слоя.

В локальном автомодельном приближении система (1) и граничные условия приводятся к виду [11]:

$$\frac{d}{dY} \left(C \frac{d^2 \Phi}{dY^2} \right) + \frac{\Phi}{2} \frac{d^2 \Phi}{dY^2} = 0, \quad \frac{d}{dY} \left(\frac{D}{Pr} \frac{dg}{dY} \right) + \frac{\Phi}{2} \frac{dg}{dY} = \frac{u_e^2}{I_e} \frac{d}{dY} \left[\left(\frac{1}{Pr} - 1 \right) D \frac{d\Phi}{dY} \frac{d^2 \Phi}{dY^2} \right] - \bar{Q} \left(\frac{Re}{Re_b} \right)^2. \quad (2)$$

$$\Phi = j Re, \quad \frac{d\Phi}{dY} = u = 0, \quad T = T_w \text{ при } Y=0; \quad u \rightarrow 1, \quad g \rightarrow 1 \text{ при } Y \rightarrow \infty.$$

Здесь $Y = \int \rho(\eta) d\eta$, $\eta = y / \text{Re}$, $d\Phi / dY = u$, $g = I / I_e$, $D = \rho\mu$, $\rho = 1 / T$, $\text{Re} = \sqrt{x}$, Re_b – постоянное число Рейнольдса, при котором Q обеспечивает необходимое распределение температуры по пограничному слою, полученное любым методом (либо теоретическим, либо экспериментальным). В [11] на основании экспериментального температурного профиля работы [13] ($M \ll 1$) при $\text{Re}_b = 180$ и расчетов на основе системы (2) было определено

$$Q = 15,25u(1-u) \exp \left(- \left(\frac{u-0,15}{0,158} \frac{T_{\max}(\text{Re})}{T_{\max}(\text{Re}_b)} \frac{\text{Re}}{\text{Re}_b} \right)^2 \right),$$

которое использовалось в настоящих расчетах.

1.2. В приближении параллельного основного течения система однородных линейных дифференциальных уравнений для амплитуд ($\phi_i^d(Y)$) возмущений $\phi_i = \phi_i^d(Y) \exp[i(\alpha x + \beta z - Ft)]$ ($F = 2\pi f \mu_e / (\rho_e u_e^2)$, f – частота в Герцах) имеет вид [11]:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1^d}{dY} &= -i_c \phi_2^d + i_x \phi_5^d + i_z \phi_6^d - 2\mu_r \frac{du^d}{dY}, \quad \frac{d\phi_2^d}{dY} = \rho \frac{dT}{dY} \phi_2^d - u_w^d - i_c T r^d, \\ \frac{d\phi_3^d}{dY} &= -i_x \phi_2^d - \frac{du}{dY} \mu_i T^d + \phi_5^d / \mu_r, \quad \frac{d\phi_4^d}{dY} = -i_z \phi_2^d + \phi_6^d / \mu_r, \\ \frac{d\phi_5^d}{dY} &= i_x \phi_1^d + i_c \phi_3^d - i_T^d + \rho \frac{du}{dY} \phi_2^d, \quad \frac{d\phi_6^d}{dY} = i_z \phi_1^d + (i_c - \mu_a) \phi_4^d - i_z \mu_r u_w^d, \\ \frac{d\phi_7^d}{dY} &= i\omega \text{Re} T \phi_1^d + \rho \frac{dI}{dY} \phi_2^d - u i_i^d + i_c u \phi_3^d + (i_c - \mu_a / \text{Pr}) \phi_8^d, \\ \frac{d\phi_8^d}{dY} &= -\text{Pr} \frac{du}{dY} \phi_3^d - \frac{dh}{dY} \mu_i T^d + \text{Pr} (\phi_7^d - u \phi_5^d) / \mu_K \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\phi_1^d, \phi_2^d, \phi_3^d, \phi_4^d, \phi_5^d, \phi_6^d, \phi_7^d, \phi_8^d$ – амплитуды возмущений давления; нормальной, продольной и боковой скорости; сдвиговых напряжений τ_{12}, τ_{23} ; теплового потока и энтальпии. Дополнительными членами системы являются:

$$\begin{aligned} u_w^d &= i_x \phi_3^d + i_z \phi_5^d, \quad i_i^d = i_x \mu_r u_w^d + \mu_a \phi_3^d, \quad \mu_a = (i_x^2 + i_z^2) \mu_r, \quad \tilde{r} = \rho^d / \rho = g_m \phi_1^d - \rho T^d, \quad T^d = g_{m1} \phi_8^d, \\ i_x &= i\alpha \text{Re} T, \quad i_z = i\beta \text{Re} T, \quad i_c = \text{Re} u_c = i \text{Re}(u\alpha - F), \quad \mu_r = \frac{\mu\rho}{\text{Re}}, \quad \mu_T = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT}, \quad g_m = \gamma M^2, \\ g_{m1} &= (\gamma - 1) M^2. \end{aligned}$$

Система (3) решается с граничными условиями: $\phi_3^d, \phi_2^d, \phi_4^d, \phi_8^d = 0$ при $Y = 0, \infty$.

При заданных реальных значениях F и β находится комплексное значение $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$ как собственное значение задачи. При отрицательных значениях α_i возмущение растет вниз по потоку, пограничный слой неустойчив.

2. Результаты

Все расчеты проводились при температуре поверхности $T_w = 640$ °К, торможения $T_0 = 290$ °К, числе Прандтля $\text{Pr} = 0,72$, показателе адиабаты $\gamma = 1,4$, массовом потоке газа через стенку $j = 0,004$, $\text{Re}_b = 180$ и различных числах Маха и Рейнольдса.

2.1. На рис. 1 показаны распределения по пограничному слою скорости u , температуры T и параметра $K = \rho \frac{du}{d\eta}$, максимумы и минимумы которого являются необходимыми условиями

невязкой неустойчивости [14], при $M = 3$, $Re = 180$, $j = 0.004$ как в отсутствии подвода тепла: $Q = 0$ (а), так и с подогревом: $Q \neq 0$ (б). Прежде всего следует заметить, что зависимость скорости от координаты Дородницина – Ховарта (Y) практически не зависит от числа Маха. Это было подтверждено и расчетами при $M \ll 1$, 1,0, 2,0 и 4,0. За счет подогрева температура внутри слоя примерно в 2 раза превышает температуру на стенке, которая максимальна при отсутствии внутреннего подогрева. Обращает на себя внимание появление минимума наряду с максимумом в зависимости параметра K от Y . Он располагается вблизи стенки, в то время как его максимум находится в районе границы пограничного слоя. С учетом того, что шкала для параметра K на рис. 1, а сжата в два раза по сравнению со шкалой на рис. 1, б, максимальное значение K при внутреннем подводе тепла примерно в те же два раза меньше соответствующего значения K при отсутствии подогрева.

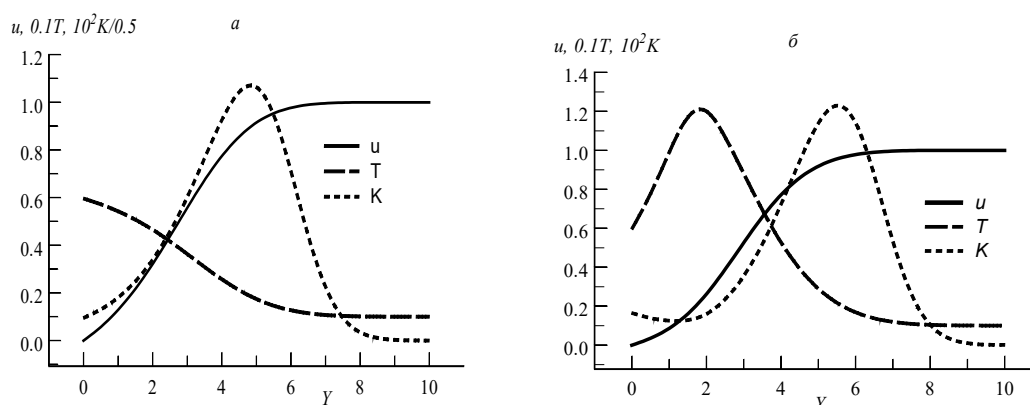


Рис. 1. Распределения по пограничному слою скорости, температуры и параметра K при $M = 3$ при отсутствии подвода тепла, $Q = 0$ (а) и при его подводе, $Q \neq 0$ (б)

Fig. 1. Distributions of velocity, temperature and parameter K across the boundary layer at $M = 3$ in heat supply absence, $Q = 0$ (a) and at its supply, $Q \neq 0$ (b)

При наличии точки перегиба (максимумы или минимумы функции $K(Y)$) для случая несжимаемой жидкости Фьёртофтом [15], а для газа в [15] получено дополнительное необходимое условие для невязкой неустойчивости: $(u - u_{s,l}) \frac{dK}{dY} < 0$, где u_s , u_{sl} – скорости в максимуме и минимуме функции $K(Y)$ соответственно. В случае без внутреннего подогрева (рис. 1, а) условие Фьёртофта при всех значениях u . При подводе тепла оно выполняется при u_s в диапазоне $u > u_{sl}$. При u_{sl} условие Фьёртофта выполняется при $u > u_s$. Таким образом, при внутреннем подходе суммарно условие Фьёртофта выполняется при $u > u_{sl}$.

На рис. 2 показана зависимость температуры (а) и параметра K (б) при внутреннем подходе и разных числах Маха ($Re = 180$, $j = 0,004$). Из приведенных данных следует, что при постоянной температуре торможения максимальная температура внутри слоя относительно температуры на внешней границе пограничного слоя возрастает, а величина параметра K уменьшается с увеличением числа Маха. Если отнести температуру в слое к температуре торможения, то ее максимальная внутри слоя величина будет практически неизменной при изменении числа Маха и равной $T^\circ K = T_{\max} / (1 + M^2(\gamma - 1) / 2) \approx 4T_0$. Что касается максимального значения параметра K , то оно в этом случае росло бы с ростом числа Маха. Например, при $M = 4$ оно равнялось бы примерно $13 \cdot 10^{-2}$, в то время как при $M = 0$ оставалось бы равным примерно $4 \cdot 10^{-2}$. Положение максимального значения $K = K_{\max}$ смещается к внешней границе

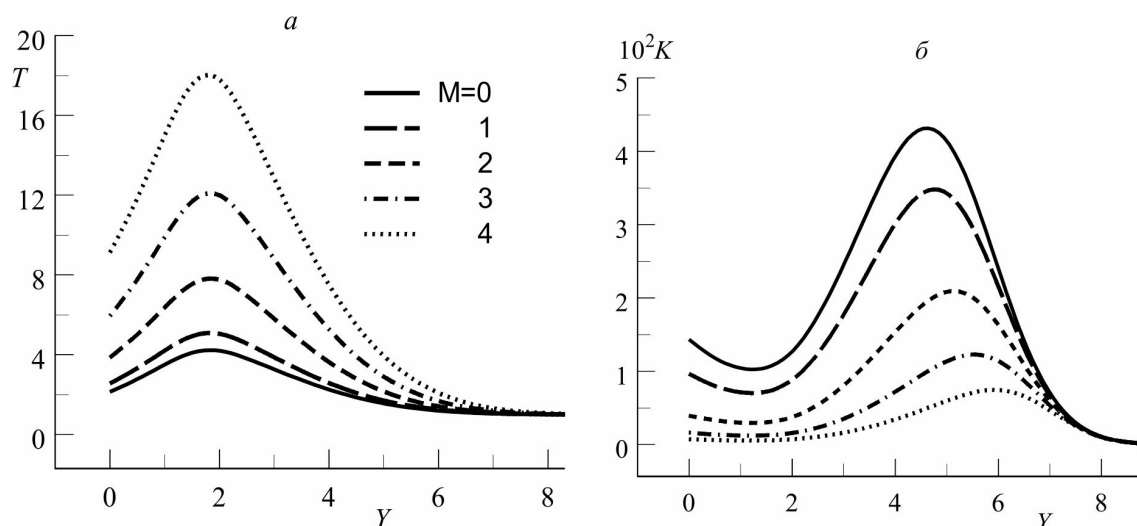


Рис. 2. Распределения по пограничному слою температуры (а) и параметра K (б) при внутреннем подогреве и разных числах Маха

Fig. 2. Distributions of temperature (a) and K parameter (b) across the boundary layer at internal heating and different Mach numbers

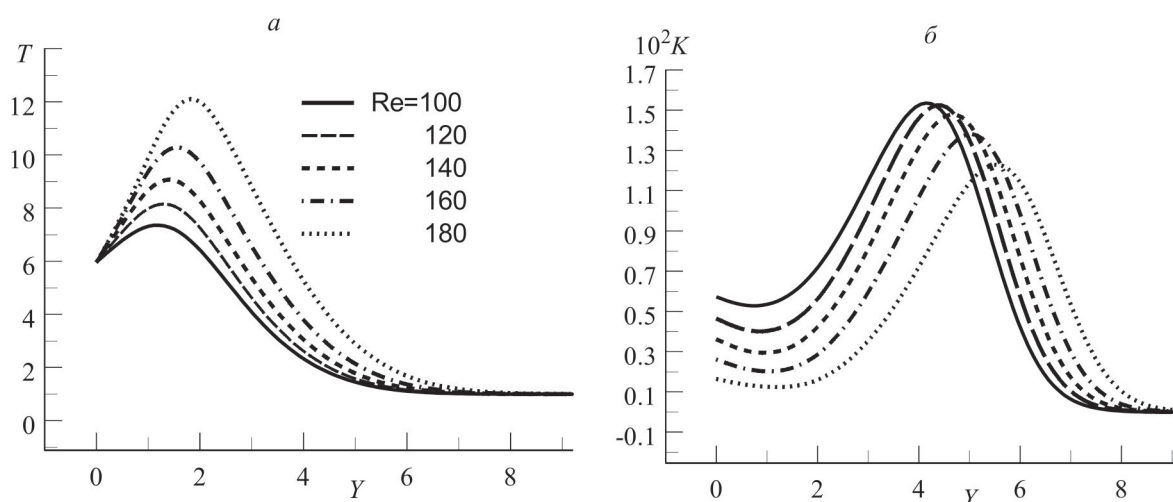


Рис. 3. Распределение по пограничному слою температуры (а) и параметра K (б) при внутреннем подогреве и разных числах Рейнольдса

Fig. 3. Boundary layer distribution of temperature (a) and parameter K (b) at internal heating and different Reynolds numbers

пограничного слоя с увеличением числа Маха. При этом минимальное значение K внутри слоя исчезает, и условие Фьёртофта начинает выполняться во всем диапазоне скоростей.

На рис. 3 приведены зависимости температуры (а) и параметра K (б) от нормальной координаты при разных числах Рейнольдса ($M = 3$, $j = 0,004$, $Q \neq 0$). Из данных рис. 3, а видно, что температура в пограничном слое растет вниз по течению (с увеличением числа Рейнольдса), в то время как K_{max} уменьшается. Положение минимального значения параметра $K = K_{min}$ практически не меняется, в то время как его максимальное значение сдвигается к внешней

границе пограничного слоя. Условие Фьёртофта выполняется при $u > u_{sI}$, в соответствии с вышеприведенным анализом.

2.2. На рис. 4 показаны зависимости пространственных степеней усиления – α_i кривой волны с разными углами наклона волнового вектора к направлению набегающего потока $\chi = \arctg(\beta / \alpha_r)$ при $M = 3$ ($Re = 180, j = 0,004$) от частотного параметра F . С увеличением угла χ область частот усиливающихся волн сужается преимущественно за счет высокочастотной части, а максимальные степени усиления уменьшаются. Поэтому ниже результаты будут представлены только для двумерных возмущений, $\chi = 0$.

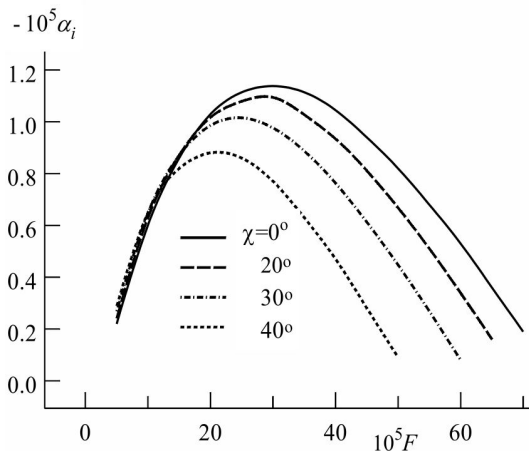


Рис. 4. Зависимости степеней усиления от частоты при разных направлениях волнового вектора к направлению основного течения

Fig. 4. Amplification rates dependences on frequency at different directions of the wave vector to the direction of the main flow

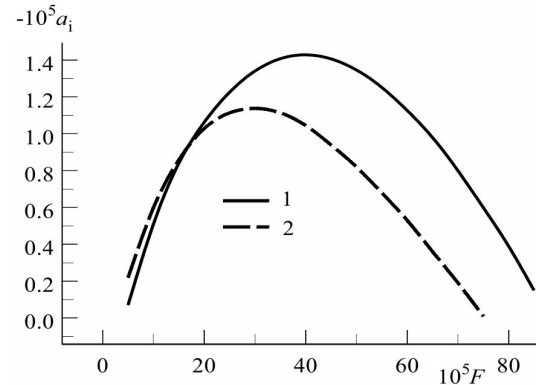


Рис. 5. Зависимость степеней усиления от частоты двумерной волны при отсутствии подвода тепла (1) и при внутреннем подогреве (2)

Fig 5. Amplification rates dependences on the frequency of a two-dimensional wave in the absence of heat supply (1) and at internal heating (2)

На рис. 5 сопоставлены степени усиления как при отсутствии подвода тепла, так и с внутренним подогревом. Видно стабилизирующее влияние внутреннего подогрева как за счет уменьшения степени усиления, так и за счет сужения частотной области нарастающих волн. Этот результат согласуется с данными работ по влиянию внутреннего подвода тепла на устойчивость пограничного слоя при дозвуковых скоростях с подачей однородного газа через пористую стенку [12] и при сверхзвуковом ($M = 2$) обтекании непроницаемой пластины [17].

Результаты вычислений степеней усиления и фазовых скоростей $C = F/\alpha_r$ при числе Маха $M = 3$ с подводом тепла при разных числах Рейнольдса (разные расстояния от передней кромки пластины) показаны на рис. 6. Из данных рис. 6, а видно смещение нарастающих волн в область низких частот с увеличением расстояния от кромки пластины. Изменение максимальных значений степеней усиления немонотонно. Например, максимальное значение $-\alpha_i$ при $Re = 180$ и 140 меньше соответствующего значения при $Re = 160$. Аналогичная немонотонность наблюдалась в [12] при том же значении j при $M \ll 1$, но отсутствовала в случае пограничного слоя на непроницаемой стенке [17].

С увеличением частоты темп увеличения фазовых скоростей замедляется (рис. 6, б) и в неустойчивой области достигает значения $C = C_{\max}$ на верхней ветке нейтральной кривой.

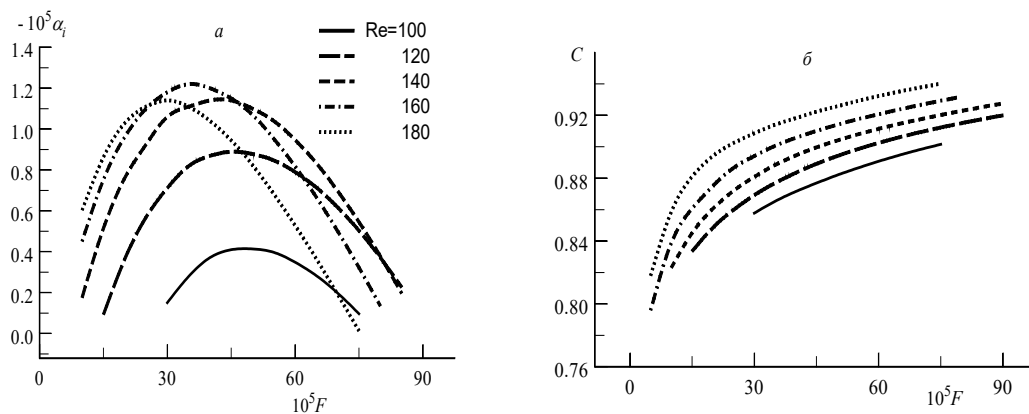


Рис. 6. Зависимости степеней усиления (а) и фазовых скоростей (б) от частоты двумерных волн при внутреннем подогреве при $M = 3, j = 0,004$ и разных числах Рейнольдса

Fig. 6. Dependences of amplification rates (a) and phase velocities (b) on the frequency of a two-dimensional waves under internal heating at $M = 3, j = 0,004$ and different Reynolds numbers

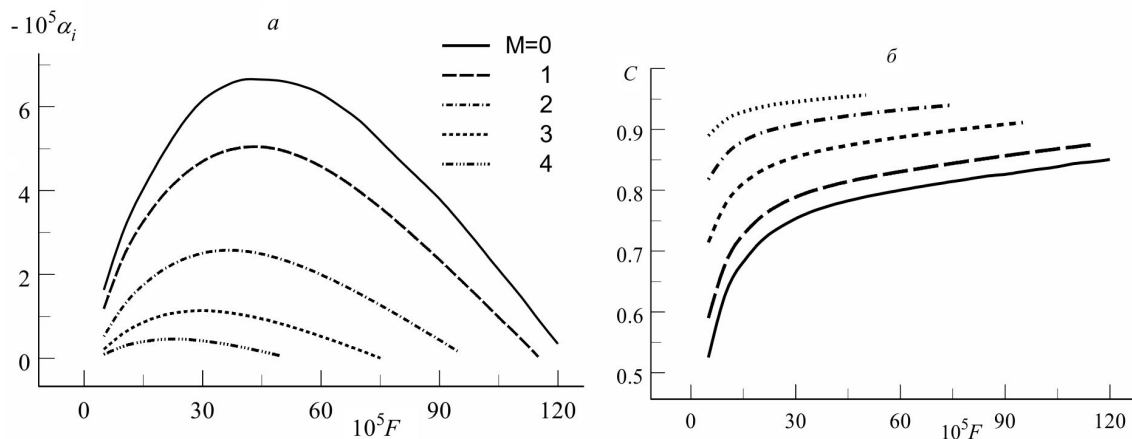


Рис. 7. Степени усиления (а) и фазовые скорости (б) в зависимости от частоты двумерных волн при внутреннем подогреве при $Re = 180, j = 0,004$ и разных числах Маха

Fig. 7. Amplification rates (a) and phase velocities (b) as a functions of frequency for the two-dimensional waves under internal heating at $Re = 180, j = 0,004$ and different Mach numbers

На рис. 7 показаны зависимости степеней усиления и фазовых скоростей от частоты двумерных волн при внутреннем подогреве при $Re = 180, j = 0,004$ и разных числах Маха. Из данных рис. 7, а видно сильное стабилизирующее влияние числа Маха. Например, при $M = 4$ максимальная степень усиления примерно в 14 меньше соответствующей величины при $M = 0$, а частотная полоса усиливающихся волн сокращается примерно в 3 раза. Сокращение частотной полосы происходит в основном за счет высоких частот. Фазовая скорость на верхней ветке нейтральной кривой увеличивается с ростом числа Маха.

Как при изменении числа Рейнольдса при $M = 3$, так и при изменении числа Маха при $Re = 180$ в неустойчивой области пограничного слоя скорость, равная фазовой скорости ($u = C$), удовлетворяет модифицированному условию Фьёртофта [15], как и в случае с дозвуковыми скоростями [12].

Влияние вязкости сказывается на разнице значений фазовой скорости на верхней ветке нейтральной кривой $C_{\max}$ и скорости u_s в обобщенной точке перегиба. Их сопоставление

приведено на рис. 8. При фиксированном значении числа Маха ($M = 3$) с увеличением числа Рейнольдса фазовая скорость на верхней ветке нейтральной кривой приближается к скорости в обобщенной точке перегиба (рис. 8, *a*). При достаточно большом удалении от передней кромки пластины ($Re = 180$) разница двух скоростей остается практически неизменной при изменении числа Маха (рис. 8, *б*) и достаточно малой величиной (примерно равной 2 % от скорости в обобщенной точке перегиба, u_s).

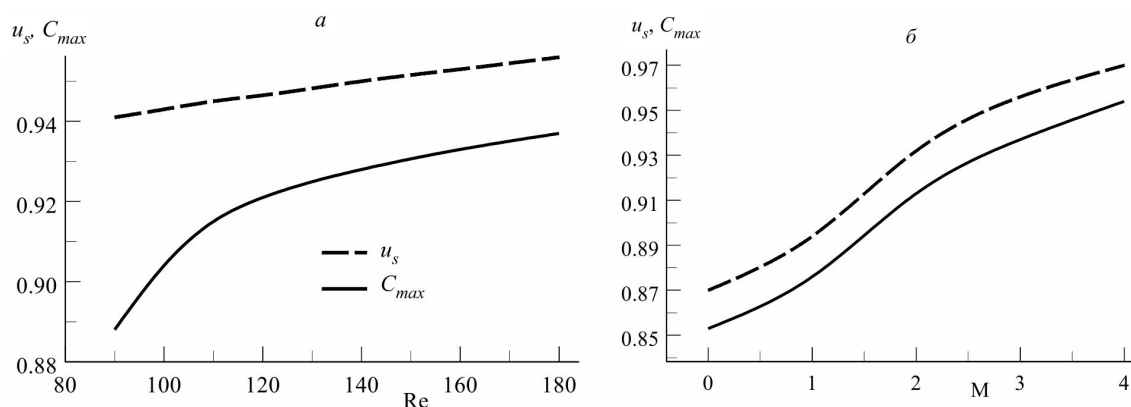


Рис. 8. Сопоставление фазовой скорости на верхней ветке нейтральной кривой и скорости в обобщенной точке перегиба при $M = 3$ (*a*) и $Re = 180$ (*б*)

Fig. 8. Comparison of the phase velocities on the upper branch of a neutral curve and the velocity at the generalized inflection point at $M = 3$ (*a*) and $Re = 180$ (*б*)

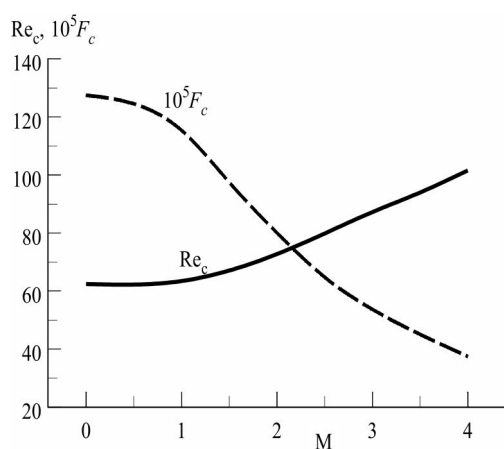


Рис. 9. Зависимость критических чисел Рейнольдса и соответствующих частот от числа Маха при подводе тепла
Fig. 9. Dependence of critical Reynolds numbers and the corresponding frequency on the Mach number at heat input

Стабилизирующее влияние числа Маха, наряду с его влиянием на степени нарастания, показанное на рис. 7, *a*, отражается на зависимостях критического числа Рейнольдса Re_c и соответствующей частоты F_c от числа Маха, показанных на рис. 9. При изменении числа Маха от $M = 0$ до $M = 4$ критическое число Рейнольдса увеличивается более чем в полтора раза. При этом частота в критической точке нейтральной кривой снижается примерно в три раза, что, по-видимому, связано с утолщением пограничного слоя с ростом числа Маха.

Заключение

На основании проведенных исследований влияния числа Маха на устойчивость пограничного слоя на пористой пластине с инжекцией однородного газа через ее поверхность и внутренним подводом тепла установлено следующее.

1. Наиболее растущими в пограничном слое являются двумерные волны, фронт которых параллелен передней кромке пластины.

2. Как и при отсутствии инжекции внутренний подвод тепла оказывает стабилизирующее влияние на пограничный слой, уменьшая степень усиления возмущения и частотную область растущих волн. При $M = 3$ максимальная степень усиления и частотная область усиливающихся волн за счет подвода тепла уменьшается примерно в полтора раза.

3. Как и в случае дозвуковых скоростей, при $M \geq 1$ в условиях инжекции газа и внутреннего подвода тепла максимальная по частоте степень усиления немонотонно зависит от числа Рейнольдса, в отличие от случая пограничного слоя на непроницаемой стенке [17].

4. Скорость потока в пограничном слое, равная фазовой скорости волны, удовлетворяет модифицированному условию Фьёртофта [15]. С увеличением расстояния от передней кромки пластины фазовая скорость на верхней ветке нейтральной кривой приближается к скорости в обобщенной точке перегиба. Например, при $Re = 180$ разница двух скоростей равнялась примерно 0,02 при всех числах Маха.

5. С увеличением числа Маха степень усиления и частотный диапазон нарастающих волн интенсивно снижаются, что ведет к увеличению критического числа Рейнольдса. Например, при $M = 4$ максимальная степень усиления примерно в 14 раз меньше соответствующей величины при $M = 0$, а частотная полоса усиливающихся волн сокращается примерно в 3 раза. При этом протяженность устойчивого пограничного слоя увеличивается примерно в 2 раза, а соответствующая ему частота уменьшается более чем в три раза. Снижение частоты, по-видимому, связано с утолщением пограничного слоя при увеличении числа Маха.

Список литературы

1. **Fomin V. V., Tretyakov P., Taran, J.-P.** Flow control using various plasma and aerodynamic approaches (short review) // *Aerospace Sci. and Technology*. 2004. Vol. 8, no. 5. P. 411–421. DOI:10.1016/j.ast.2004.01.005
2. **Bletzinger P., Ganguly B., Van Wie D., Garscadden A.** Plasmas in high speed aerodynamics // *J. of physics D: Applied physics*. 2005. Vol. 38, no. 4. P. R33–R57. DOI:10.1088/0022-3727/38/4/R01
3. **Zheltovodov A. A., Pimonov E. A., Knight D. D.** Energy deposition influence on supersonic flow over axisymmetric bodies // *AIAA Paper*. 2007. No. 2007–1230. 31 p. DOI:10.2514/6.2007-1230
4. **Knight D. D.** Survey of aerodynamic drag reduction at high speed by energy deposition // *J. of Propulsion and Power*. 2008. Vol. 24, no. 6. P. 1153–1167. DOI:10.2514/1.24595
5. **Левин В. А., Громов В. Г., Афонина Н. Е.** Численное исследование влияния локального энергоподвода на аэродинамическое сопротивление и теплообмен сферического затупления в сверхзвуковом потоке воздуха // *ПМТФ*. 2000. № 5. С. 171–179. <https://doi.org/10.1007/BF02468738>
6. **Георгиевский П. Ю., Левин В. А.** Сверхзвуковое обтекание тела при подводе тепла перед ним // *Тр. МИАН СССР. Современные математические проблемы механики и их приложения*. 1989. Т. 186. С. 197–202.

7. **Георгиевский П. Ю., Левин В. А.** Управление обтеканием различных тел с помощью локализованного подвода энергии в сверхзвуковой набегающий поток // МЖГ. 2003. № 5. P. 154–167. <https://doi.org/10.1023/B:FLUI.0000007841.91654.10>
8. **Казаков А. В., Коган М. Н., Курячий А. П.** Влияние на трение локального подвода тепла в турбулентный пограничный слой // МЖГ. 1997. № 1. С. 48–56. <https://doi.org/10.1007/BF02697935>
9. **Ларин О. Б., Левин В. А.** Энергоподвод к газу в турбулентном сверхзвуковом пограничном слое // ПМТФ. 2001. Т. 4, № 1. С. 98–101. <https://doi.org/10.1023/A:1018812729144>
10. **Лукашов В. В., Терехов В. В., Терехов В. И.** Пристенные течения химически реагирующих веществ. Обзор современного состояния проблемы // ФГФ. 2015. Т. 51, № 2. С. 23–36. <https://doi.org/10.1134/S0010508215020033>
11. **Гапонов С. А.** Приближенная формулировка проблемы устойчивости пограничного слоя с диффузионным горением // ФГВ. 2023. Том 59, № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.1134/S0010508223020120>
12. **Гапонов С. А.** Устойчивость пограничного слоя при внутреннем выделении тепла и подаче газа через пористую стенку // МЖГ. 2022. № 5. С. 41–50. <https://doi.org/10.1134/S0015462822050044>
13. **Volchkov E. P., Lukashov V. V., Terekhov V. V., Hanjalic K.** Characterization of the flame blow-off conditions in a laminar boundary layer with hydrogen injection // Combustion and Flame. 2013. Vol. 160. P. 1999–2008. DOI:10.1016/j.combustflame.2013.04.004
14. **Lees L.** The stability of the laminar boundary layer in a compressible fluid // NACA TR. 1947. No 876. 47 p. DOI:10.1090/psapm/001/0029654
15. **Fjortoft R.** Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for the baroclinic circular vortex // Geophys. Publ. Oslo. 1950. Vol. 17, no. 6. P. 1–52.
16. **Shin D. S., Ferziger J. H.** Linear stability of the reacting mixing layer // AIAA Journal. 1991. Vol. 29, no. 10. P. 1634–1642. <https://doi.org/10.2514/3.10785>.
17. **Гапонов С. А.** Устойчивость сверхзвукового пограничного слоя при подводе тепла // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 3. С. 351–360. <https://doi.org/10.1134/S0869864321030033>

References

1. **Fomin, V. V., Tretyakov, P., Taran, J.-P.** Flow control using various plasma and aerodynamic approaches (short review) // Aerospace Sci. and Technology. 2004. Vol. 8, no. 5. P. 411–421. DOI:10.1016/j.ast.2004.01.005
2. **Bletzinger, P., Ganguly, B., Van Wie, D., Garscadden, A.** Plasmas in high speed aerodynamics // J. of physics D: Applied physics. 2005. Vol. 38, no. 4. P. R33–R57. DOI:10.1088/0022-3727/38/4/R01
3. **Zheltovodov, A. A., Pimonov, E. A., Knight, D. D.** Energy deposition influence on supersonic flow over axisymmetric bodies // AIAA Paper. 2007. No. 2007–1230. 31 p. DOI:10.2514/6.2007-230
4. **Knight, D. D.** Survey of aerodynamic drag reduction at high speed by energy deposition // J. of Propulsion and Power. 2008. Vol. 24. No. 6. P. 1153–1167. DOI:10.2514/1.24595
5. **Levin, V. A., Gromov, V. G. & Afonina, N. E.** Numerical analysis of the effect of local energy supply on the aerodynamic drag and heat transfer of a spherically blunted body in a supersonic air flow // J Appl Mech Tech Phys. 2000. Vol. 41. P. 915–922. <https://doi.org/10.1007/BF02468738> (in Russ.)

6. **Georgievskii, P. Y., Levin, V. A.** Supersonic streamline of a body with heat input in front of it // Proceedings of the MIAS. 1989. Vol. 186. P. 197–202. (in Russ.)
7. **Georgievskii, P. Y., Levin, V. A.** Control of the flow past bodies using localized energy addition to the supersonic oncoming flow // Fluid Dynamics. 2003. Vol. 38. P. 794–805. <https://doi.org/10.1023/B:FLUI.0000007841.91654.10> (in Russ.)
8. **Kazakov, A. V., Kogan, M. N. & Kuryachii, A. P.** Effect of local heat supply to a turbulent boundary layer on the friction // Fluid Dynamics. 1997. Vol. 32. P. 39–45. <https://doi.org/10.1007/BF02697935> (in Russ.)
9. **Larin, O. B., Levin, V. A.** Energy Addition to a Gas in a Turbulent Supersonic Boundary Layer // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2001. Vol. 42. P. 87–90. <https://doi.org/10.1023/A:1018812729144> (in Russ.)
10. **Lukashov, V. V., Terekhov, V. V. & Terekhov, V. I.** Near-wall flows of chemical reactants: A review of the current status of the problem // Combust Explos Shock Waves. 2015. Vol. 51. P. 160–172. <https://doi.org/10.1134/S0010508215020033> (in Russ.)
11. **Gaponov, S. A.** Approximate formulation of the problem of boundary layer stability with diffusion combustion // Combust Explos Shock Waves. 2023. Vol. 59. P. 215–223. <https://doi.org/10.1134/S0010508223020120> (in Russ.)
12. **Gaponov, S. A.** Stability of the boundary layer with internal heat release and gas injection through a porous wall // Fluid Dynamics. 2022. Vol. 57. P. 587–596. <https://doi.org/10.1134/S0015462822050044> (in Russ.)
13. **Volchkov, E. P., Lukashov, V. V., Terekhov, V. V., Hanjalic, K.** Characterization of the flame blow-off conditions in a laminar boundary layer with hydrogen injection // Combustion and Flame. 2013. Vol. 160. P. 1999–2008. DOI:10.1016/j.combustflame.2013.04.004
14. **Lees L.** The stability of the laminar boundary layer in a compressible fluid // NACA TR. 1947. No 876. 47 p. DOI:10.1090/psapm/001/0029654
15. **Fjortoft, R.** Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for the baroclinic circular vortex // Geophys. Publ. Oslo. 1950. Vol. 17, no 6. P. 1–52.
16. **Shin, D. S., Ferziger, J. H.** Linear stability of the reacting mixing layer // AIAA Journal. 1991. Vol. 29, no 10. P. 1634–1642. <https://doi.org/10.2514/3.10785>.
17. **Gaponov, S. A.** Stability of a supersonic boundary layer with heat supply to a narrow band of the layer // Thermophys. Aeromech. 2021. Vol. 28. P. 327–335. <https://doi.org/10.1134/S0869864321030033> (in Russ.)

Сведения об авторе

Сергей Александрович Гапонов, доктор физико-математических наук

Information about the Author

Sergey A. Gaponov, Doctor of Science (Physics and Mathematics)

*Статья поступила в редакцию 07.08.2023; одобрена после рецензирования 08.08.2023;
принята к публикации 09.08.2023*

*The article was submitted 07.08.2023; approved after reviewing 08.08.2023;
accepted for publication 09.08.2023*

Научная статья

УДК 544.6.076.324.1

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

Использование композитов на основе МУНТ и Si в качестве анодного материала в литий-ионных аккумуляторах

Алексей Валерьевич Заворин¹, Сергей Иванович Мосеенков²,
Светлана Геннадьевна Столярова³, Александр Владимирович Окотруб⁴,
Владимир Львович Кузнецов⁵

^{1, 2, 5}Институт катализа СО РАН
Новосибирск, Россия

^{3, 4}Институт неорганической химии СО РАН
Новосибирск, Россия

¹Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹zavorin@catalysis.ru

²moseenkov@catalysis.ru

³sv.stolyarova93@gmail.com

⁴spectrum@niic.nsc.ru

⁵kuznet@catalysis.ru

Аннотация

В работе проведено исследование возможности использования композитов на основе многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), декорированных частицами кремния (Si) и карбида кремния (SiC) в качестве анодного материала в литий-ионных источниках тока. Композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC (с различным соотношением Si/SiC) получали путем высокотемпературной термической обработки МУНТ-Si с варьированием температуры прогрева (1040 и 1350 °C). Структура и фазовый состав исследуемых композитов были охарактеризованы с использованием методов ПЭМ и РФА. Определение удельной емкости композитов в качестве анодного материала проводили при плотностях тока от 0,05 до 2 А/г.

Ключевые слова

литий-ионный аккумулятор, многослойные углеродные нанотрубки, кремний, карбид кремния

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект АААА-А21-121011390054-1). Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов». Электрохимические испытания композитов проводили в Институте неорганической химии СО РАН в рамках проекта 21031700314-5. Авторы благодарят А. В. Ищенко за исследования композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC-1040 °C, МУНТ-SiC-1350 °C методом электронной микроскопии и Ц.-О. Цэндсуреэна за исследования МУНТ, МУНТ-Si, МУНТ-SiC-1040 °C, МУНТ-SiC-1350 °C методом РФА.

Для цитирования

Заворин А. В., Мосеенков С. И., Столярова С. Г., Окотруб А. В., Кузнецов В. Л. Использование композитов на основе МУНТ и Si в качестве анодного материала в литий-ионных аккумуляторах // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 66–75. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

Investigation of Composites Based on MWCNTs and Si as an Anode Material in Lithium-ion Batteries

Alexey V. Zavorin¹, Sergey I. Moseenkov²,
Svetlana G. Stolyarova³, Alexander V. Okotrub⁴,
Vladimir L. Kuznetsov⁵

^{1,2,5}Borisev Institute of Catalysis SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^{3,4}Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹zavorin@catalysis.ru

²moseenkov@catalysis.ru

³sv.stolyarova93@gmail.com

⁴spectrum@niic.nsc.ru

⁵kuznet@catalysis.ru

Abstract

In this work, we studied the possibility of using composites based on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) decorated with silicon (Si) and silicon carbide (SiC) particles as an anode material in lithium-ion current sources. MWCNT-Si and MWCNT-SiC composites (with different Si/SiC ratios) were obtained by high-temperature heat treatment of MWCNT-Si at different temperatures (1040 and 1350 °C). The structure and phase composition of the composites were characterized by TEM and XRD methods. The determination of the specific capacity of composites as an anode material was carried out at current densities from 0,05 to 2 A/g.

Keywords

Li-ion battery, multi-walled carbon nanotubes, silicon, silicon carbide

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental order for Borisev Institute of Catalysis (project AAAA-A21-121011390054-1). The studies were carried out using facilities of the shared research center “National center of investigation of catalysts” at Borisev Institute of Catalysis. Electrochemical tests of composites were carried out at the Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, within the framework of the project 21031700314-5. The authors are grateful to Ishchenko A.V. for the TEM characterization of MWCNT-Si, MWCNT -SiC-1040 °C, MWCNT -SiC-1350 °C composites and Tsendsuren Tsog-Ochir for studies of MWCNTs, MWCNT-Si, MWCNT -SiC-1040 °C, MWCNT -SiC-1350 °C by XRD method.

For citation

Zavorin A. V., Moseenkov S. I., Stolyarova S. G., Okotrub A. V., Kuznetsov V. L. Investigation of composites based on MWCNTs and Si as an anode material in lithium-ion batteries. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 66–75 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

Введение

За последние годы производство электронных устройств (мобильные телефоны, часы, автомобили и т. п.) выросло в несколько раз. С увеличением производства электроники вырос спрос на аккумуляторы, которые должны обеспечивать энергией электронные устройства на протяжении длительного времени. В 2013 г. мировой рынок аккумуляторов составлял 51 млрд долларов, в 2022 г. мировой рынок аккумуляторов составлял 99 млрд долларов, к 2027 г. ожидается рост мирового рынка до 250 млрд долларов (из них ~50 % Li-ion аккумуляторы).

В настоящее время в качестве анодного материала в литий-ионных батареях используются различные углеродные материалы: сажа, графит и др. Теоретическая удельная емкость анодов на основе углеродных материалов составляет ~370 мАч/г, так как для связывания 1 иона лития

требуется 6 атомов углерода [1–3]. Современные исследования в области разработки новых анодных материалов для литий-ионных источников тока показывают, что наиболее перспективными материалами в данной области являются композиты на основе кремния (обеспечивает связывание 4 атомов лития на 1 атом кремния – Li_4Si) и карбида кремния, теоретическая удельная емкость которых составляет 4200 мАч/г и 2600 мАч/г соответственно [4–9]. Вместе с тем кремний и карбид кремния не обладают достаточной ионной и электронной проводимостью, что ограничивает ток разряда таких материалов и не позволяет получать достаточной мощности с использованием анодов из этих материалов. Одним из путей повышения мощности (увеличения тока разряда) таких анодов может являться добавление многослойных углеродных нанотрубок с формированием 3-мерной проводящей структуры. Благодаря наличию уникальных структурных, механических и электрических свойств МУНТ [10–13], их использование в композитах с кремнием или карбидом кремния позволит увеличить электропроводность анодного материала и его механическую прочность, что, в свою очередь, позволит создавать материал с большими допустимыми токами заряда-разряда и увеличить его срок службы [1, 3, 14].

Целью данной работы являлось определение возможности использования композитов на основе МУНТ, модифицированных частицами Si и SiC, в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторах.

1. Экспериментальная часть

В работе были использованы многослойные углеродные нанотрубки, полученные путем каталитического разложения этилена на Fe-Co-катализаторах [15]. Удаление остаточных примесей катализатора синтеза МУНТ проводили путем их кипячения в 15 масс. % соляной кислоте в течение 4 часов. После кислотной обработки для удаления ионов H^+ и Cl^- образец был промыт большим количеством дистиллированной воды. Полноту удаления контролировали путем измерения удельной электропроводности промывных вод (не более 20 мкСм/см). Сушку проводили в сушильном шкафу при $T = 80^\circ\text{C}$ в течение 3 суток.

Нанесение наноразмерных частиц кремния осуществляли методом газофазного химического осаждения (CVD) с использованием реакции термического разложения моносилана (99.994 %) на поверхность МУНТ в псевдооживленном слое при 500°C [14, 16]. Основные характеристики исходных МУНТ и полученного композита МУНТ-Si представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики исходных МУНТ и композита МУНТ-Si

Table 1

Main characteristics of initial MWCNTs and MWCNT-Si composite

Исходные МУНТ	Условия нанесения SiH_4	Содержание Si, вес %		$D_{\text{cp}} (D_{\text{min}}-D_{\text{max}}),$ частиц Si, нм	$S_{\text{уд}}$ (МУНТ-Si), м ² /г
		Метод сжигания	ЭДС*		
$\langle d \rangle = 9,5$ нм $S = 240$ м ² /г $\rho = 0,12$ г/см ³	$T = 500^\circ\text{C}$ в токе аргона (Ar/SiH ₄ =1/0,1), время нанесения – 5 ч	56	57	19,6 (7–33)	80,5

* – энергодисперсионная спектроскопия

Получение карбида кремния на поверхности МУНТ проводили путем термической обработки исходных композитов МУНТ-Si в вакууме (10^{-6} мбар, 60 мин.) при температурах 1040 и 1350 °С (композиты МУНТ-SiC – 1040 °С и МУНТ-SiC – 1350 °С). Образование частиц карбида кремния происходило в результате взаимодействия нанесенных частиц кремния со стенками МУНТ. Степень превращения Si в SiC (α_{SiC}) в полученных композитах МУНТ-SiC составляла по данным РФА 0,29 и 1 для образцов, полученных при 1040 °С и 1350 °С соответственно [15].

Определение удельной емкости наноразмерных анодных материалов на основе композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC проводили в ходе зарядно-разрядных тестовых испытаний. Электрохимические свойства образцов исследовались в ячейках типа «таблетка» форм-фактора CR2032 с литиевым противоэлектродом. Рабочие электроды были изготовлены методом прокатки электродного материала. Образцы (80 масс. %), super P (10 масс. %) и поливинилиденфторид (10 масс. %) смешивали с N-метил-2-пирролидиноном (NMP) и полученную суспензию наносили на медную фольгу диаметром 14 мм и толщиной 0,02 мм, а затем сушили при 80 °С в течение 12 ч в вакууме. Масса анодного материала на электроде составляла 0,4–0,5 мг. Электролитом служил 1,0 М раствор LiPF_6 в смеси этиленкарбонат / диметилкарбонат (1 : 1 по объему). Полученные ячейки тестировались в гальваностатическом режиме на зарядно/разрядной станции NEWARE CT-3008 (Neware Technology Ltd., Shenzhen, China) в диапазоне от 0,01 до 2,5 В при плотностях тока 0,05–2 А/г.

Исследование структуры и фазового состава композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ, микроскоп JEM-2010, JEOL) и метода рентгенофазового анализа (РФА, дифрактометр ARL X'TRA на медном излучении $\text{CuK}\alpha = 0,15418$ нм).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Охарактеризование композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC

На рис. 1 приведены электронно-микроскопические снимки композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040 °С и МУНТ-SiC – 1350 °С.

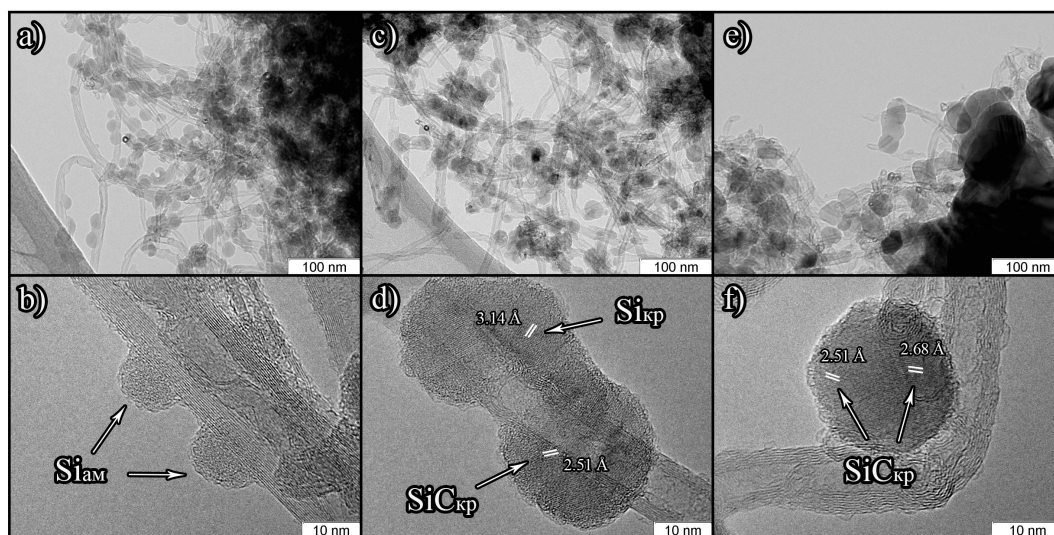


Рис. 1. Изображения ПЭМ: *a, b* – исходный композит МУНТ-Si; *c, d* – композит МУНТ-SiC – 1040 °С; *e, f* – композит МУНТ-SiC – 1350 °С

Fig. 1. TEM images: *a, b* – initial MWCNT-Si composite; *c, d* – MWCNT-SiC – 1040 °C composite; *e, f* – MWCNT-SiC – 1350 °C composite

Было установлено, что для исходных композитов характерно образование частиц кремния с аморфной структурой (рис. 1, *a, b*). Повышение температуры обработки до $T = 1040^\circ\text{C}$ приводит к перестройке структуры кремниевых частиц из аморфной в кристаллическую. Кроме того, при $T = 1040^\circ\text{C}$ происходит взаимодействие частиц кремния с поверхностью углеродных нанотрубок с образованием частиц SiC, что подтверждается данными ПЭМ (рис. 1, *c, d*) и наличием рефлексов на рентгенограммах (рис. 2, *a*).

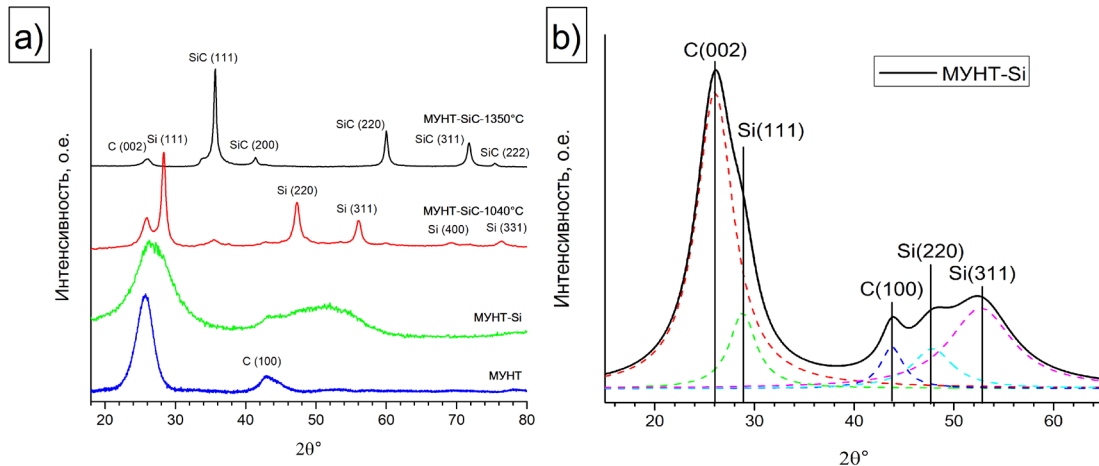


Рис. 2. *a* – рентгенограммы МУНТ, МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040°C и МУНТ-SiC – 1350°C ; *b* – разложение рентгенограммы композита МУНТ-Si на компоненты C и Si

Fig. 2. *a* – X-ray diffraction patterns of MWCNTs, MWCNT-Si, MWCNT-SiC – 1040°C and MWCNT-SiC – 1350°C ; *b* – decomposition of the X-ray diffraction pattern of the MWCNT-Si composite into C and Si components

При температуре обработки 1040°C были зафиксированы рефлексы, соответствующие $\text{Si}_{\text{кр}}$ с кристаллографическими гранями $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, $\{400\}$, $\{331\}$ и $\text{SiC}_{\text{кр}}$ с гранями $\{111\}$ и $\{200\}$. Также были зафиксированы межплоскостные расстояния (рис. 1, *d*), соответствующие кристаллическому кремнию ($3,14 \text{ \AA}$) и карбиду кремния ($2,51 \text{ \AA}$). Соотношение Si/SiC по данным РФА составило $0,71 : 0,29$. Увеличение температуры обработки до 1350°C приводит к полному расходу Si на образование SiC и спеканию первичных частиц карбида кремния в частицы неправильной формы размером более 50 нм (рис. 1, *e*) [17]. Так, на снимках ПЭМ наблюдались частицы с межплоскостными расстояниями (рис. 1, *f*), соответствующими только SiC ($2,51$ и $2,68 \text{ \AA}$).

С использованием РФА были зафиксированы рефлексы соответствующие $\text{SiC}_{\text{кр}}$ с кристаллографическими гранями $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$, $\{311\}$ и $\{222\}$. Кроме того, было зафиксировано уменьшение интенсивности рефлексов C(002) и C(100), что связано с расходом углерода при взаимодействии стенок МУНТ с частицами Si, сопровождающегося уменьшением количества стенок углеродных нанотрубок (соответствует уширению рефлексов C(002)).

Таким образом, структура полученных композитов была исследована двумя независимыми методами ПЭМ и РФА. Установлено, что в исходных композитах МУНТ-Si на поверхности углеродных нанотрубок содержатся частицы кремния с аморфной структурой. После температурной обработки при 1040°C происходит перестройка структуры кремния из аморфной в кристаллическую и образуются частицы карбида кремния. При увеличении температуры до 1350°C происходит полное расхождение кремниевых частиц на образование частиц карбида кремния.

2.2. Электрохимические свойства композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC

Полученные композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC были испытаны в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторе. В результате проведенных измерений было определено, что исходная емкость анодного материала на основе композита МУНТ-Si равна 1600 мАч/г, которая уменьшается до ~600 мАч/г через 10 циклов заряда-разряда при токе 0,03 С (0,05 А/г) (рис. 3, а), что, по-видимому, связано с разрушением кремниевых частиц в процессе литирования.

Для полученных образцов композитов МУНТ-SiC также была исследована возможность использования их в качестве анодного материала литий-ионных аккумуляторов. Для этого было исследовано изменение удельной емкости в процессе заряда-разряда аккумуляторов с анодным материалом на основе композитов МУНТ-SiC, полученных при $T = 1040^\circ\text{C}$ ($\alpha_{\text{SiC}} = 0,29$) и $T = 1350^\circ\text{C}$ ($\alpha_{\text{SiC}} = 1$) [17].

На рис. 3, а представлены зависимости удельной емкости трех композитов от различной плотности тока для каждых 10 циклов. Установлено, что исходное значение удельной емкости для композита МУНТ-SiC – 1040°C достигает 1000 мАч/г. Через 10 циклов заряда-разряда емкость композитов падает до 570 мАч/г, уменьшение емкости, по-видимому, связано с разрушением непрореагировавших с поверхностью МУНТ частицами кремния. Композит МУНТ-SiC – 1350°C , содержащий на поверхности МУНТ только частицы карбида кремния, на протяжении всего времени тестирования, показал емкость композита ~ 170–180 мАч/г, что указывает на высокую стабильность частиц SiC на поверхности МУНТ в процессе заряда-разряда аккумуляторов.

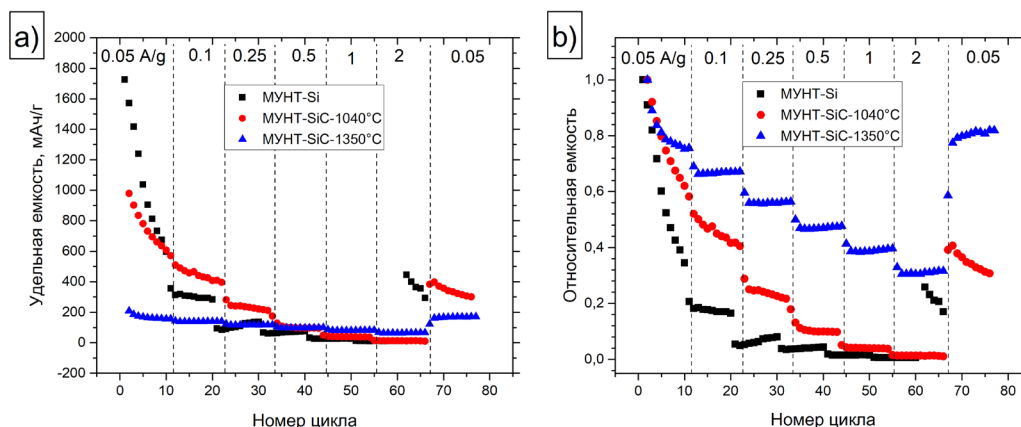


Рис. 3. Зависимость удельной (а) и относительной (б) емкости батарей с использованием анодного материала на основе композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC от приложенной плотности тока

Fig. 3. Dependence of the specific (a) and relative (b) capacity of batteries using an anode material based on MWCNT-Si and MWCNT-SiC composites on the applied current density

Таким образом, установлено, что анодный материал на основе композита МУНТ-SiC- 1350°C ($\alpha_{\text{Si}} = 1$) демонстрирует наиболее стабильную работу в ходе электрохимических испытаний, демонстрируя потерю удельной емкости около 18 % от начального значения, после 80 циклов заряда-разряда, что меньше потерь удельной емкости композитов МУНТ-SiC – 1040°C (60–70 %) и МУНТ-Si (до 83 %). Такое различие в изменении емкости обусловливается различной структурой используемых композитов. В композитах МУНТ-Si и МУНТ-SiC – 1040°C высокая начальная удельная емкость обусловлена наличием частиц кремния на поверхности МУНТ, но в связи с тем, что при литировании происходит увеличение их объема в несколько раз [6], происходит разрушение частиц кремния, что приводит к необратимой потере емкости.

В композите МУНТ-SiC – 1350 °C на поверхности МУНТ присутствуют только частицы карбида кремния, которые обеспечивают стабильную работу анодного материала в процессах заряда-разряда. Также необходимо отметить, что при высоких токах заряда-разряда 10C (2A/г), анодный материал на основе композита МУНТ-SiC – 1350 °C демонстрирует потерю удельной емкости не более 60–70 %, а при последующих циклах заряда-разряда при токе 0,25C (0,05 A/г) удельная емкость такого анодного материала восстанавливается до 83 % от исходной. Это указывает, что полученные композиты МУНТ-SiC – 1350 °C могут быть использованы в высокомоощных аккумуляторах.

Полученные данные об удельной емкости композитов на основе МУНТ, модифицированных частицами Si и SiC, указывают на перспективность их возможного практического использования в качестве анодного материала в литий-ионных источниках тока: композиты МУНТ-Si демонстрируют высокую начальную удельную емкость и могут быть использованы в слаботочных высокеемких аккумуляторах, а МУНТ-SiC – высокую стабильность при высоких токах заряда-разряда, что открывает возможность их использования в силовых аккумуляторах. Для определения оптимального состава и структуры композита требуется проведение дополнительных исследований. Так, для композитов МУНТ-Si необходимо определить возможность замедления процесса разрушения частиц кремния, например, за счет нанесения стабилизирующего слоя углерода на поверхность частиц кремния или образования слоя SiO₂ на их поверхности. Для композитов МУНТ-SiC – возможность увеличения дисперсности частиц SiC на поверхности МУНТ для увеличения удельной емкости.

Заключение

Было проведено исследование композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040 °C и МУНТ-SiC – 1350 °C в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторах. Установлено, что композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC – 1040 °C показали высокую начальную удельную емкость, которая обусловлена наличием частиц кремния. Вместе с тем данные композиты также демонстрируют наибольшую необратимую потерю удельной емкости в процессе циклирования (83 и 60–70 % соответственно) за счет разрушения частиц кремния в процессе литирования. В то же время композит МУНТ-SiC – 1350 °C в ходе электрохимических испытаний в качестве анодного материала показал наиболее стабильную работу по сравнению с остальными композитами даже при высоких токах заряда-разряда 10 C (2 A/г). В дальнейшем исследования по определению возможности использования композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC будут продолжены в направлении создания защитных покрытий на поверхности нанесенных частиц, нахождения оптимального состава и структуры композита, сочетающего в себе как высокую удельную емкость и мощность, так и длительную стабильную работу анодного материала.

Список литературы

1. **de las Casas C., LiW.** A Review of Application of Carbon Nanotubes for Lithium Ion Battery Anode Material // Journal of Power Sources. 2012. Vol. 208. P. 74–85. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.013
2. **Lahiri I., Choi W.** Carbon Nanostructures in Lithium Ion Batteries: Past, Present, and Future // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2013. Vol. 38. P. 128–166. doi:10.1080/10408436.2012.729765
3. **Sehrawat P., Julien C., Islam S. S.** Carbon Nanotubes in Li-Ion Batteries: A Review // Materials Science and Engineering: B. 2016. Vol. 213. Vol. 12–40. doi:10.1016/j.mseb.2016.06.013
4. **Sun X., Shao C., Zhang F., Li Y., Wu Q.-H., Yang Y.** SiC Nanofibers as Long-Life Lithium-Ion Battery Anode Materials // Front. Chem. 2018. Vol. 6, № 166. doi:10.3389/fchem.2018.00166

5. **Sun K., Wang T., Gong W., Lu W., He X., Eddings E. G., Fan M.** Synthesis and Potential Applications of Silicon Carbide Nanomaterials / Nanocomposites // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. P. 32571–32587. doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.204
6. **Park M.-H., Kim M. G., Joo J., Kim K., Kim J., Ahn S., Cui Y., Cho J.** Silicon Nanotube Battery Anodes. *Nano Letters* 2009, 9, 3844–3847, doi:10.1021/nl902058c.
7. **Li P., Zhao G., Zheng X., Xu X., Yao C., Sun W., Dou S. X.** Recent Progress on Silicon-Based Anode Materials for Practical Lithium-Ion Battery Applications // *Energy Storage Materials*. 2018. doi:10.1016/j.ensm.2018.07.014
8. **Chadha U., Hafiz M., Bhardwaj P., Padmanaban S., Sinha S., Hariharan S., Kabra D., Venkatarangan V., Khanna M., Selvaraj S. K., et al.** Theoretical Progresses in Silicon Anode Substitutes for Lithium-Ion Batteries // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. P. 105352. doi:10.1016/j.est.2022.105352
9. **Zhang H., Xu H.** Nanocrystalline Silicon Carbide Thin Film Electrodes for Lithium-Ion Batteries // *Solid State Ionics*. 2014. Vol. 263. P. 23–26. doi:10.1016/j.ssi.2014.04.020
10. **Fang S., Shen L., Zhang X.** Application of Carbon Nanotubes in Lithium-Ion Batteries // *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*. Elsevier, 2017. P. 251–276.
11. **Mathur R. B., Singh B. P., Pande S.** Carbon Nanomaterials: Synthesis, Structure, Properties and Applications. CRC press: Boca Raton, 2017.
12. **Rathinavel S., Priyadharshini K., Panda D.** A Review on Carbon Nanotube: An Overview of Synthesis, Properties, Functionalization, Characterization, and the Application // *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 268. P. 115095. doi:10.1016/j.mseb.2021.115095
13. **Miao M.** Electrical Conductivity of Pure Carbon Nanotube Yarns // *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 3755–3761. doi:10.1016/j.carbon.2011.05.008
14. **Coppey N., Noé L., Monthieux M., Caussat B.** Decorated Carbon Nanotubes by Silicon Deposition in Fluidized Bed for Li-Ion Battery Anodes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. Vol. 91. P. 2491–2496. doi:10.1016/j.cherd.2013.01.002
15. **Kuznetsov V. L., Krasnikov D. V., Schmakov A. N., Elumeeva K. V.** In Situ and Ex Situ Time Resolved Study of Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation during MWNT Synthesis: Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation // *Phys. Status Solidi B*. 2012. Vol. 249. P. 2390–2394. doi:10.1002/pssb.201200120
16. **Zavorin A. V., Kuznetsov V. L., Moseenkov S. I., Tsendsuren T.-O., Volodin V. A., Galkin P. S., Ishchenko A. V.** Chemical Vapor Deposition of Silicon Nanoparticles on the Surface of Multiwalled Carbon Nanotubes // *Journal Struct. Chem*. 2020. Vol. 61. Vol. 617–627. doi:10.1134/S0022476620040162
17. **Заворин А. В., Мосеенков С. И., Селютин А. Г., Серкова А. Н., Цэндсүрэн Ц.-О., Кузнецов В. Л.** Влияние термической обработки на структуру композитов МУНТ-Si. 2022. С. 76–77 [Электронный ресурс]. URL: <http://Conf.Nsc.Ru/SRTCfM-2022/En/Invitation>

References

1. **de las Casas C., Li W.** A Review of Application of Carbon Nanotubes for Lithium Ion Battery Anode Material. *Journal of Power Sources* 2012, 208, 74–85, doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.013.
2. **Lahiri I., Choi W.** Carbon Nanostructures in Lithium Ion Batteries: Past, Present, and Future. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 2013, 38, 128–166, doi:10.1080/10408436.2012.729765.
3. **Sehrawat P., Julien C., Islam S. S.** Carbon Nanotubes in Li-Ion Batteries: A Review. *Materials Science and Engineering: B* 2016, 213, 12–40, doi:10.1016/j.mseb.2016.06.013.
4. **Sun X., Shao C., Zhang F., Li Y., Wu Q.-H., Yang Y.** SiC Nanofibers as Long-Life Lithium-Ion Battery Anode Materials. *Front. Chem*. 2018, 6, 166, doi:10.3389/fchem.2018.00166.

5. **Sun K., Wang T., Gong W., Lu W., He X., Eddings E. G., Fan M.** Synthesis and Potential Applications of Silicon Carbide Nanomaterials / Nanocomposites. *Ceramics International* 2022, 48, 32571–32587, doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.204.
6. **Park M.-H., Kim M. G., Joo J., Kim K., Kim J., Ahn S., Cui Y., Cho J.** Silicon Nanotube Battery Anodes. *Nano Letters* 2009, 9, 3844–3847, doi:10.1021/nl902058c.
7. **Li P., Zhao G., Zheng X., Xu X., Yao C., Sun W., Dou S. X.** Recent Progress on Silicon-Based Anode Materials for Practical Lithium-Ion Battery Applications. *Energy Storage Materials* 2018, doi:10.1016/j.ensm.2018.07.014.
8. **Chadha U., Hafiz M., Bhardwaj P., Padmanaban S., Sinha S., Hariharan S., Kabra D., Venkatarangan V., Khanna M., Selvaraj S. K., et al.** Theoretical Progresses in Silicon Anode Substitutes for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Energy Storage* 2022, 55, 105352, doi:10.1016/j.est.2022.105352.
9. **Zhang H., Xu H.** Nanocrystalline Silicon Carbide Thin Film Electrodes for Lithium-Ion Batteries. *Solid State Ionics* 2014, 263, 23–26, doi:10.1016/j.ssi.2014.04.020.
10. **Fang S., Shen L., Zhang X.** Application of Carbon Nanotubes in Lithium-Ion Batteries. In *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*, Elsevier, 2017, pp. 251–276 ISBN 978-0-323-41481-4.
11. **Mathur R.B., Singh B.P., Pande S.** *Carbon Nanomaterials: Synthesis, Structure, Properties and Applications*, CRC press: Boca Raton, 2017, ISBN 978-1-4987-0210-2.
12. **Rathinavel S., Priyadharshini K., Panda D.** A Review on Carbon Nanotube: An Overview of Synthesis, Properties, Functionalization, Characterization, and the Application. *Materials Science and Engineering: B* 2021, 268, 115095, doi:10.1016/j.mseb.2021.115095.
13. **Miao M.** Electrical Conductivity of Pure Carbon Nanotube Yarns. *Carbon* 2011, 49, 3755–3761, doi:10.1016/j.carbon.2011.05.008.
14. **Coppey N., Noé L., Monthieux M., Caussat B.** Decorated Carbon Nanotubes by Silicon Deposition in Fluidized Bed for Li-Ion Battery Anodes. *Chemical Engineering Research and Design* 2013, 91, 2491–2496, doi:10.1016/j.cherd.2013.01.002.
15. **Kuznetsov V. L., Krasnikov D. V., Schmakov A. N., Elumeeva K. V.** In Situ and Ex Situ Time Resolved Study of Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation during MWNT Synthesis: Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation. *Phys. Status Solidi B* 2012, 249, 2390–2394, doi:10.1002/pssb.201200120.
16. **Zavorin A. V., Kuznetsov V. L., Moseenkov S. I., Tsendsuren T.-O., Volodin V. A., Galkin P. S., Ishchenko A. V.** Chemical Vapor Deposition of Silicon Nanoparticles on the Surface of Multiwalled Carbon Nanotubes. *J Struct Chem* 2020, 61, 617–627, doi:10.1134/S0022476620040162.
17. **Zavorin A. V., Moseenkov S. I., Selyutin A. G., Serkova A. N., Tsendsuren T.-O., Kuznetsov V. L.** Effect of Heat Treatment on the Structure of MWCNT-Si Composites. 2022. P. 76-77. [Electronic resource]. URL: <http://Conf.Nsc.Ru/SRTCfM-2022/En/Invitation>

Сведения об авторах

Алексей Валерьевич Заворин, аспирант

Сергей Иванович Мосеенков, кандидат химических наук

Светлана Геннадьевна Столярова, кандидат химических наук

Александр Владимирович Окотруб, доктор физико-математических наук

Владимир Львович Кузнецов, кандидат химических наук

Information about the Authors

Alexey V. Zavorin, Post-Graduate Student

Sergey I. Moseenkov, Candidate of Chemical Sciences

Svetlana G. Stolyarova, Candidate of Chemical Sciences, Researcher

Alexander V. Okotrub, Doctor of Science (Physics and Mathematics)

Vladimir L. Kuznetsov, Candidate of Chemical Sciences

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023;
принята к публикации 13.05.2023*

*The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023;
accepted for publication 13.05.2023*

Научная статья

УДК 621.362

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-76-82

Теплофизические свойства халькогенидных полупроводниковых соединений и влияние дефектов на их свойства

**Гусейн Абакарович Мустафаев¹,
Джамиля Гусейновна Мустафаева²,
Марат Гусейнович Мустафаев³**

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет)
Владикавказ, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-3407-3596>

²dzhamilya79@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1694-1230>

³mshadow@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4250-7972>

Аннотация

Для повышения эффективности преобразования термоэлектрических устройств ведется поиск и изучение новых термоэлектрических материалов. Применение таких материалов, как халькогениды металлов в технике для создания преобразователей, термоэлементов и элементов функциональной электроники вызывает интерес. В связи с этим актуальным является исследование теплофизических свойств и влияние дефектов на свойства этих материалов. Халькогениды металлов первой группы обладают сильной зависимостью свойств от собственной дефектности структур. Увеличение степени дефектности обуславливает уменьшение температуры фазового перехода, что вызывается уменьшением сил межатомного взаимодействия. Увеличение теплопроводности с увеличением содержания халькогена обусловлено преобладающим ростом электронной теплопроводности над уменьшением фононной составляющей, на величину решеточной теплопроводности оказывает влияние дефектность кристаллической решетки.

Ключевые слова

дефект, состав, свойства, электропроводность, концентрация, подвижность, теплопроводность

Для цитирования

Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Теплофизические свойства халькогенидных полупроводниковых соединений и влияние дефектов на их свойства // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 76–82. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-76-82

© Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2

Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Thermophysical Properties of Chalcogenide Semiconductor Compounds and the Effect of Defects on Their Properties

Gusein A. Mustafaev¹, Dzhamilya G. Mustafaeva²,
Marat G. Mustafaev³

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute
(State Technological University)
Vladikavkaz, Russian Federation

¹<https://orcid.org/0000-0002-3407-3596>

²dzhamilya79@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1694-1230>

³mshadow@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4250-7972>

Annotation

To improve the conversion efficiency of thermoelectric devices, new thermoelectric materials are being searched and studied. The use of materials such as metal chalcogenides in engineering for the creation of converters, thermoelements, and functional electronics elements is of interest. In this regard, it is topical to study the thermophysical properties and the effect of defects on the properties of these materials. The chalcogenides of the metals of the first group have a strong dependence of their properties on the intrinsic defectiveness of the structures. An increase in the degree of imperfection causes a decrease in the phase transition temperature, which is caused by a decrease in the forces of interatomic interaction. An increase in thermal conductivity with an increase in the chalcogen content is due to the prevailing increase in the electronic thermal conductivity over a decrease in the phonon component; the value of the lattice thermal conductivity is affected by the imperfection of the crystal lattice.

Keywords

defect, composition, properties, electrical conductivity, concentration, mobility, thermal conductivity

For citation

Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G. Thermophysical properties of chalcogenide semiconductor compounds and the effect of defects on their properties. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 76–82 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-76-82

Введение

Термоэлектрические материалы стали объектами повышенного внимания исследователей, направленного на повышение эффективности термоэлектрических устройств различного назначения. Для улучшения эффективности преобразования термоэлектрических устройств ведутся исследования и поиск новых термоэлектрических материалов с высоким значением параметра добротности [1–12]. При этом учитывают, что каждый материал имеет свои теплофизические свойства, которые определяет область его применения. К термоэлектрическим материалам относятся и неорганические соединения на основе халькогенидов металлов.

Неорганические соединения на основе халькогенидов металлов, в частности халькогениды элементов первой группы $A^I B^{VI}$ (A^I – Cu, Ag; B^{VI} – S, Se, Te) имеют большой разброс по кинетическим свойствам вследствие их сильной зависимости от собственной дефектности структур, и тенденции к самокомпенсации дефектов. В связи с возможностью применения халькогенидов металлов в технике для создания преобразователей, термоэлементов и элементов функциональной электроники целью работы является исследование теплофизических свойств и влияние дефектов на их свойства.

Материалы и методы

Исследования проводились на халькогенидах металлов первой группы. При исследовании использовались методы: электрохимический метод, который обеспечивает контролируемую диффузию ионов металла; зондовый метод измерения электропроводности, термоЭДС.

По результатам измерений электропроводности и термоЭДС определяли электронную составляющую теплопроводности. При измерении теплопроводности применен статический метод, который позволяет определить тепловой поток через образец как разность между тепловым потоком, создаваемым нагревателем, и потоком, возникающим за счет ухода тепла с нагревателя, в окружающую среду.

Образцы халькогенидов получены сплавлением исходных компонентов в вакуумированных кварцевых ампулах. Для синтеза в качестве исходных материалов использовали медь, серебро, серу и селен марки ОСЧ и теллур марки ТА-1, очищенные после двукратной возгонки в вакууме. Запаянную ампулу помещали в печь. Подъем температуры производился медленно до температуры на 323–333 К выше температуры плавления соответствующего соединения (при этих температурах ампулы выдерживали в течение нескольких часов) с часовыми выдержками при температурах начала реакции между исходными компонентами. А затем охлаждали до температуры на 303–313 К ниже температуры плавления соединений. Гомогенизация осуществлялась отжигом в запаянных ампулах в течение 873–1073 К в течение 6–8 часов.

При исследовании температурной зависимости кинетических свойств полупроводниковых соединений халькогенидов меди при определенных температурах наблюдается скачок электропроводности и термоЭДС. Эта аномалия наблюдается при температурах фазового перехода.

Теплофизические свойства и влияние дефектов на процессы в халькогенидах элементов первой группы

Анализ диаграмм состояния систем $A^I - B^VI$ показывает, что соединения A_2B^{VI} кристаллизуются с отклонением от стехиометрии, в системах образуются фазы переменного состава [13; 14].

Особенностями халькогенидов металлов являются наличие ряда полиморфных превращений и множество различных модификаций при незначительно отличающихся составах.

Халькогениды металлов первой группы обладают сильной зависимостью свойств от собственной дефектности структур. Проведенные исследования показали, что кинетические свойства зависят от состава соединений, так электропроводность ($0,5 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^3$, $3 \cdot 10^2 - 4,5 \cdot 10^3$, $2 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и концентрация носителей заряда ($1 \cdot 10^{18} - 1,7 \cdot 10^{21}$, $6 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{21}$, $3 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) с отклонением от стехиометрии растут, а подвижность носителей ($1,05 \cdot 10^2 - 0,5$, $9,5 \cdot 10^2 - 0,05 \cdot 10^2$, $1,5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), и коэффициент термоЭДС (175–22, 160–24, 190–6,2 мкВ/К) уменьшаются соответственно для сульфида Cu_{2-x}S , селенида Cu_{2-x}Se и теллурида Cu_{2-x}Te меди, где $0 \leq x \leq 0,2$. Уменьшение коэффициента термоЭДС с составом связано с увеличением степени вырождения при отклонении от стехиометрии.

Изменения концентрации носителей заряда с изменением состава соединений обусловлены изменением концентрации собственных дефектов и пустых узлов в подрешетке металла. Изменение электропроводности, коэффициента термоЭДС и подвижности носителей заряда коррелируют с изменением концентрации носителей. Поэтому можно считать, что в проводимости халькогенидов меди основную роль играют вакансии в подрешетке меди. С увеличением содержания халькогена концентрация вакансий металла увеличивается и приводит к резкому росту концентрации свободных носителей заряда.

Халькогениды меди представляют собой твердые растворы, содержащие дефекты вычитания. Наличие такого твердого раствора согласуется с тем, что с отклонением состава от стехиометрии параметры кристаллической решетки уменьшаются.

Проведенные исследования температурных зависимостей электрофизических свойств халькогенидов меди показывают, что температура фазового перехода при увеличении отклонений состава от стехиометрического уменьшается (рис. 1), а уменьшение содержания меди усиливает металлический характер проводимости.

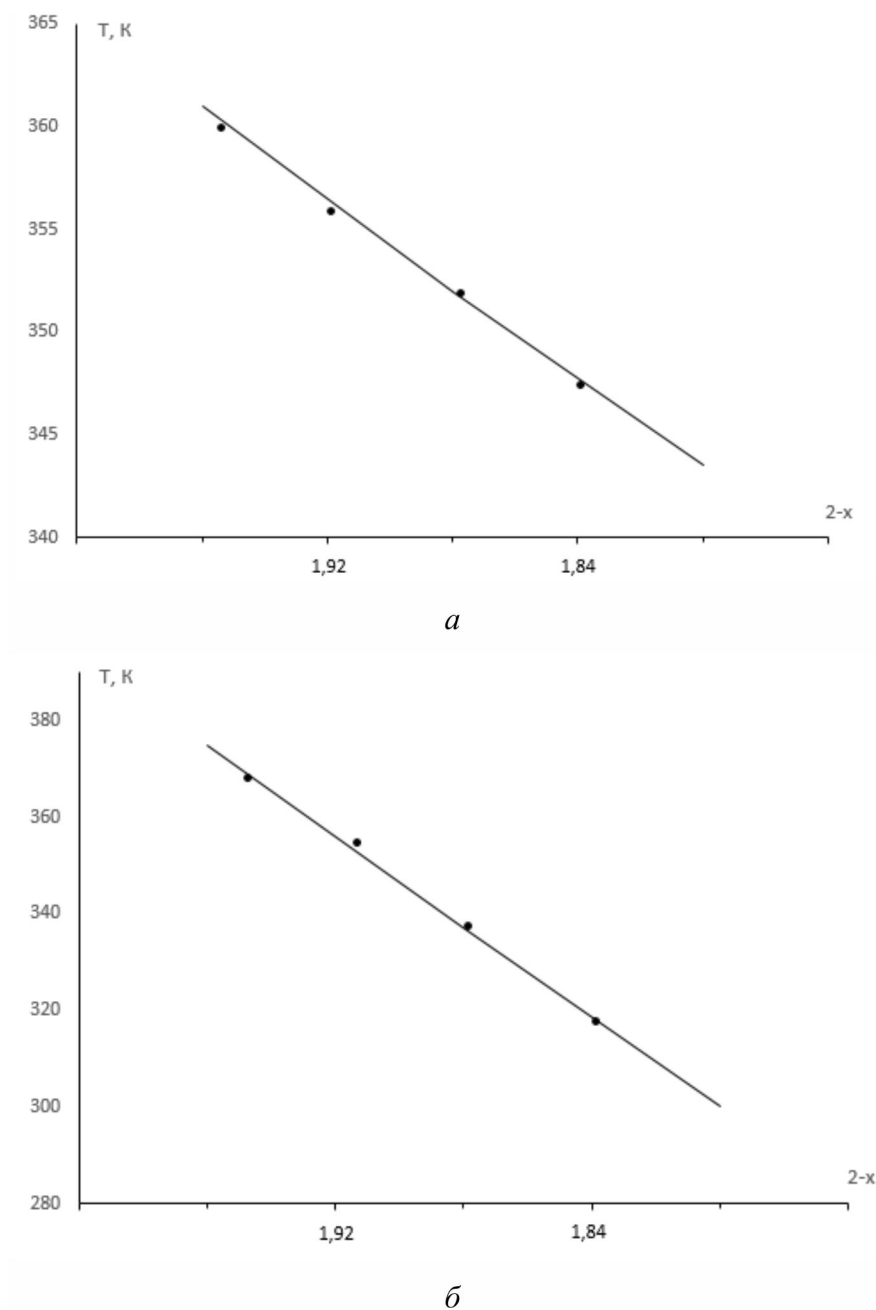


Рис. 1. Зависимость температуры фазового перехода от состава: $a - \text{Cu}_{2-x}\text{S}$; $b - \text{Cu}_{2-x}\text{Se}$
 Fig. 1. Dependence of the phase transition temperature on the composition: $a - \text{Cu}_{2-x}\text{S}$; $b - \text{Cu}_{2-x}\text{Se}$

Смещение температуры фазового перехода под влиянием дефектов можно описать в рамках теории фазовых переходов из условия термодинамического равновесия выражением:

$$T_c = \frac{\Delta E(T_c) + p\Delta V(T_c)}{\Delta S_p(T_c)},$$

где ΔE – энтальпия; ΔS_p – энтропия; p – давление; ΔV – объем.

При изменении дефектности кристалла его термодинамические параметры изменяются. Увеличение степени дефектности при отклонении состава от стехиометрического приводит к увеличению внутренней энергии кристалла, которая компенсируется приростом энтропии, обусловленным повышением степени разупорядочивания структуры. Изменение термодинамического потенциала системы приводит к изменению температуры фазового перехода.

Фазовый переход происходит при равенстве химических потенциалов соответствующих фаз. Это имеет место при определенных значениях температуры и давления. Необходимо отметить также, что изменение химического потенциала, обуславливающее фазовый переход, происходит по достижении определенной степени дефектности кристалла. Кроме того, энергия образования дефектов уменьшается с повышением их концентрации. Уменьшение температуры фазового перехода с увеличением отклонений от стехиометрии объясняется уменьшением сил межатомного взаимодействия, поскольку число связей атомов с соседями уменьшается при увеличении концентрации вакансий.

Изменение модификаций соединений $A_2^I B^{II}$ с ростом температуры, согласно диаграммам состояния, показывает переход от низкосимметричных к высокосимметричным кубическим при высоких температурах. Этот переход сопровождается повышением точечной симметрии и уменьшением координационного числа, что связано с увеличением энтропии, а, следовательно, беспорядка и расположении атомов.

Чувствительность теплопроводности к составу в области гомогенности значительно меньше, чем электропроводность и термоЭДС. Это связано с уменьшением фоновой составляющей теплопроводности при увеличении концентрации дефектов. Перенос тепла в халькогенидах осуществляется в основном носителями заряда. Увеличение теплопроводности $(1-4) \cdot 10^{-2}$, $(2-12) \cdot 10^{-2}$, $(3-16) \cdot 10^{-2}$ Вт $\cdot$ см $^{-1}$ $\cdot$ К $^{-1}$ соответственно для сульфида, селенида и теллурида меди с отклонением от стехиометрии связано с превалирующим увеличением электронной теплопроводности над уменьшением фоновой составляющей, так как при этом число Лоренца увеличивается с возрастанием приведенного химического потенциала и уменьшением термоЭДС. Это происходит потому, что число Лоренца максимально для металлов, термоЭДС которых мала. На величину решеточной теплопроводности сказывается дефектность кристаллической решетки, которая приводит к снижению роли направленной составляющей связи между анионами и катионами, а, следовательно, к росту ангармонизма колебаний решетки и снижению фоновой составляющей теплопроводности по сравнению с электронной при отклонении от стехиометрии.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют, что халькогениды металлов первой группы обладают сильной зависимостью свойств от собственной дефектности структур, электропроводность и концентрация носителей заряда с отклонением от стехиометрии растет, а подвижность носителей и коэффициент термоЭДС уменьшаются. Увеличение степени дефектности при отклонении состава от стехиометрического приводит к увеличению внутренней энергии кристалла, которая компенсируется приростом энтропии, обусловленным повышением степени разупорядочивания структуры. Уменьшение температуры фазового перехода с увеличением отклонений от стехиометрии порождается уменьшением сил межатомного взаимодействия, поскольку число связей атомов с соседями уменьшается при увеличении концентрации вакансий. Увеличение теплопроводности с отклонением от стехиометрии связано с превалирующим ростом электронной теплопроводности над уменьшением фоновой составляющей, на величину решеточной теплопроводности оказывает влияние дефектность кристаллической решетки.

Список литературы

1. **Zhang X., Zhao L.-D.** Thermoelectric Materials: Energy Conversion between Heat and Electricity // *Journal of Materiomics*. 2015. Vol. 1. P. 92-105.
2. **Zheng J.-C.** Recent Advances on Thermoelectric Materials // *Front. Phys. China*. 2008. Vol. 3. № 5. P. 269-279.
3. **Govardhan N., Dilip K. B., Meda K. K.** State of the Art Review on Thermoelectric Materials // *Int. J. Sci. Res.* 2016. Vol. 5, № 10. P. 1833-1844.
4. **Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S.** Enhanced Efficiency of Thermoelectric Generator by Optimizing Mechanical and Electrical Structures // *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1329-1-1329-15.
5. **Sharma A., Lee J. H., Kim K. H., Jung J. P.** Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology // *J. Microelectron. Packag. Soc.* 2017. Vol. 24, № 1. P. 9-16.
6. **Patidar S.** Applications of thermoelectric energy: a review // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2018. Vol. 6, № 5. P. 1992-1996.
7. **Petsagkourakis I., Tybrandt K., Crispin X., Ohkubo I., Satoh N., Mori T.** Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2018. Vol. 19, № 1. P. 836-862.
8. **Riffat S., Ma X.** Thermoelectric: A review of present and potential applications // *Appl. Therm. Eng.* 2003. Vol. 23, № 8. P. 913-935.
9. **Dughaish Z. H.** Lead Telluride as a Thermoelectric Material for Thermoelectric Power Generation // *Physica B: Condensed Matter*. 2002. Vol. 322. P. 205-223.
10. **Liu W., Hu J., Zhang S., Deng M., Han C.-G., Liu Y.** New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective // *Materials Today Physics*. 2017. Vol. 1. P. 50-60.
11. **Snyder G. J., Toberer E. S.** Complex thermoelectric materials // *Nat. Mater.* 2008. Vol. 7. P. 105-114.
12. **Sofa J. O., Mahan G. D.** Optimum band gap of a thermoelectric material // *Phys. Rev. B*. 1994. Vol. 49, № 7. P. 4565-4570.
13. **Новоселова А. В., Медведева З. С., Лужная Н. П.** Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. М.: Наука, 1979. С. 339.
14. **Stevels L. N., Jellinek F.** Phase transformations in copper chalcogenides: I. The copper-selenium system // *Rec. trav. Chim.* 1971. Vol. 90, № 3. P. 273-283.

References

1. **Zhang X., Zhao L.-D.** Thermoelectric Materials: Energy Conversion between Heat and Electricity // *Journal of Materiomics*. 2015. Vol. 1. P. 92-105.
2. **Zheng J.-C.** Recent Advances on Thermoelectric Materials // *Front. Phys. China*. 2008. Vol. 3. № 5. P. 269-279.
3. **Govardhan N., Dilip K. B., Meda K. K.** State of the Art Review on Thermoelectric Materials // *Int. J. Sci. Res.* 2016. Vol. 5, № 10. P. 1833-1844.
4. **Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S.** Enhanced Efficiency of Thermoelectric Generator by Optimizing Mechanical and Electrical Structures // *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1329-1-1329-15.
5. **Sharma A., Lee J. H., Kim K. H., Jung J. P.** Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology // *J. Microelectron. Packag. Soc.* 2017. Vol. 24, № 1. P. 9-16.
6. **Patidar S.** Applications of thermoelectric energy: a review // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2018. Vol. 6, № 5. P. 1992-1996.
7. **Petsagkourakis I., Tybrandt K., Crispin X., Ohkubo I., Satoh N., Mori T.** Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2018. Vol. 19, № 1. P. 836-862.

8. **Riffat S., Ma X.** Thermoelectric: A review of present and potential applications // Appl. Therm. Eng. 2003. Vol. 23, № 8. P. 913-935.
9. **Dughaish Z. H.** Lead Telluride as a Thermoelectric Material for Thermoelectric Power Generation // Physica B: Condensed Matter. 2002. Vol. 322. P. 205-223.
10. **Liu W., Hu J., Zhang S., Deng M., Han C.-G., Liu Y.** New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective // Materials Today Physics. 2017. Vol. 1. P. 50-60.
11. **Snyder G. J., Toberer E. S.** Complex thermoelectric materials // Nat. Mater. 2008. Vol. 7. P. 105-114.
12. **Sofo J. O., Mahan G. D.** Optimum band gap of a thermoelectric material // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49, № 7. P. 4565-4570.
13. **Novoselova A. V., Medvedeva Z. S., Luzhnaya N. P.** Physical and chemical properties of semiconductor substances. Moscow: Nauka, 1979.
14. **Stevens L. N., Jellinek F.** Phase transformations in copper chalcogenides: I. The copper–selenium system // Rec. trav. Chim. 1971. Vol. 90, № 3. P. 273-283.

Сведения об авторах

Гусейн Абакарович Мустафаев, доктор технических наук

Джамиля Гусейновна Мустафаева, кандидат технических наук

Марат Гусейнович Мустафаев, кандидат технических наук

Information about the Authors

Gusein A. Mustafaev, Doctor of Technical Sciences

Dzhamilya G. Mustafaeva, Candidate of Technical Sciences

Marat G. Mustafaev, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 04.08.2023; одобрена после рецензирования 31.08.2023;
принята к публикации 11.09.2023*

*The article was submitted 04.08.2023; approved after reviewing 31.08.2023;
accepted for publication 11.09.2023*

Научная статья

УДК 531/534; 535; 537; 538.9

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Отдел прикладной физики физического факультета

**Александр Евгеньевич Зарвин¹, Евгений Николаевич Галашов²,
Борис Семенович Ездин³, Николай Геннадьевич Коробейщиков⁴,
Петр Григорьевич Пасько⁵, Александр Сергеевич Яскин⁶**

¹⁻⁶ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

²cwo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7764-6158>

³bse@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4563-9265>

⁴korobei@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1047-4894>

⁵pgpasko@ngs.ru,

⁶yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

Аннотация

В работе рассмотрены история, этапы становления и развития отдела прикладной физики физического факультета НГУ. Описана структура отдела, решенные и решаемые в настоящее время научные задачи, рассмотрены результаты научной, педагогической и инновационной деятельности основных подразделений отдела.

Ключевые слова

лаборатория, отдел, история развития, установки, прикладная физика

Для цитирования

Зарвин А. Е., Галашов Е. Н., Ездин Б. С., Коробейщиков Н. Г., Пасько П. Г., Яскин А. С. Отдел прикладной физики физического факультета // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 83–104. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Department of Applied Physics of the Faculty of Physics

Alexandr E. Zarvin¹, Evgenii N. Galashov²,
Boris S. Ezdin³, Nikolay G. Korobeishchikov⁴,
Petr G. Pasko⁵, Alexander S. Yaskin⁶

¹⁻⁶ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

²cwo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7764-6158>

³bse@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4563-9265>

⁴korobei@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1047-4894>

⁵pgpasko@ngs.ru,

⁶yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

Abstract

The paper considers the history, stages of formation and development of the Department of Applied Physics of the Faculty of Physics of NSU. The structure of the department, solved and currently solved scientific tasks are described. The results of scientific, pedagogical and innovative activities of the main divisions of the department are considered.

Keywords

laboratory, department, development history, installations, applied physics

For citation

Zarvin A. E., Galashov E. N., Ezdin B. S., Korobeishchikov N. G., Pasko P. G., Yaskin A. S. Department of Applied Physics of the Faculty of Physics. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 83–104 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-83-104

Отдел прикладной физики

Отдел прикладной физики (ОПФ) (первоначально – лаборатория прикладной физики) образован в 1972 г., в настоящее время является старейшим научным подразделением в Новосибирском государственном университете и вплотную приблизился к пятидесятилетнему юбилею со дня основания. Длительное время лаборатория, а после включения в ее состав лаборатории термогидродинамики дисперсных систем и лаборатории квантовой электроники преобразованная в отдел прикладной физики, входила в состав научно-исследовательского сектора (НИС), позднее – научно-исследовательской части (НИЧ) НГУ. После реформирования НИЧ НГУ, в 2016 г. на основании решения Ученого совета НГУ Отдел вошел в состав физического факультета НГУ.

Первым заведующим лабораторией прикладной физики был А. А. Бузуков. Затем, с 1975 по 1982 г., лабораторию возглавлял Е. И. Синайко. С 1983 г. заведующим лабораторией, а затем отделом является А. Е. Зарвин. В начальный период отдел не имел собственной экспериментальной базы, размещался на площадях Института теплофизики СО РАН. Сотрудники отдела вели работы в составе коллективов отдельных лабораторий базовых институтов, которыми, помимо Института теплофизики, были также Институт теоретической и прикладной механики, Институт гидродинамики и Институт ядерной физики.

Собственная экспериментальная база отдела складывалась в три этапа. На первом, в 1984–1987 гг., за счет внебюджетных средств, полученных при выполнении НИОКР по договорам с различными организациями, силами сотрудников отдела была создана научно-исследовательская база отдела в цокольном этаже здания Новосибирского политехникума (в дальнейшем – Высшего колледжа информатики НГУ). Сформированные на этих площадях научные направления, результаты деятельности научного коллектива ОПФ в период с 1988 по 2005 г. детально описаны в [1]. В этот же период учебные мастерские ВКИ были подчинены на паритетных основах главному инженеру НГУ и заведующему ОПФ, значительно реконструирована

ны и модернизированы. Это дало возможность эффективно использовать их для обеспечения потребностей не только научных работ, но и учебного процесса НГУ, в первую очередь физического факультета. В частности, за счет части оборудования и силами сотрудников ОПФ были оснащены два лабораторных практикума (молекулярный и оптический) для действующего в тот период времени технического факультета ВКИ. Занятия в практикумах вели также сотрудники ОПФ.

На втором этапе, в 2007–2009 гг., за счет средств Приоритетного национального проекта «Образование» («Поддержка вузов, внедряющих инновационные образовательные программы» (2007–2008) и федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 гг.» была в значительной мере модернизирована экспериментальная база ОПФ, созданы крупные комплексы ЛЭМПУС-2 (лазерно-электронно-молекулярно-пучковый универсальный стенд), ПХМ (плазменно-химический модуль), а также диагностические стенды Контроля оптической однородности и степени монодоменности в кристаллах, Контроля контраста электрооптических модуляторов, другие диагностические приборы и научное оборудование. Были сформированы две новые экспериментальные площадки ОПФ: в главном корпусе НГУ, и в полностью реконструированном корпусе Пристройки к ВКИ НГУ, в котором помимо лабораторий ОПФ разместились лаборатории АТИЦ НГУ, медицинского факультета, а также вновь реконструированные механические мастерские НГУ (в последующем закрыты и переоборудованы в учебную мастерскую ВКИ).

Наконец, на третьем этапе, в период 2009–2013 гг., в рамках программы развития университетов, в отношении которых устанавливается категория Национальный исследовательский университет, бюджетное финансирование по которой сопровождалось внебюджетным софинансированием за счет хозяйственных договоров, была завершена программа развития структуры ОПФ. На базе бывших учебных классов военной кафедры НГУ, реконструированных и перестроенных силами и за счет средств ОПФ ФФ, был сформирован новый технологический участок отдела – участок роста кристаллов, оснащенный рядом экспериментальных стендов, в том числе Установка поликристаллического синтеза функциональных материалов в контролируемой атмосфере при контролируемой температуре, Установка для изготовления оптической нанокерамики из люминесцентных материалов, Установка для синтеза нанопорошков с контролируемыми размерами частиц.

Уже имеющиеся экспериментальные площадки отдела были дополнительно оснащены новыми экспериментальными стендами и оборудованием. В частности, был создан вакуумный стенд КЛИУС для ионно-кластерной обработки поверхности материалов, Гипербарический стенд для конверсии углеводородов и получения кремниевых и углеродный нанопорошков и др.

К сожалению, в последующие годы целенаправленной программы модернизации экспериментальной базы ОПФ в рамках НГУ осуществить не удалось. Программа повышения международной конкурентоспособности и стимулирования научно-исследовательской деятельности (ТОП-100) в НГУ была ориентирована на иные цели, отдела коснулась минимально и только в рамках премиальных выплат по итогам года. Поэтому за последние 8 лет обновление экспериментальной базы и приобретение приборов носило локальный, частный характер.

В конечном итоге структура ОПФ была сформирована в составе лабораторий акусто- и электрооптики, ионно-кластерных технологий, конверсионных технологий, молекулярной кинетики, низкотемпературной плазмы, синтеза функциональных материалов, а также Центра коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика». В рамках тематик научных коллективов отдела получены результаты, имеющие как чисто научный, так и прикладной характер, регулярно представляющиеся в отчетах о выполнении НИОКР, в реферируемых научных журналах, на республиканских и международных научных конференциях и семинарах. Основной целью проводимых исследований является изучение процессов и разработка методов и технологий для последующего внедрения в хозяйственную деятельность страны.

Ниже будут рассмотрены результаты научной, педагогической и инновационной деятельности основных подразделений отдела.

Лаборатория акусто- и электрооптики

Лаборатория была сформирована и на протяжении свыше 20 лет возглавлялась П. Г. Пасько [2–4] (ныне на пенсии). В настоящее время руководит лабораторией кандидат физико-математических наук А. В. Горчаков. Основными задачами лаборатории сегодня являются развитие инструментальных методик диагностики и контроля характеристик оптических элементов из различных нелинейных монокристаллов. Работы проводятся с монокристаллами трибората лития (LiB_3O_5 , LBO), калий титанил фосфата (KTiOPO_4 , КТР), бета-борат бария ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, ВВО) и др., которые широко используются для управления лазерным излучением: изменение частоты, модуляции и т. д. Лаборатория активно сотрудничает с производителями оптических приборов – ООО «Кристаллы Сибири» и ЗАО «Сибирский монокристалл – ЭКСМА».

В лаборатории созданы и отлажены следующие специализированные измерительные стенды.

- Стенд контроля оптической однородности и степени монодоменности, предназначен для измерения ключевых параметров нелинейных монокристаллов: оптическая однородность (точность измерения искажения плоского волнового фронта световой волны – до $\lambda/10$ на апертуре кристаллической заготовки размером 50×50 мм), наведенная двуосность, определение границ монодоменных областей (разрешение не менее 500 мкм), малоугловое рассеяние и др.

- Стенд контроля контраста оптических элементов и электрооптических модуляторов. Стенд позволяет проводить измерения значений контраста модуляторов в диапазоне 1–2000 с точностью 5 %, картографирование величины контраста при апертуре кристалла до 25×25 мм², выполнять измерения в диапазоне температур от 2 до 60 °С при импульсных управляющих напряжениях до 10 кВ или постоянных управляющих напряжениях до 4 кВ на длинах волн 532 и 1064 нм для лазерных пучков диаметром от 200 мкм до 20 мм.

- Стенд по изучению монодоменизации кристаллов предназначен для коррекции доменной структуры в выращенных кристаллах КТР с помощью импульсов электрического тока управляемой формы при температурах вблизи точки Кюри.

Кроме этого, в лаборатории разрабатываются новые методы диагностики характеристик нелинейных монокристаллов. В частности, недавно был разработан и отлажен метод неразрушающего контроля качества поверхности оптических материалов. Метод, основанный на измерении угловой зависимости коэффициента отражения плоскополяризованной лазерной волны и определения положения угла квази-Брюстера, позволяет оперативно без использования сложного измерительного оборудования контролировать качество поверхности и приповерхностного слоя в оптических элементах [5]. В развитии данного метода в настоящее время в лаборатории проводятся работы по созданию метода определения абсолютных величин физических параметров: толщины и показателя преломления приповерхностного поврежденного слоя, объемного показателя преломления материала с учетом приповерхностного слоя [6–8].

Лаборатория ионно-кластерных технологий

Заведующий лабораторией – кандидат физико-математических наук Н. Г. Коробейщиков. Основное направление работ – фундаментальные и прикладные исследования с газоструйными ионно-кластерными пучками (*gas cluster ion beam*, GCIB). Благодаря возможности независимо управлять размерами кластеров и ускоряющим потенциалом, ионно-кластерные пучки обладают набором уникальных физических характеристик. Это позволяет успешно использовать их для диагностики (ВИМС) и малоинвазивной модификации (сглаживание до субнано-

метровой шероховатости, формирование самоупорядоченных наноструктур и др.) поверхностей различных материалов [9–10].

Работы проводятся на экспериментальном стенде КЛИУС, разработанном и созданном сотрудниками ОПФ (рис. 1). Стенд оборудован высоковакуумной откачной системой суммарной производительностью до 9000 л/с. Характеристики стенда соответствуют лучшему мировому уровню и позволяют в непрерывном режиме формировать пучки кластерных ионов с интенсивностью до 10^{15} кл. ион/(см² × с) кинетической энергией E до 30 кэВ и током до 50 мкА.

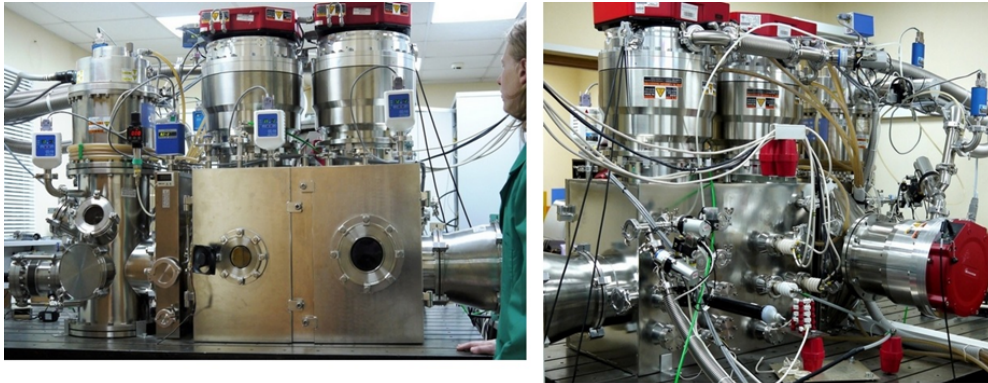


Рис. 1. Общий вид стенда КЛИУС со стороны рабочих люков и со стороны вводов
Fig. 1. General view of the CLIUS stand from the side of working hatches and from the side of inlets

Разработан и отлажен новый способ диагностики пучков нейтральных кластеров, основанный на измерении поперечного профиля полной интенсивности пучка и позволяющий определить основные параметры: средний размер кластеров N (атом/кластер), соотношение мономерной и кластерной компонент пучка, плотность потока кластеров (кластер/(см² × с)) [11–12]. Распределение кластерных ионов по размеру определяется с помощью оригинальной времяпролетной системы [13].

В настоящее время работы направлены на разработку фундаментальных основ ионно-кластерного метода создания совершенных оптических поверхностей (сверхгладких с минимальным поврежденным слоем) для нелинейных монокристаллов. Известно, что современные технологии обработки позволяют получать поверхности с субнанометровой остаточной шероховатостью для многих оптических материалов. Однако в готовых элементах неизбежно присутствует приповерхностный поврежденный слой (*subsurface damage*, SSD) толщиной десятки или сотни нм, который, как правило, определяет основные характеристики оптических приборов: срок службы, порог лазерного повреждения (*laser induce damage threshold*, LIDT), стабильность работы и т. д. Предполагается, что кластерная бомбардировка поверхности нелинейных кристаллов позволит минимизировать SSD-слой при минимальном нарушении структуры материала и тем самым улучшить функциональные характеристики оптических приборов.

В ходе проведенных работ доказано, что обработка кластерными ионами в комбинированных режимах позволяет сглаживать поверхности материалов в широком диапазоне пространственных частот шероховатости $\nu = 0,2 \div 100$ мкм⁻¹, т. е. сглаживать неровности с латеральными размерами до 5 мкм [14]. Высокоэнергетичный режим с удельной энергией $E/N \sim 100$ эВ/атом в кластере обеспечивает высокую эффективность обработки (скорость распыления мишени достигает 5 нм/мин), сопоставимую с классическим ионным пучком. Обработка при $E/N \leq 10$ эВ/атом обеспечивает суперфинишное сглаживание. Показано, что коэффициенты распыления поверхности несепарированным по размерам кластерам ионно-кластерным пучком обобщаются в виде нелинейной зависимости от удельной энергии E/N как при нормальном, так и при наклонном падении кластеров [15]. Установлено, что обработка кластерами приводит к гораздо меньшему нарушению морфологии приповерхностного слоя

мишени по сравнению с мономерным ионным пучком. Обнаружено, что кластерная бомбардировка насыщенных водой поверхностей гигроскопических монокристаллов сопровождается эффектом блистеринга, приводящего к формированию гигантских аномальных кратеров диаметром до 600 мкм, что на два порядка превышает диаметр ударных кластерных кратеров [16]. С использованием РФЭС-измерений выявлено преимущественное распыление кислорода и, в меньшей степени, бора, а также увеличение концентрации катионов лития при бомбардировке поверхности кристаллов LBO кластерами аргона. Доказано, что химические и физические повреждения приповерхностного слоя после бомбардировки кластерами намного меньше, чем повреждения от пучка одноатомных ионов [17].

Лаборатория молекулярной кинетики

Лаборатория молекулярной кинетики (ЛМК) функционирует практически с первого года прихода в отдел А. Е. Зарвина. Поэтому деятельность лаборатории за период до 2006 г. достаточно подробно охарактеризована в статье [18]. Основное научное направление деятельности лаборатории – динамика разреженных газов. В разные периоды в научных исследованиях, проводимых лабораторией, принимали активное участие научные сотрудники: Виктор Жумагазыевич Мадирбаев, Николай Геннадьевич Коробейщиков (в настоящее время возглавляет новое научное направление – лабораторию ионно-кластерных технологий отдела), Валерик Сергеевич Айрапетян (ныне профессор, заведующий кафедрой Сибирского государственного университета геосистем и технологий), Георгий Георгиевич Гартвич (в настоящее время на пенсии), Борис Семенович Ездин (возглавляет сейчас новое научное направление – лабораторию конверсионных технологий отдела), Александр Сергеевич Яскин (возглавляет теперь Центр коллективного пользования «Прикладная физика» при ОПФ), а также ряд молодых сотрудников отдела. Инженерный блок отдела бессменно возглавляет ведущий электроник Валерий Владимирович Каляда. Руководителем лаборатории бессменно остается А. Е. Зарвин.

Как было отмечено выше, в период 2007–2013 гг. экспериментальное оборудование ЛМК пополнилось не только за счет модификации экспериментального вакуумного стенда ЛЭМПУС-1 [19], путем его оснащения современным вакуумным откачным оборудованием, новыми вакуумными секциями генератора молекулярного пучка и новыми средствами диагностики (рис. 2), но и двумя новыми универсальными экспериментальными вакуумными установками: ЛЭМПУС-2 [20] и Плазмохимический модуль (ПХМ) [21]. Оборудование этих установок включает в том числе современные приборы измерения и контроля давления и вакуума, средства регулирования и подачи газов и газовых смесей. Для инициирования плазмохимических реакций в потоках имеются электронно-лучевые системы с плазменным и накаливаемым катодами с токами до 500 мА и энергией электронов до 60 кэВ с собственной дифференцированной системой высоковакуумной откачки, системы, инициирующие разные типы разряда, а также ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

ПХМ представляет собой несколько соединенных вакуумных объемов, откачиваемых мощным форвакуумным винтовым безмасляным насосом высокой производительности со скоростью откачки до 30 000 л/мин при давлении 1 торр, что позволяет поддерживать большие расходы рабочих газов (рис. 3). Установка предназначена для исследования газозофазных плазмохимических реакций и разработки плазмохимических технологий, в том числе технологии конверсии природного и попутного нефтяного газов.

Созданная и эксплуатируемая сотрудниками ЛМК установка ЛЭМПУС-2 (рис. 4) в настоящее время является одним из лучших малогабаритных газодинамических стендов с непрерывными и импульсными газовыми источниками, скоростью откачки до 0,2 г/с, безмасляным вакуумом, электронно- и молекулярно-пучковым оборудованием, масс-спектрометрией и другими системами, обеспечивающими исследования в сверхзвуковых потоках разреженных газов.

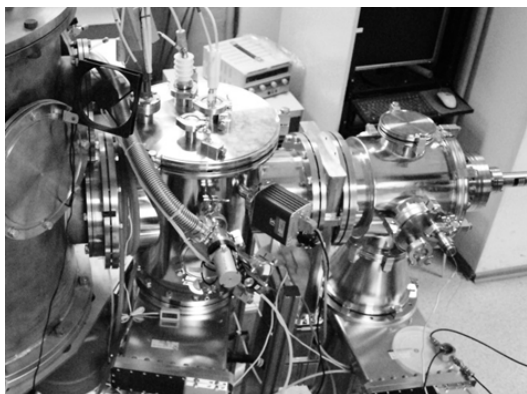


Рис. 2. Модернизированный стенд ЛЭМПУС-1
Fig. 2. Modernized stand LEMPUS-1

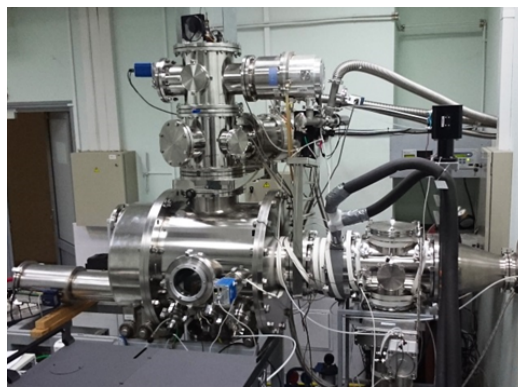


Рис. 3. Плазмохимический модуль
Fig. 3. Plasma chemical module

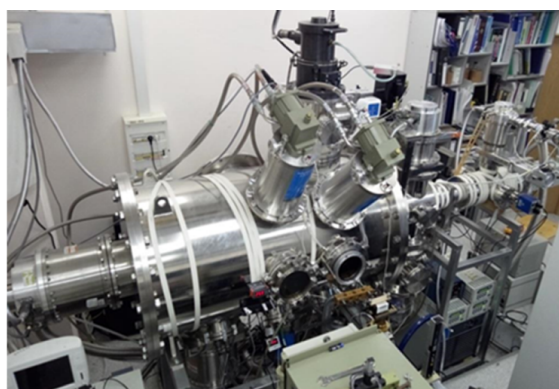
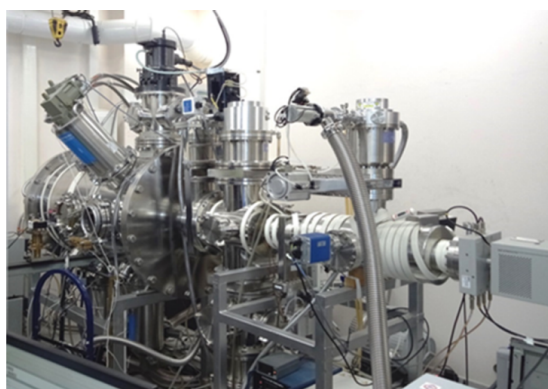


Рис. 4. Универсальная установка ЛЭМПУС-2 (вид справа и слева сверху)
Fig. 4. Universal installation LEMPUS-2 (right and left top views)

Основными задачами, решаемыми сотрудниками лаборатории в последние годы, помимо прикладных исследований в интересах аэрокосмической отрасли [22–23] и нефтегазовой промышленности [24–27], являются фундаментальные исследования процессов кластерообразования в сверхзвуковых потоках разреженных газов [28–32]. В частности, впервые обнаружен и идентифицирован эффект формирования спутной кластерной струи вокруг традиционной сверхзвуковой струи [33–34], исследован механизм инверсной накачки определенных уровней атомарного аргона в конденсирующихся потоках смесей [35], исследован механизм истечения жидкости через отверстие малого диаметра в вакуум [36].

Лаборатория конверсионных технологий

Основное направление – исследование физико-технических аспектов газофазного синтеза при адиабатическом сжатии газов. Научным руководителем лаборатории является кандидат физико-математических наук Б. С. Ездин. Исследуются синтез кристаллических и аморфных нанопорошков кремния и углерода из газовой фазы при пиролизе исходных прекурсоров [37–40], процессы окислительной конверсии попутного нефтяного газа (ПНГ) [41; 42], рассматриваются вопросы получения водорода пиролизом метана и его гомологов.

Работы проводятся на экспериментальном стенде Гипербар, разработанном и созданном сотрудниками ОПФ совместно с фирмами – разработчиками нестандартного научного оборудования. Стенд Гипербар – циклический химический реактор сжатия (ЦХРС) – представляет собой тепловую машину, в которой при сжатии газообразных прекурсоров происходят хими-

ческие реакции преобразования веществ, а при расширении реакторного объема (движения поршня в сторону нижней мертвой точки) – замораживание (закалка) химических преобразований, препятствующая обратным химическим реакциям. Процесс можно назвать проточным вследствие переработки реагентов и поступления в реакторный объем следующей порции в течение одного цикла сжатия – разрежения. Продукты пиролиза накапливаются приемной системой. Метод выгодно отличается от существующих простотой применяемого оборудования, хорошей конструктивной проработкой тепловых машин, высокой производительностью метода и малой ресурсной емкостью (материалоемкость, небольшие габариты и вес). Так, теоретически, циклический химический реактор сжатия (ЦХРС) объемом 1 л позволяет перерабатывать при частоте 30 Гц за час работы 10,8 м³ исходного сырья, с возможностью широкого масштабирования по объему реактора и по количеству камер сжатия-разрежения на одной установке.

Исследования необходимы для получения точных количественных параметров технологических процессов для синтеза нанопорошков с заданными размерами и формой. Данные о предпочтительной конструкции реакционной камеры могут быть использованы в ОКР при разработке промышленных установок. Проводятся исследования свойств порошков [43; 44] для их внедрения в разные технологические цепочки. Так, очень важным свойством наноразмерного кремния и слоев на его основе является возможность генерации в них фотолюминесценции за счет кислорода в синглетном состоянии на их поверхностях, что находит применение в биосенсорных устройствах в клинической диагностике в качестве детектирующих меток и слоев. Использование технического графена в виде малых присадок в водных суспензиях с целью вытеснения остаточной нефти из микропор нефтегазового пласта позволяет увеличить нефтеотдачу вследствие возникновения на границе раздела нефть – вода переходной области с низким поверхностным натяжением. Слои из частиц кремния размером ~100 нм могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий за счет генерации в них магнитных и электрических резонансов при взаимодействии со светом. Их применение может повысить эффективность различных фотоэлектронных преобразователей, таких как солнечные батареи и фотодетекторы.

На данный момент ни в научной, ни в патентной литературе нет упоминаний о синтезе частиц кремния и углерода при циклическом сжатии газовой фазы кремний-углеводородного состава. Это направление является новым и практически мало изученным. Данная технология может иметь развитие как альтернативный метод получения наноразмерного углерода, кремния и других порошков, таких как карбиды и нитриды, т. е. которые обычно получают, используя газообразные и жидкие прекурсоры.

Ведутся работы по изучению возможности расширения круга исходных прекурсоров, и при их наличии проводятся пробные эксперименты. Приоритетными являются газовые составы, создающие минимальную экологическую опасность.

В лаборатории создан задел по изучению газофазного синтеза нанокристаллического кремния и углерода при пиролизе моносилана и легких углеводородов. Были получены образцы нанопорошков и исследованы их свойства с использованием микроскопии высокого разрешения, рентгенофазового анализа и КР-спектроскопии. Развитие технологии изготовления порошков будет сопровождаться разработкой методов осаждения их на поверхности как в виде пористых слоев, так и в виде сплошных пленок посредством изготовления и нанесения суспензий. В дальнейшем предполагается расширение экспериментальных исследований с целью получения характеристик, требуемых для оценки возможности их практического использования, ориентированного на применения, перечисленные выше. Будут проводиться модельные расчеты газофазных реакций с использованием программных пакетов. Реализация программы исследований может привести к разработке в ОПФ НГУ сравнительно простого эффективного метода синтеза порошков в промышленно значимых объемах для различных технологических применений.

Лаборатория низкотемпературной плазмы

Сверхзвуковая струя газа или газовой смеси, истекающая из звукового или сверхзвукового сопла в разреженную среду, является чрезвычайно интересным объектом для исследователей по ряду причин. Во-первых, формирующаяся струя, как правило, защищена от внешней среды боковыми и замыкающей ударными волнами, что позволяет изучать процессы, происходящие именно в исследуемом газе или смеси газов, без внешних воздействий. Во-вторых, вследствие резкого расширения газа по мере его движения от сопла, последовательно происходит замораживание колебательных, вращательных и даже поступательных степеней свободы молекул, что позволяет исследовать релаксационные процессы и энергообмен между отдельными степенями свободы молекул. В-третьих, в струе достаточно легко создать условия кластерообразования, причем можно варьировать достигаемый средний размер кластеров от димеров до тысячемеров. Наконец, в-четвертых, воздействие на частицы струи тем или иным разрядом позволяет инициировать столкновения между нейтральными, возбужденными и ионизованными частицами с образованием новых структур.

Задачи исследования взаимодействия сверхзвуковых потоков разреженных газов с электронной и ионной плазмой, которые регулярно возникают при использовании диагностических электронных пучков в исследованиях, проводимых лабораторией молекулярной кинетики, после приема в отдел доктора физико-математических наук С. В. Автаевой получили свою направленность и перспективное развитие по традиционной тематике, в которой С. В. Автаева является известным специалистом (моделирование физических и химических процессов в искровом, дуговом, диэлектрическом барьерном разряде [45–49]), а также по тематикам, связанным с газодинамическими исследованиями в потоках разреженных газов (исследование сверхзвуковых газовых струй, возбуждаемых искровым разрядом [50], развитие метода электронно-пучковой диагностики для измерения вращательной температуры в сверхзвуковых потоках разреженных газов [51–52]).

В последние годы, после перехода руководителя направления в Институт лазерной физики СО РАН, исследования были продолжены под руководством А. Е. Зарвина по направлению инициации плазмохимических реакций в сверхзвуковых потоках разреженных газов в условиях развитой конденсации. Эксперименты, начатые на плазмохимическом модуле, продолжены на универсальном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2.

Отлажена схема ионизации сверхзвуковой струи на разных стадиях ее расширения с помощью хорошо сфокусированного электронного пучка сравнительно высокой энергии (порядка 10 кэВ) с последующим транспортом ионизованных частиц через скиммер и коллимирующую диафрагмы на детектор масс-спектрометра при выключенном собственном ионизаторе [53]. Сравнение данных, полученных при ионизации и в отсутствие ионизации сверхзвуковой струи, позволяет изучать роль ионизованных частиц в процессе сверхзвукового расширения и столкновительного энергообмена.

Исследована [54] возможность формирования в сверхзвуковом потоке кластеров, содержащих в определенных пропорциях молекулы легких углеводородов и атомы газа-носителя (аргона, гелия) с последующей инициацией кластеризованного потока электронным ударом. Установлено, что инициация кластеризованного потока с помощью электронного пучка может вызвать электрон-стимулированную конденсацию, при которой ионизованные частицы становятся зародышами кластеров, вследствие чего количество кластеров и доля конденсата возрастают, а также электронную сшивку молекул в кластере, при которой за счет взаимодействия с электронным пучком из кластера выбиваются атомы водорода, а остающиеся радикалы связываются в устойчивые молекулы более тяжелых углеводородов.

Исследована возможность образования ионов протонированного аргона в кластеризованных потоках. Появление протонированных димеров и тримеров аргона, вероятно, происходит в результате взаимодействия кластерного иона с молекулой водорода $\text{Ar}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ar}_2\text{H}^+ + \text{H}$

и $\text{Ar}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ar}_3\text{H}^+ + \text{H}$. Образование дигидрокатиона аргона ArH_2^+ оказалось неожиданным и, вероятно, связано с продолжением процесса конденсации с участием сталкивающихся ионов аргона и молекул водорода до их попадания в скиммер [55].

Лаборатория синтеза функциональных материалов

ЛСФМ ОПФ ФФ НГУ организована в 2013 г. Руководит лабораторией научный сотрудник Евгений Николаевич Галашов. Лаборатория специализируется на разработках технологий синтеза функциональных материалов (монокристаллов, керамики, стекол и композитов), а также аппаратуры для их осуществления. В период с 2013 по 2017 г. были разработаны технологии:

- синтеза новых люминофоров (красные, желтые, зеленые), возбуждаемые коммерческими светодиодами на основе GaN для ламп с расширенным (солнечным) спектром освещения. Новые люминофоры представлены как в виде традиционных порошковых смесей для нанесения на синие светодиоды GaN в среде силикона, так и в виде пластин монокристаллических, стеклокристаллических и органокристаллических. По результатам исследований по данной тематике опубликовано 3 статьи в реферируемых журналах и получено 3 патента РФ. Заключен ряд хозяйственных договоров с промышленными партнерами;

- синтеза теплоотводов для СВЧ-электроники на основе композитов Cu, Ag / алмаз [56]. Для смачивания алмазной матрицы была разработана высокоэффективная технология покрытия алмазов карбидами WC, MoC, SiC. По результатам исследований по данной тематике опубликовано 6 статей, заключен ряд договоров с предприятиями РОСТЕХа.



Рис. 5. Люминофор НГУ белого свечения
Fig. 5. NSU phosphor of white luminescence

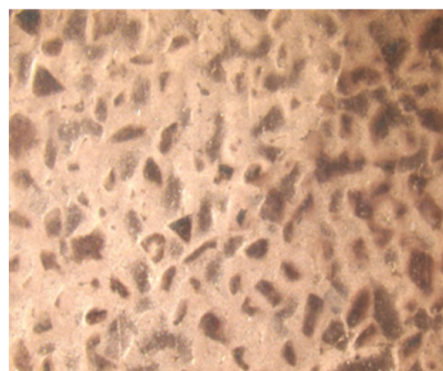
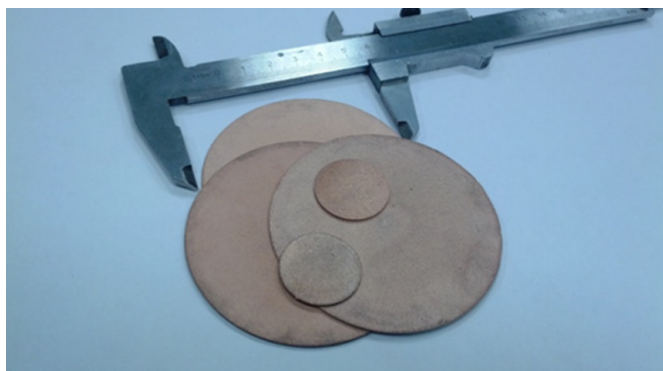


Рис. 6. Теплоотводящие подложки Cu/WC/алмаз и их поверхность
Fig. 6. Heat-sinking Cu/WC/diamond substrates and their surfaces

С 2014 г. лаборатория ведет разработку технологии выращивания широкого спектра совершенных монокристаллов низкоградиентным методом Чохральского и аппаратуры для его осуществления. Суть технологии – создать особые условия в ростовой ячейке (температурные градиенты в расплаве менее 1 °С, подавление испарения расплава и проч.), при которых фронт

кристаллизации формируется по слоевому механизму с образованием атомно-гладкой грани. В результате выращенные кристаллы практически не содержат дефектов, что существенно улучшает их функциональные свойства.

Были получены кристаллы CdWO_4 для X-ray сканеров и интроскопов, ZnWO_4 и ZnMoO_4 для научных экспериментов по поиску темной материи, TeO_2 акустооптических устройств, KTiOPO_4 и LiNbO_3 для лазерных применений.



Рис. 7. Кристалл CdWO_4 , выращенный низкоградиентным методом Чохральского
Fig. 7. CdWO_4 crystal grown by low-gradient Czochralskii method

В рамках коллаборации с римским Институтом ядерной физики (INFN, Rome) для эксперимента по поиску нейтрино в подземной лаборатории Гран Сассо (проект *Lucifer*) была разработана технология получения радиоизотопно-чистых монокристаллов ZnSe .

В рамках совместных работ с Институтом ядерной физики им Г. И. Будкера по поиску новых детекторных материалов для калориметрии была разработана технология выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{Zn,Cd})(\text{W,MoO})\text{O}_4$ [59], легированных редкоземельными металлами Eu, Ce, Pr. По результатам исследований было опубликовано 12 статей в реферируемых журналах и зарегистрировано 3 Ноу-Хау. В 2021 г. технология выращивания совершенных кристаллов CdWO_4 для X-ray сканеров и интроскопов вошла в 100 лучших мировых технологий для трансфера в Китай.

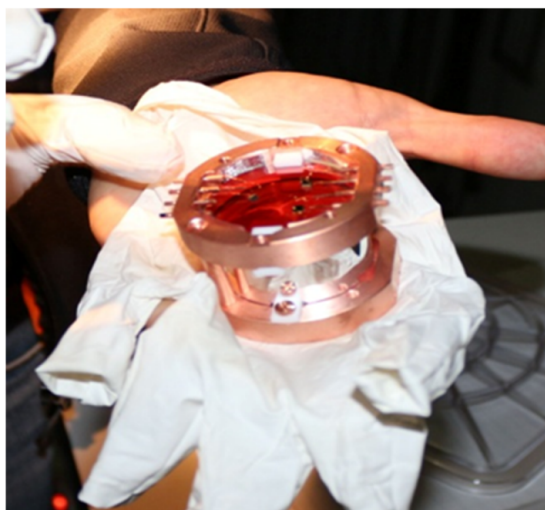


Рис. 8. Кристалл ZnSe и детектор нейтрино на его основе
Fig. 8. ZnSe crystal and neutrino detector based on it



Рис. 9. Сертификат о вхождении технологии НГУ в 100 лучших мировых технологий для трансфера в Китай

Fig. 9. Certificate of entry of NSU technology into the 100 best world technologies for transfer to China

Лаборатория имеет все необходимое оборудование для синтеза функциональных материалов:

- установку выращивания кристаллов низкоградиентным методом Чохральского;
- установку для выращивания кристаллов методом Бриджмена;
- установку для выращивания кристаллов методом Бриджмена под давлением 150 атм;
- установку для выращивания кристаллов методом вращающегося контейнера;
- установку гидротермального синтеза;
- муфельные печи для синтеза с температурой до 1200 и 1700 °С;
- изостатический пресс АІР-6 с температурой до 2000 °С и давлением до 2000 атм;
- обрабатывающее оборудование Struer.

Центр коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика»

Центр коллективного пользования приборами и оборудованием «Прикладная физика» НГУ (ЦКП ПФ) по виду деятельности является центром коллективного пользования научно-исследовательского профиля. Создан в составе Отдела прикладной физики физического факультета НГУ (ОПФФФ) в 2014 г. в целях развития инновационной структуры университета. В 2016 г. ЦКП ПФ НГУ (рег. номер 443969) зарегистрирован на портале «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации – центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки» (<https://ckp-rf.ru/>).

Цели ЦКП ПФ НГУ

- Выполнение фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ ОПФФФ НГУ.
- Оказание услуг по широкому спектру аналитических исследований и высокотехнологичных процессов и операций в интересах научных и производственных организаций Новосибирской области.



Рис. 10. Примеры оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ: 1 – атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP-6200DUO; 2 – времяпролетный масс-спектрометр RTOF-300; 3 – стенд контроля оптической однородности и степени монодоменности в кристаллах КТР, ВВО, РТР; 4 – рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр ARLQuant’X; 5 – стенд контроля контраста электрооптических модуляторов; 6 – ИК-Фурье спектрометр Cary600FTIR; 7 – хроматомасс-спектрометр GCMS-P2010Plus; 8 – атомно-силовой микроскоп НаноЛаборатория ИНТЕГРА Прима; 9 – универсальный газовый анализатор UGA-200

Fig. 10. Examples of equipment of the Applied Physics Center of NSU: 1 – atomic emission spectrometer with inductively coupled plasma iCAP-6200DUO; 2 – time-of-flight mass spectrometer RTOF-300; 3 – stand for control of optical homogeneity and degree of monodomain in KTP, BBO, RTP crystals; 4 – X-ray fluorescence energy dispersive spectrometer ARLQuant’X; 5 – stand for contrast control of electro-optical modulators; 6 – FTIR spectrometer Cary600FTIR; 7 – chromatomass spectrometer GCMS-P2010Plus; 8 – atomic force microscope NanoLab INTEGRA Prima; 9 – universal gas analyzer UGA-200

– Обучение студентов, аспирантов и подготовку высококвалифицированных научных кадров.

– Инициацию совместных научных и научно-технических проектов научных организаций и предприятий НСО с привлечением высококвалифицированного персонала Отдела прикладной физики НГУ.

– Обеспечение высокоэффективного использования уникального оборудования Отдела прикладной физики, развитие услуг ЦКП ПФ НГУ.

Назначение ЦКП ПФ НГУ

ЦКП ПФ оказывает услуги и выполняет работы для вузов, институтов СО РАН, других научных учреждений и предприятий различной формы собственности:

– по динамике разреженных газов, физической и химической кинетике, физическому моделированию газодинамических процессов в вакууме;

- плазмохимии, физике низкотемпературной неидеальной плазмы и ее применениям в энергетике и экологически чистых технологиях;
- кристаллохимии, новым материалам и химическим продуктам, материалам для микро- и наноэлектроники, технологиям получения функциональных материалов и химических продуктов;
- разнообразным применениям электронных, ионных и молекулярных пучков, масс-спектрометрии, кластерным электронно-ионно-плазменным технологиям;
- акусто- и электрооптике, новым материалам для микро- и наноэлектроники.

Балансовая стоимость оборудования ЦКП стоимостью свыше миллиона рублей, зарегистрированного на портале СКР-RF, составляет 70,3 млн рублей.

Научное руководство ЦКП ПФ НГУ осуществляет заведующий ОПФ кандидат физико-математических наук А. Е. Зарвин, организационное руководство текущей деятельностью – директор ЦКП ПФ, кандидат технических наук А. С. Яскин.

За время деятельности центра по заявкам на оказание услуг ЦКП ПФ НГУ организациям Новосибирска выполнено 22 договора. Общий объем выполненных работ (оказанных услуг, в том числе в интересах третьих лиц) ЦКП ПФ с момента организации по 2020 г. составил 32,6 млн рублей.

Заказчиками услуг являются как институты СО РАН, так и иные организации и фирмы: Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Институт катализа им. Г. К. Борескова, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, Институт автоматики и электрометрии, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения; ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С. П. Королева», ООО «Центр Технологий Лантан», ООО «Кристаллы Сибири», ЗАО «Сибирский монокристалл – ЭКСМА», ООО «Международный научный центр по теплофизике и энергетике» и др.

Список литературы

1. Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г., Мадирбаев В. Ж., Пасько П. Г., Попов Ю. Н. Отдел прикладной физики научно-исследовательской части // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 117–124.
2. Никитенко В. А., Стаюхин С. Г., Пасько П. Г., Кузьмина И. П. Факторы, влияющие на лазерные характеристики оксида цинка // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сб. тр. III Белорусско-Российского семинара. Минск, 2000. С. 41–43.
3. Пасько П. Г., Повх И. В., Алексеева Л. В., Строганов В. И. Анизотропное отражение света в кристаллах парателлурита // Нелинейная оптика: Сб. тр. Хабаровск, 2000. С. 69–72.
4. Пасько П. Г., Повх И. В., Алексеева Л. В., Строганов В. И. Расчет углов при четырехлучевом отражении // Нелинейная оптика: Сб. тр. Хабаровск, 2000. С. 92–98.
5. Горчаков А. В., Коробейщиков Н. Г., Николаев И. В., Федюхин Л. А. Способ неразрушающего контроля качества приповерхностного слоя оптических материалов. Патент РФ № 2703830 от 29.03.2019 г.
6. Федюхин Л. А., Горчаков А. В., Колосовский Е. А. Инварианты коэффициента отражения // Оптика и спектроскопия. 2020. Вып. 2. С. 266–271.
7. Федюхин Л. А., Горчаков А. В. Обратная задача теории отражения для трехслойных структур // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 158, № 5(11). С. 792–799.
8. Федюхин Л. А., Горчаков А. В., Коробейщиков Н. Г., Николаев И. В. Прецизионное измерение оптических характеристик приповерхностного слоя твердых тел // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 114, вып. 5. С. 304–310.
9. Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T. Progress and applications of cluster ion beam technology // Curr. Opin. Solid State Mater. 2015. Vol. 19. P. 12–18.

10. Иешкин А. Е., Толстогузов А. Б., Коробейщиков Н. Г., Пеленович В. О., Черныш В. С. Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // Успехи физических наук. 2021 (принято к публикации).
11. Korobeishchikov N. G., Roenko M. A., Tarantsev G. I. Mean gas cluster size determination from cluster beam cross-section // Journal of Cluster Science. 2017. Vol. 28, iss. 5. P. 2529–2547.
12. Коробейщиков Н. Г., Роенко М. А. Способ определения размеров газовых кластеров в сверхзвуковом потоке. Патент РФ № 2633290 от 15.04.2016.
13. Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Skovorodko P. A., Shmakov A. A., Khodakov M. D., Shulschenko G. I., Voskoboynikov R. V., Zarvin A. E. Features of formation of gas cluster ion beams // Vacuum. 2015. Vol. 119, № 9. P. 256–263.
14. Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A. Effect of argon cluster ion beam on fused silica surface morphology // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2019. Vol. 438. P. 1–5.
15. Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Atuchin V. V. Precise sputtering of silicon dioxide by argon cluster ion beams // Applied Physics A. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 833.
16. Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Yakovlev V. V., Fu D. J., Tolstogousov A. Anomalous sputtering of the lithium triborate single crystal surface by argon cluster ions // Vacuum. 2020. Vol. 179. P. 109555.
17. Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Atuchin V. V., Prosvirin I. P., Tolstogousov A., Pelenovich V., Fu D. J. Borate nonlinear optical single crystal surface finishing by argon cluster ion sputtering // Surfaces and Interfaces. 2021. Vol. 27. P. 101520.
18. Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г., Мадирбаев В. Ж., Пасько П. Г., Попов Ю. Н. Отдел прикладной физики научно-исследовательской части // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 117–124.
19. Зарвин А. Е., Каляда В. В., Коробейщиков Н. Г., Ходаков М. Д., Шмаков А. А. Модифицированная установка для газодинамических исследований и технологических разработок // ПТЭ. 2016. № 2. С. 127–134. DOI 10.1134/S0020441216010176
20. Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhnikov V. E., Gimelshein S. F. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45, iss. 5. P. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
21. Зарвин А. Е., Каляда В. В., Яскин А. С., Ходаков М. Д., Коробейщиков Н. Г., Художников В. Э., Мадирбаев В. Ж., Ездин Б. С. Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. № 6. С. 50–56. DOI 10.1134/S0020441216060117
22. Zarvin A. E., Krylov A. N., Yaskin A. S., Antipova M. S., Kalyada V. V., Gerasimov Y. I., Dubrovin K. A. and Khudozhnikov V. E. Laboratory simulation for single and block supersonic jets // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012160. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012160
23. Zarvin A. E., Yaskin A. S., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants // Vacuum. 2021. Vol. 191. P. 110409. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110409>.
24. Мадирбаев В. Ж., Зарвин А. Е., Коробейщиков Н. Г. Влияние конденсации на состав импульсной сверхзвуковой струи природного газа, активируемой пучком электронов // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 2. С. 34–39.
25. Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Kalyada V. V. Jet plasma-chemical reactor for the conversion of methane: the use of clustering // Advances in Materials Physics and Chemistry. 2012. No. 2. P. 146–149. doi:10.4236/ampc.2012.24B038
26. Zarvin A. E., Khodakov M. D., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G. On the possibility to repay of associated gas torches by using plasma-chemical conversion of methane // 21-th

- International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21). 4–9 August 2013. Cairns, Australia. Proceedings. P. 155. URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID155.pdf>.
27. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 032008. doi:10.1088/1742-6596/1683/3/032008
 28. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh.** Formation of mixed clusters in a pulsed helium-oxygen-isoprene supersonic jet // *Eur. Phys. J. D.* 2008. Vol. 49, № 1. P. 101–110. DOI 10.1140/epjd/e2008-00146-7
 29. **Зарвин А. Е., Каляда В. В., Художитков В. Э.** Особенности регистрации кластеров в сверхзвуковых недорасширенных струях методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // *Теплофизика и аэромеханика.* 2017. Т. 24, № 5. С. 691–702. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
 30. **Зарвин А. Е., Яскин А. С., Каляда В. В.** Влияние конденсации на размеры сильно недорасширенных струй при истечении в разреженное затопленное пространство // *Журнал ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 1. С. 99–106. DOI 10.1134/S002189441801011X
 31. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
 32. **Яскин А. С., Каляда В. В., Зарвин А. Е., Чиненов С. Т.** Метод эффективного сканирования сверхзвуковых струй разреженных газов // *Приборы и техника эксперимента.* 2020. № 3. С. 152–157. DOI 10.1134/S0020441220030185
 33. **Дубровин К. А., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Художитков В. Э., Яскин А. С.** Исследование структуры потока на малогабаритном газодинамическом комплексе: идентификация вторичного потока при истечении кластированной сверхзвуковой струи в разреженное пространство // *Журнал ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 5. С. 48–58. DOI 10.1134/S0021894418050061
 34. **Дубровин К. А., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Яскин А. С.** Причины свечения аномального вторичного потока в сверхзвуковых кластированных струях, возбужденных высоковольтным электронным пучком // *Письма в ЖТФ.* 2020. Т. 46, вып. 7. С. 32–35. DOI 10.1134/S1063785020040057
 35. **Zarvin A. E., Madirbaev V. Z., Dubrovin K. A., Kalyada V. V.** On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10214-2>.
 36. **Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А.** Особенности истечения в вакууммикроструйневязкой жидкости // *Письма в журнал технической физики.* 2021. Т. 47, вып. 21. С. 47–50. DOI 10.21883/PJTF.2021.21.51630.18846
 37. **Ezdin B. S., Kalyada V. V., Yatsenko D. A., Ischenko A. V., Volodin V. A., Shklyaev A. A.** Synthesis of Si nanoparticle chains and nanowhiskers by the monosilane decomposition in an adiabatic process during cyclic compression // *Powder Technology.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.032>.
 38. **Ezdin B., Pakharukov Yu., Kalyada V., Shabiev F., Zarvin A., Yatsenko D., Safargaliev R., Ichshenko A., Volodin V.** The novel method of synthesis of nanostructured materials for the enhancing recovery in oil displacement technologies // *Catalysis Today.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.024>
 39. **Ezdin B. S., Yatsenko D. A., Kalyada V. V., Ichshenko A. B., Zarvin A. E., Nikiforov A. A., Snytnikov P. V.** Pyrolysis of a mixture of monosilane and alkanes in a compression reactor to produce nanodispersed silicon carbide // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Vol. 381. No. 122642. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122642>.
 40. **Ezdin B., Yatsenko D., Kalyada V., Zarvin A., Ichshenko A., Nikiforov A., Snytnikov P.** Data on the structure, chemical state of silicon carbide synthesized by adiabatic cyclic compres-

- sion in a chemical reactor // Data in brief. 2020. Vol. 28. P. 104868. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104868>
41. **Ezdin B. S., Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V. and Konovalov S. A.** Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52, № 1-2. P. 26–28. DOI 10.1007/s10556-016-0141-5
 42. **Ездин Б. С., Никифоров А. А., Куприков М. Ю.** Химический реактор сжатия. Патент РФ № 2640079.
 43. **Pakharukov Y. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** Thermocapillary waves formation at the interface of hydrocarbons and graphene-like nanofluids // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. P. 012145. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012145
 44. **Pakharukov Yu. V., Shabiev E. K., Safargaliev R. F., Simonov A. S., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** The use of nanoparticles to displace oil from a porous medium // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 022082. doi:10.1088/1742-6596/1683/2/022082
 45. **Avtaeva S. V.** About formation of secondary current pulses in dielectric barrier discharges in Xe-Cl₂ mixtures // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42(1). P. 229-234.
 46. **Avtaeva S. V.** Time-dependent characteristics of the dielectric barrier discharge in Xe-Cl₂ mixture and kinetics of the XeCl* molecules // Eur. Phys. J. D. 2014. Vol. 68(4). P. 68-90.
 47. **Avtaeva S. V.** Modelling of physical and chemical processes in the dielectric barrier discharge in chlorine // Nonequilibrium processes in physics and Chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 143–151.
 48. **Avtaeva S. V.** On electron attachment effect on characteristics of the DBD in chlorine and its mixtures with xenon // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 927. P. 012006. doi:10.1088/1742-6596/927/1/012006
 49. **Avtaeva S., Gorokhovskiy V., Obrusnik A., Zembower Z.** Composition of high current arc plasma in Ar-H₂ mixture at moderate pressures // Газоразрядная плазма и ее применение: Сб. тезисов XIII Междунар. конф., 5–7 сентября 2017 г. Новосибирск, 2017.
 50. **Avtaeva S. V., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Chinenov S. T.** Spark discharge excited supersonic gas jets // Nonequilibrium processes in physics and Chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 232–240.
 51. **Avtaeva S. V., Yakovleva T. S., Kalyada V. V. and Zarvin A. E.** The electron beam diagnostic of the clustered supersonic nitrogen jets // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 927. P. 012005. doi:10.1088/1742-6596/927/1/012005.
 52. **Яковлева Т. С., Автаева С. В., Каляда В. В., Зарвин А. Е.** Измерение вращательной температуры азота в кластированной сверхзвуковой струе // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIV Научно-технической конф. с участием зарубежных специалистов / Под ред. д.т.н., проф. С. Б. Нестерова, 16–23 сентября 2017, г. Судак. М.: Новелла. 2017. С. 96–100.
 53. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
 54. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovnikov K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI 10.1088/1742-6596/1683/3/032008/
 55. **Khudozhitkov V. E. and Kalyada V. V.** Registration of protoned argon and helium in a clustered gas flow of argon-hydrogen and helium-hydrogen mixtures // AIP Conf. Proceedings. 2021. Vol. 2351. P. 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0052014>
 56. **Ukhina A. V., Dudina D. V., Esikov M. A., Galashov E. N., Bokhonov B. B.** The influence of morphology and composition of metal–carbide coatings deposited on the diamond surface on the properties of copper–diamond composites // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 401. P. 126272.

57. **Galashov E. N., Matvienko D. V., Moskovskiy V. A., Sikach B. I., Shwartz B. A.** Scintillation properties of $(\text{Zn}_{0.9}\text{Pb}_{0.1})(\text{W}_{0.9}\text{Mo}_{0.1})\text{O}_4$ and $(\text{Zn}_{0.9}\text{Cd}_{0.1})(\text{W}_{0.9}\text{Mo}_{0.1})\text{O}_4$ mixed crystals // *Journal of Instrumentation*. 2020. Vol. 15(7). P. C07028.
58. **Galashov E. N., Mandrik Y. M., Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Korolkov I. V., Yelissev A. P., Xia Z.** Synthesis of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ phosphor in the $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Al--CeO}_2$ Ternary system // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52(22). P. 13033–13039.
59. **Galashov E. N., Atuchin V. V., Pokrovsky L. D., Bekenev V. L., Khyzhun O. Y., Borovlev Yu. A., Kozhukhov A. S., Zhdankov V. N.** Low thermal gradient Czochralsky growth of large MWO_4 ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Cd}$) crystals, and microstructural and electronic properties of the (010) cleaved surfaces // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2017. Vol. 19, № 1–2. P. 86–90.

References

1. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Madirbaev V. Zh., Pasko P. G., Popov Y. N.** Department of Applied Physics of the research unit // *Vestn. of Novosibirsk. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2006. Vol. 1, no. 1. P. 117–124.
2. **Nikitenko V. A., Stayukhin S. G., Pasko P. G. G., Kuzmina I. P.** Factors influencing the laser characteristics of zinc oxide // *Semiconductor lasers and systems based on them: Proceedings of the III Belarusian-Russian Seminar*. Minsk, 2000. P. 41–43.
3. **Pasko P. G., Povkh I. V., Alexeeva L. V., Stroganov V. I.** Anisotropic reflection of light in paratellurite crystals // *Nonlinear Optics: Collected Works Khabarovsk*, 2000. P. 69–72.
4. **Pasko P. G., Povkh I. V., Alekseeva L. V., Stroganov V. I.** Calculation of angles at four-beam reflection // *Nonlinear Optics: Collection of Proc. Khabarovsk*, 2000. P. 92–98.
5. **Gorchakov A. V., Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Fedyukhin L. A.** Method of nondestructive quality control of the near-surface layer of optical materials. Patent of the Russian Federation № 2703830 from 29.03.2019.
6. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V., Kolosovsky E. A.** Reflection coefficient invariants // *Optics and Spectroscopy*. 2020. Vol. 2. P. 266–271.
7. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V.** Inverse problem of the reflection theory for three-layer structures // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. V. Inverse problem of the reflection theory for three-layer structures // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 158, № 5(11). P. 792–799.
8. **Fedyukhin L. A., Gorchakov A. V., Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V.** Precision measurement of optical characteristics of the near-surface layer of solids // *Letters in ZhETF*. 2021. Vol. 114, no. 5. P. 304–310.
9. **Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T.** Progress and applications of cluster ion beam technology // *Curr. Opin. Solid State Mater.* 2015. Vol. 19. P. 12–18.
10. **Ieshkin A. E., Tolstoguzov A. B., Korobeishchikov N. G., Pelenovich V. O., Chernysh V. C.** Gas-dynamic sources of cluster ions for solving fundamental and applied problems // *Uspekhi physicheskikh nauk*. 2021 (accepted for publication).
11. **Korobeishchikov N. G., Roenko M. A., Tarantsev G. I.** Mean gas cluster size determination from cluster beam cross-section // *Journal of Cluster Science*. 2017. Vol. 28, iss. 5. P. 2529–2547.
12. **Korobeishchikov N. G., Roenko M. A.** Method for determining the size of gas clusters in supersonic flow. Patent of the Russian Federation № 2633290 from 15.04.2016.
13. **Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Skovorodko P. A., Shmakov A. A., Khodakov M. D., Shulschenko G. I., Voskoboinikov R. V., Zarvin A. E.** Features of formation of gas cluster ion beams // *Vacuum*. 2015. Vol. 119, № 9. P. 256–263.
14. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A.** Effect of argon cluster ion beam on fused silica surface morphology // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2019. Vol. 438. P. 1–5.

15. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Atuchin V. V.** Precise sputtering of silicon dioxide by argon cluster ion beams // *Applied Physics A*. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 833.
16. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Roenko M. A., Yakovlev V. V., Fu D. J., Tolstogou-zov A.** Anomalous sputtering of the lithium triborate single crystal surface by argon cluster ions // *Vacuum*. 2020. Vol. 179. P. 109555.
17. **Korobeishchikov N. G., Nikolaev I. V., Atuchin V. V., Prosvirin I. P., Tolstogou-zov A., Pelenovich V., Fu D. J.** Borate nonlinear optical single crystal surface finishing by argon cluster ion sputtering // *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 27. P. 101520.
18. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Madirbaev V. Zh., Pasko P. G., Popov Yu. N.** Department of Applied Physics of the research unit // *Vestn. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2006. Vol. 1, iss. 1. P. 117–124.
19. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Shmakov A. A.** Modified installation for gas dynamic research and technological developments // *PTE*. 2016. № 2. P. 127–134. DOI 10.1134/S0020441216010176
20. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhitkov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for analyzes of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45, iss. 5. P. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
21. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Khodakov M. D., Korobeishchikov N. G., Khudozhitkov V. E., Madirbaev V. Zh., Ezdin B. S.** Experimental setup for plasma chemical studies // *PTE*. 2016. № 6. P. 50–56. DOI 10.1134/S0020441216060117
22. **Zarvin A. E., Krylov A. N., Yaskin A. S., Antipova M. S., Kalyada V. V., Gerasimov Y. I., Dubrovin K. A. and Khudozhitkov V. E.** Laboratory simulation for single and block supersonic jets // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1677. P. 012160. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012160
23. **Zarvin A. E., Yaskin A. S., Dubrovin K. A., Kalyada V. V.** Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants // *Vacuum*. 2021. Vol. 191. P. 110409. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110409>.
24. **Madirbaev V. Zh., Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G.** Effect of condensation on the composition of a pulsed supersonic natural gas jet activated by an electron beam // *Vestnik. Novosibirsk State Univ. Series: Physics*. 2008. Vol. 3, iss. 2. C. 34–39.
25. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Kalyada V. V.** Jet plasma-chemical reactor for the conversion of methane: the use of clustering // *Advances in Materials Physics and Chemistry*. 2012. No. 2. P. 146–149. DOI:10.4236/ampc.2012.24B038.
26. **Zarvin A. E., Khodakov M. D., Kalyada V. V., Korobeishchikov N. G.** On the possibility to repay of associated gas torches by using plasma-chemical conversion of methane // 21-th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21). August 4-9, 2013. Cairns, Australia. Proceedings. P. 155. URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID155.pdf>.
27. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovin K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI 10.1088/1742-6596/1683/3/032008
28. **Zarvin A. E., Korobeishchikov N. G., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh.** Formation of mixed clusters in a pulsed helium-oxygen-isoprene supersonic jet // *Eur. Phys. J. D*. 2008. Vol. 49, № 1. P. 101–110. DOI 10.1140/epjd/e2008-00146-7
29. **Zarvin A. E. E., Kalyada V. V., Khudozhitkov V. E.** Peculiarities of cluster registration in supersonic under-expanded jets by molecular beam mass spectrometry // *Teplofizika i aeromechanika*. 2017. Vol. 24, № 5. P. 691–702. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
30. **Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V.** The influence of condensation on the size of strongly under-expanded jets during the flow into a rarefied flooded space // *Journal of PMTF*. 2018. Vol. 59, № 1. P. 99–106. DOI 10.1134/S002189441801011X

31. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhnikov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
32. **Yaskin A. S., Kalyada V. V., Zarvin A. E., Chinenov S. T.** Method of effective scanning of supersonic jets of rarefied gases // *Instrumentation and Technique of Experiment.* 2020. № 3. P. 152–157. DOI 10.1134/S0020441220030185
33. **Dubrovnikov K. A., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Khudozhnikov V. E., Yaskin A. S.** Study of the flow structure on a small-size gas-dynamic complex: identification of the secondary flow at the expiration of a clustered supersonic jet in rarefied space // *Journal of PMTF.* 2018. Vol. 59, № 5. P. 48–58. DOI 10.1134/S0021894418050061
34. **Dubrovnikov K. A., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. C.** Causes of anomalous secondary flux glow in supersonic clustered jets excited by a high-voltage electron beam // *Letters in ZhTF.* 2020. Vol. 46, iss. 7. P. 32–35. DOI 10.1134/S1063785020040057
35. **Zarvin A. E., Madirbaev V. Z., Dubrovnikov K. A., Kalyada V. V.** On the mechanism of ionic-cluster excitation of argon levels in molecular gas mixtures // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10214-2>.
36. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovnikov K. A.** Peculiarities of flow into vacuum of microjets of a non-viscous liquid // *Letters to the Journal of Technical Physics.* 2021. Vol. 47, iss. 21. P. 47–50. DOI 10.21883/PJTF.2021.21.51630.18846
37. **Ezdin B. S., Kalyada V. V., Yatsenko D. A., Ischenko A. V., Volodin V. A., Shklyayev A. A.** Synthesis of Si nanoparticle chains and nanowhiskers by the monosilane decomposition in an adiabatic process during cyclic compression // *Powder Technology.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.032>.
38. **Ezdin B., Pakharukov Yu., Kalyada V., Shabiev F., Zarvin A., Yatsenko D., Safargaliev R., Ichshenko A., Volodin V.** The novel method of synthesis of nanostructured materials for the enhancing recovery in oil displacement technologies // *Catalysis Today.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.09.024>
39. **Ezdin B. S., Yatsenko D. A., Kalyada V. V., Ichshenko A. B., Zarvin A. E., Nikiforov A. A., Snytnikov P. V.** Pyrolysis of a mixture of monosilane and alkanes in a compression reactor to produce nanodispersed silicon carbide // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Vol. 381, no. 122642. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122642>.
40. **Ezdin B., Yatsenko D., Kalyada V., Zarvin A., Ichshenko A., Nikiforov A., Snytnikov P.** Data on the structure, chemical state of silicon carbide synthesized by adiabatic cyclic compression in a chemical reactor // *Data in brief.* 2020. Vol. 28. P. 104868. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104868>
41. **Ezdin B. S., Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V. and Konovalov S. A.** Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons // *Chemical and Petroleum Engineering.* 2016. Vol. 52, № 1–2. P. 26–28. DOI 10.1007/s10556-016-0141-5
42. **Ezdin B. S., Nikiforov A. A., Kuprikov M. Yu.** Chemical compression reactor. Russian Federation Patent No. 2640079.
43. **Pakharukov Y. V., Shabiev F. K., Safargaliev R. F., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** Thermocapillary waves formation at the interface of hydrocarbons and graphene-like nanofluids // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1677. P. 012145. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012145
44. **Pakharukov Yu. V., Shabiev E. K., Safargaliev R. F., Simonov A. S., Ezdin B. S., Zarvin A. E. and Kalyada V. V.** The use of nanoparticles to displace oil from a porous medium // *J. Phys. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1683. P. 022082. DOI 10.1088/1742-6596/1683/2/022082
45. **Avtaeva S. V.** About formation of secondary current pulses in dielectric barrier discharges in Xe-Cl₂ mixtures // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2014. Vol. 42(1). P. 229–234.
46. **Avtaeva S. V.** Time-dependent characteristics of the dielectric barrier discharge in Xe-Cl₂ mixture and kinetics of the XeCl* molecules // *Eur. Phys. J. D.* 2014. Vol. 68(4). P. 68–90.

47. **Avtaeva S. V.** Modelling of physical and chemical processes in the dielectric barrier discharge in chlorine // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 143–151.
48. **Avtaeva S. V.** On electron attachment effect on characteristics of the DBD in chlorine and its mixtures with xenon // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 927. P. 012006. DOI 10.1088/1742-6596/927/1/012006
49. **Avtaeva S., Gorokhovskiy V., Obrusnik A., Zembower Z.** Composition of high current arc plasma in Ar-H₂ mixture at moderate pressures // Gas-discharge plasma and its application: Collection of abstracts of XIII International Conference, September 5-7, 2017. Novosibirsk, 2017.
50. **Avtaeva S. V., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Yaskin A. S., Chinenov S. T.** Spark discharge excited supersonic gas jets // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 1. Plasma, Clusters, and Atmosphere / Ed. by A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 232–240.
51. **Avtaeva S. V., Yakovleva T. S., Kalyada V. V. and Zarvin A. E.** The electron beam diagnostic of the clustered supersonic nitrogen jets // J. Phys. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 927. P. 012005. DOI 10.1088/1742-6596/927/1/012005
52. **Yakovleva T. S., Avtaeva S. V. V., Kalyada V. V., Zarvin A. E.** Measurement of the rotational temperature of nitrogen in a clustered supersonic jet // Vacuum Science and Technology: Proceedings of the XXIV Scientific and Technical Conf. with the participation of foreign experts / Edited by Dr. S. B. Nesterov, September 16-23, 2017, Sudak. Moscow: Novella. 2017. C. 96 100.
53. **Chinenov S. T., Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Mass spectrometric study of gas clusters by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. P. 012113. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012113
54. **Zarvin A. E., Khudozhitkov V. E., Dubrovnikov K. A., Kalyada V. V. and Yaskin A. S.** Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1683. P. 032008. DOI 10.1088/1742-6596/1683/3/032008/
55. **Khudozhitkov V. E. and Kalyada V. V.** Registration of protoned argon and helium in a clustered gas flow of argon-hydrogen and helium-hydrogen mixtures // AIP Conf. Proceedings. 2021. Vol. 2351. P. 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0052014>
56. **Ukhina A. V., Dudina D. V., Esikov M. A., Galashov E. N., Bokhonov B. B.** The influence of morphology and composition of metal–carbide coatings deposited on the diamond surface on the properties of copper–diamond composites // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 401. P. 126272.
57. **Galashov E. N., Matvienko D. V., Moskovskiy V. A., Sikach B. I., Shwartz B. A.** Scintillation properties of (Zn_{0.9}Pb_{0.1})(W_{0.9}Mo_{0.1})O₄ and (Zn_{0.9}Cd_{0.1})(W_{0.9}Mo_{0.1})O₄ mixed crystals // Journal of Instrumentation. 2020. Vol. 15(7). P. C07028.
58. **Galashov E. N., Mandrik Y. M., Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Korolkov I. V., Yelissev A. P., Xia Z.** Synthesis of Y₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ phosphor in the Y₂O₃–Al metal–CeO₂ Ternary system // Journal of Materials Science. 2017. Vol. 52(22). P. 13033–13039.
59. **Galashov E. N., Atuchin V. V., Pokrovsky L. D., Bekenev V. L., Khyzhun O. Y., Borovlev Yu. A., Kozhukhov A. S., Zhdankov V. N.** Low thermal gradient Czochralsky growth of large MWO₄ (M = Zn, Cd) crystals, and microstructural and electronic properties of the (010) cleaved surfaces // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2017. Vol. 19, № 1-2. P. 86–90.

Сведения об авторах

Александр Евгеньевич Зарвин, кандидат физико-математических наук

Евгений Николаевич Галашов, научный сотрудник

Борис Семенович Ездин, кандидат физико-математических наук

Николай Геннадьевич Коробейщиков, кандидат физико-математических наук

Петр Григорьевич Пасько, старший научный сотрудник

Александр Сергеевич Яскин, кандидат технических наук

Information about the Authors

Alexandr E. Zarvin, PhD, Head of the Research Department

Evgenii N. Galashov, Research Assistant

Boris S. Ezdin, PhD, Senior Researcher

Nikolay G. Korobeishchikov, PhD, Senior Researcher

Petr G. Pasko, Senior Researcher

Alexander S. Yaskin, PhD, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 29.11.2021;
принята к публикации 22.06.2023*

*The article was submitted 23.11.2021; approved after reviewing 29.11.2021;
accepted for publication 22.06.2023*

Научная статья

УДК 537.311.322; 378

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-105-117

Изучение электрофизических свойств анизотропных полупроводников в лабораторном практикуме вузовского курса физики

**Владимир Владимирович Филиппов¹, Заворотний Анатолий Анатольевич²,
Михаил Юрьевич Смирнов³, Владимир Сергеевич Зияутдинов⁴,
Дмитрий Денисович Лыков⁵**

^{1, 5} Липецкий государственный педагогический университет
им. П. П. Семенова-Тян-Шанского
Липецк, Россия

^{1, 3, 4} Московский государственный университет технологий и управления
им. К. Г. Разумовского (ПКУ) – Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал)
Липецк, Россия

² Липецкий государственный технический университет
Липецк, Россия

¹ wwfilippow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-351X>

² aazavorotniy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6316-667X>

³ m_u_smirnov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9820-9253>

⁴ zevslipetsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5136-837X>

⁵ lykovdmitri2000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2980-1322>

Аннотация

Целью статьи является разработка теоретически и экспериментально обоснованной конкретной лабораторной работы для изучения анизотропии электрических свойств полупроводников в рамках учебных программ вышших учебных заведений для таких направлений подготовки, как физика, техническая физика, радиофизика, электроника и нанoeлектроника. Актуальность проблематики обусловлена стремлением отечественной электроники к технологическому суверенитету и высокими требованиями к подготовке квалифицированных кадров для производства структур твердотельной функциональной электроники. На основе решения краевой электродинамической задачи получено выражение для электрического потенциала в области тонкого прямоугольного полупроводникового образца с тензорным характером проводимости. Итогом работы стала разработка оригинальной лабораторной установки для демонстрации и практического изучения анизотропии электрических свойств полупроводниковых кристаллов. Предлагаемая методика позволяет определять основные электрокинетические параметры анизотропного полупроводника – удельную проводимость, концентрацию холловскую подвижность основных носителей заряда. Предложена принципиальная схема установки и формулы для расчета погрешностей измеряемых величин. Полученные результаты могут также представлять и научный интерес при изучении анизотропных полупроводниковых материалов в лабораторных условиях.

Ключевые слова

полупроводник, методика изучения, анизотропия, кристалл, электропроводимость, электрический потенциал, подвижность носителей тока, эффект Холла

Для цитирования

Филиппов В. В., Заворотний А. А., Смирнов М. Ю., Зияутдинов В. С. Изучение электрофизических свойств анизотропных полупроводников в лабораторном практикуме вузовского курса физики // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 105–117. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-105-117

© Филиппов В. В., Заворотний А. А., Смирнов М. Ю., Зияутдинов В. С., 2023

The Study of the Electrical Properties of Anisotropic Semiconductors in the Laboratory Workshop of the University Course in Physics

Vladimir V. Filippov¹, Anatoly A. Zavorotny²,
Mikhail Yu. Smirnov³, Vladimir S. Ziyautdinov⁴,
Dmitry D. Lykov⁵

^{1,5} Lipetsk State Pedagogical University named after P. P. Semenov-Tyan-Shansky
Lipetsk, Russia

^{1,3,4} Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (PKU), Lipetsk Cossack
Institute of Technology and Management (branch)
Lipetsk, Russia

² Lipetsk State Technical University
Lipetsk, Russia

¹ wwfilippov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-351X>

² aazavorotniy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6316-667X>

³ m_u_smirnov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9820-9253>

⁴ zevslipetsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5136-837X>

⁵ lykovdmitri2000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2980-1322>

Abstract

The purpose of the article is to develop a theoretically and experimentally substantiated specific laboratory work for studying the anisotropy of the electrical properties of semiconductors within the framework of the curricula of higher educational institutions, for such areas of training as “Physics”, “Technical Physics”, “Radiophysics” and “Electronics and Nanoelectronics”. The relevance of the problem is due to the desire of domestic electronics for technological sovereignty and high requirements for the training of qualified personnel for the production of structures of solid-state functional electronics. Based on the solution of the boundary electrodynamic problem, an expression is obtained for the electric potential in the region of a thin rectangular semiconductor sample with a tensor character of conductivity. The results of this work is the development of an original laboratory setup for the demonstration and practical study of the anisotropy of the electrical properties of semiconductor crystals. The proposed technique makes it possible to determine the main electrokinetic parameters of an anisotropic semiconductor – specific conductivity, concentration and Hall mobility of the main charge carriers. A schematic diagram of the installation and formulas for calculating the errors of the measured quantities are proposed. The results obtained may also be of scientific interest in the study of anisotropic semiconductor materials in laboratory conditions.

Keywords

semiconductor, study technique, anisotropy, crystal, electrical conductivity, electric potential, carrier mobility, Hall effect

For citation

Filippov V. V., Zavorotniy A. A., Smirnov M. Yu., Ziyautdinov V. S., Lykov D. D. The study of the electrical properties of anisotropic semiconductors in the laboratory workshop of the university course in physics. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 105–117 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-105-117

Введение

В современных условиях быстро развивающейся силовой и функциональной электроники, а также микро- и нанoeлектроники [1; 2] одной из актуальнейших проблем современного образования является подготовка кадров для электронной промышленности [3]. Важным разделом современной физики, с фундаментальной и прикладной точек зрения, является физика твердого тела, в частности физика полупроводников. Как правило, современные учебные планы по подготовке инженерно-технических и научных кадров (бакалавров, специалистов и магистров) для электронной промышленности включают в себя дисциплины, направленные на практическое изучение материалов электронной техники, в том числе полупроводников [4]. Имеются качественные апробированные учебные пособия по изучению свойств полупрово-

дников, например [5–7]. В то же время в современной функциональной электронике все более перспективны полупроводниковые кристаллы, проявляющие существенную анизотропию электрофизических свойств [8–11].

Для определения таких электрофизических параметров изотропных полупроводников, как концентрация n и подвижность μ носителей заряда, в учебном лабораторном практикуме широко используются стандартные методики [6; 7]. Однако их применение для исследований анизотропных полупроводниковых материалов встречает серьезные трудности. Они связаны, в первую очередь, со сложным характером распределения потенциала и плотности тока в анизотропных образцах при электрических измерениях [12; 13]. Кроме того, тензорный характер электропроводности σ и коэффициента Холла R_z усложняет как методику измерений, так и математическую обработку результатов [14; 15]. В известной литературе описаний учебных лабораторных работ для исследований анизотропных монокристаллов в настоящее время недостаточно. В то же время новые экспериментальные физические исследования анизотропных материалов и их перспективы в электронной технике заставляют искать пути и методы более детального их изучения.

В настоящей статье предлагается новая лабораторная работа «Измерение компонент тензора электропроводности и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых монокристаллов». Рассмотрена методика проведения эксперимента в рамках освоения студентами вузов дисциплин (практик), направленных на изучение материалов современной электроники.

1. Методика измерений компонент тензоров электропроводности и коэффициента Холла

В качестве исследуемого полупроводника используем образец в форме параллелепипеда вырезанного так, что его грани параллельны кристаллофизическим плоскостям. По периметру образца располагаем четыре контакта малой площади входных сечений, как показано на рис. 1. Для определения параметра анизотропии σ_y/σ_x , где σ_x , σ_y – удельные электропроводности вдоль осей X и Y соответственно (оси вдоль главных направлений тензора удельной электропроводности), ток I_{12} пропускаем сначала через контакты 1, 2 и между ними же измеряем разность потенциалов U_{12} , после чего находим сопротивление $R_{12} = U_{12}/I_{12}$.

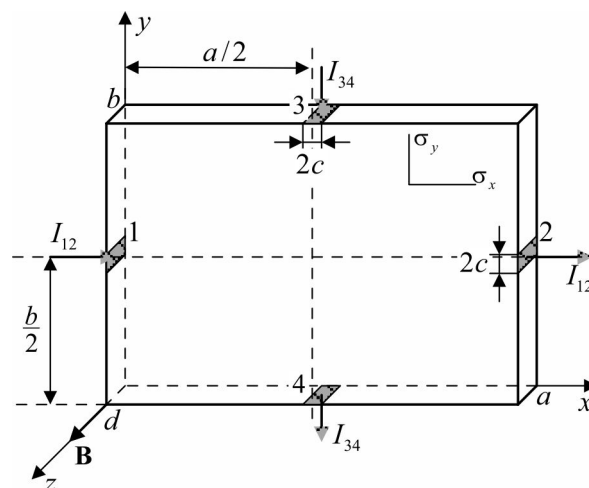


Рис. 1. Схема расположения токовых контактов на полупроводниковом образце
Fig. 1. Scheme of current contacts arrangement on a semiconductor sample

Затем ток I_{34} пропускаем через контакты 3, 4 и измеряем разность потенциалов U_{34} . Аналогично вычисляем сопротивление $R_{34} = U_{34}/I_{34}$.

Отношение R_{12}/R_{34} является функцией параметра анизотропии $\gamma = \sqrt{\sigma_y/\sigma_x}$, геометрического фактора a/b и относительного размера контакта c/b [14; 15]:

$$R_{12}/R_{34} = f(\gamma, a/b, c/b). \quad (1)$$

Зная вид этой функции и геометрические размеры образца, можно из (1) вычислить параметр анизотропии γ .

Для определения компонент электропроводности по результатам измерений можно воспользоваться формулами

$$\frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{1}{\sigma_x d} M(\gamma, a/b, c/b) \Rightarrow \sigma_x = \frac{1}{R_{12}} \frac{1}{d} M(\gamma, a/b, c/b), \quad \sigma_y = \gamma^2 \cdot \sigma_x, \quad (2)$$

где d – толщина образца, а множитель M может быть рассчитан теоретически.

Для определения коэффициента Холла R_z образец помещается в поперечное магнитное поле B_z , ток пропускается через контакты 1 и 2, ЭДС Холла ξ_{34} измеряется между контактами 3 и 4 (см. рис. 1). По результатам измерений вычисляется коэффициент Холла R_z из формулы

$$U_{34}^B - U_{34}^0 = \xi_{34} = I_{12} R_z B_z / d. \quad (3)$$

Совершенно аналогично можно пропускать ток через контакты 3, 4, а ЭДС Холла измерять между контактами 1, 2. Зная кинетические коэффициенты σ_y, σ_x, R_z , вычисляется концентрация n и компоненты тензора холловской подвижности носителей тока [16, 17]:

$$\mu_x = \sigma_x R_z, \quad \mu_y = \sigma_y R_z, \quad R_z = A/(n \cdot e). \quad (4)$$

Коэффициент A зависит от механизма рассеяния носителей тока. Для рассеяния на акустических колебаниях решетки он равен 1,38, для рассеяния на ионах примеси – 1,93, для рассеяния на нейтральной примеси – 1 [7].

Таким образом, задачей теории предлагаемого четырехконтактного метода измерений σ_y, σ_x, R_z является вывод формул (1)–(3) и получение аналитических выражений для функции f и множителя M потенциала электрического поля в образце при данных измерениях.

2. Теоретическое обоснование методики

В рассматриваемом случае прямоугольный образец помещен в поперечное магнитное поле B_z , ток пропускается через контакты 1, 2. При измерениях на постоянном токе векторы плотности тока $\mathbf{j}$ напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ и потенциал φ связаны соотношениями [17; 18]:

$$\text{div } \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (5)$$

$$j_x = \sigma_x E_x + \sigma_x \sigma_y R_z B_z; \quad j_y = \sigma_y E_y - \sigma_x \sigma_y R_z B_z, \quad (6)$$

где σ_x, σ_y – диагональные компоненты тензора удельной электропроводности [16; 17]:

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_x \sigma_y R_z B_z \\ -\sigma_x \sigma_y R_z B_z & \sigma_y \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что потенциал электрического поля в образце удовлетворяет краевой задаче:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\gamma_y \partial \varphi}{\partial y} \right) \Big|_{x=0, a} = \begin{cases} -\frac{I_{12}}{2\sigma_x c d}, & y \in [b/2 - c; b/2 + c], \\ 0, & y \in [0; b/2 - c) \cup (b/2 + c; b], \end{cases} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\gamma_x \partial \varphi}{\partial x} \right) \Big|_{y=0, b} = 0, \quad (10)$$

где a, b, d – длина, ширина, толщина образца, $2c$ – ширина токовых контактов;

$$\gamma^2 = \sigma_y / \sigma_x, \quad \gamma_x = \sigma_x R_z B_z, \quad \gamma_y = \sigma_y R_z B_z. \quad (11)$$

Для наилучшего соблюдения граничных условий (9), (10) и уменьшения влияния контактных явлений необходимо, чтобы площадь токовых контактов $2c \times d$ была много меньше площади боковых граней $2d(a + b)$ т. е. $c \ll a, b$.

Для случая относительно слабых магнитных полей (принимая $\mu_x \mu_y B^2 \ll 1$ или $(\sigma_x R_z)(\sigma_y R_z) B^2 \ll 1$ [14; 17]) будем считать, что компоненты σ_x, σ_y тензора электропроводности (7) не зависят от индукции магнитного поля B_z , т. е. пренебрегаем эффектом физического магнитосопротивления [7; 17].

Решение краевой задачи (8)–(10) представим в соответствии с граничными условиями (10) в виде ряда Фурье в комплексной форме [19]:

$$\varphi^*(x, y) = \sum_n X_n(x) \cdot \exp(i\beta_n y), \quad (12)$$

$$\beta_n = \pi n / b, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

Подставляя (12) в уравнение (8) и освобождаясь от экспоненты путем интегрирования, получаем уравнение для $X_n(x)$:

$$\frac{d^2 X_n}{dx^2} + \gamma^2 \beta_n^2 X_n(x) = 0. \quad (14)$$

Решение (14) удобно представляется через гиперболические функции:

$$X_n(x) = C_n \operatorname{sh} \gamma \beta_n x + D_n \operatorname{ch} \gamma \beta_n x. \quad (15)$$

Постоянные интегрирования C_n и D_n определяем из граничных условий (9). Действительная часть выражения (12) имеет смысл потенциала электрического поля в образце и в линейном приближении по величине магнитного поля представляется в виде

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) = & -\frac{I_{12}}{\sigma_x d b} \cdot \left(x - \frac{2}{\gamma} \sum_{n=2,4,\dots} (-1)^{n/2} \cdot \frac{[\operatorname{ch} \gamma \beta_n (a-x) - \operatorname{ch} \gamma \beta_n x] \cos \beta_n y \sin(\beta_n c)}{\beta_n \cdot \operatorname{sh} \gamma \beta_n a \beta_n c} \right) - \\ & - \frac{I_{12} R_z B_z}{b d} \cdot \left(y + 2 \sum_{n=2,4,\dots} (-1)^{n/2} \cdot \frac{[\operatorname{sh} \gamma \beta_n (a-x) + \operatorname{sh} \gamma \beta_n x] \sin \beta_n y \sin(\beta_n c)}{\beta_n \cdot \operatorname{sh} \gamma \beta_n a \beta_n c} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Полученное распределение потенциала электрического поля в образце позволяет вывести расчетные формулы (1)–(3), необходимые для вычисления компонент электропроводности и коэффициента Холла.

Используя (16), ЭДС Холла ξ_{34} находится:

$$\xi_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = I_{12} R_z B_z / d. \quad (17)$$

Таким образом, для слабых магнитных полей и при пренебрежении шунтирующим влиянием токовых контактов получаем известную формулу Ван дер Пау [7].

Из (16) получаем также разность потенциалов U_{12} при отсутствии внешнего магнитного поля ($B_z = 0$) и, соответственно, теоретическое сопротивление R_{12} :

$$R_{12} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{\langle \varphi_1 \rangle - \langle \varphi_2 \rangle}{I_{12}} = \frac{a}{bd\sigma_x} \left[1 + \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \cdot \frac{b}{a} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\gamma \beta_n a) - 1}{n \cdot \text{sh}(\gamma \beta_n a)} \left(\frac{\sin(\beta_n c)}{\beta_n c} \right)^2 \right\} \right]. \quad (18)$$

Сравнивая (18) и (2), находим формулу для вычисления множителя M :

$$M(\gamma, a/b, c/b) = \frac{a}{b} + \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\gamma n \pi a/b) - 1}{n \cdot \text{sh}(\gamma n \pi a/b)} \left(\frac{\sin(n \pi c/b)}{n \pi c/b} \right)^2 \right\}. \quad (19)$$

Для случая квадратного образца, т. е. при $a = b$, получаем

$$M(\gamma, c/b) = 1 + \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\gamma \pi n) - 1}{n \cdot \text{sh}(\gamma \pi n)} \left(\frac{\sin(\pi n c/b)}{\pi n c/b} \right)^2 \right\}. \quad (20)$$

Значения множителя M для различных значений a/b , c/b и σ_y/σ_x легко могут быть вычислены на компьютере для конкретных исследуемых образцов. В качестве примера на рис. 2 представлены зависимости $M(\gamma, c/b)$ для квадратного образца при некоторых отношениях c/b .

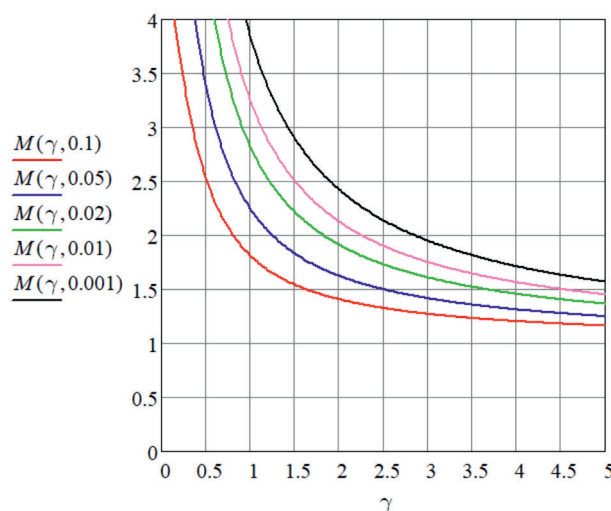


Рис. 2. Расчетная зависимость множителя M от параметра анизотропии γ
Fig. 2. Calculated dependence of the multiplier M on the anisotropy parameter γ

Вычисляя аналогичным образом теоретическое U_{34} при токе I_{34} , получаем теоретическое сопротивление R_{34} :

$$R_{34} = \frac{U_{34}}{I_{34}} = \frac{\langle \varphi_3 \rangle - \langle \varphi_4 \rangle}{I_{34}} = \frac{b}{ad\sigma_y} \left[1 + \frac{4\gamma}{\pi} \cdot \frac{a}{b} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\alpha_n b / \gamma) - 1}{n \cdot \text{sh}(\alpha_n b / \gamma)} \left(\frac{\sin(\alpha_n c)}{\alpha_n c} \right)^2 \right\} \right], \quad \alpha_n = \frac{\pi n}{a}. \quad (21)$$

При помощи (17) и (21) находим отношение:

$$\frac{R_{12}}{R_{34}} = f\left(\gamma, \frac{a}{b}, \frac{c}{b}\right) = \gamma^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{\left[1 + \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \cdot \frac{b}{a} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\pi \gamma n(a/b)) - 1}{n \cdot \text{sh}(\pi \gamma n(a/b))} \left(\frac{\sin(\pi n(c/b))}{\pi n(c/b)} \right)^2 \right\} \right]}{\left[1 + \frac{4\gamma}{\pi} \cdot \frac{a}{b} \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\pi n(b/a)/\gamma) - 1}{n \cdot \text{sh}(\pi n(b/a)/\gamma)} \left(\frac{\sin(\pi n(c/a))}{\pi n(c/a)} \right)^2 \right\} \right]}. \quad (22)$$

Для квадратного образца ($a = b$) получаем:

$$f\left(\gamma, \frac{c}{b}\right) = \gamma^2 \frac{\left[1 + \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \cdot \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\pi \gamma n) - 1}{n \cdot \text{sh}(\pi \gamma n)} \left(\frac{\sin(\pi n(c/b))}{\pi n(c/b)} \right)^2 \right\} \right]}{\left[1 + \frac{4\gamma}{\pi} \cdot \sum_{n=2,4,\dots} \left\{ \frac{\text{ch}(\pi n/\gamma) - 1}{n \cdot \text{sh}(\pi n/\gamma)} \left(\frac{\sin(\pi n(c/b))}{\pi n(c/b)} \right)^2 \right\} \right]}. \quad (23)$$

Таким образом, отношение сопротивлений полупроводника зависит от размеров образца (безразмерных параметров a/b и c/b) и параметра анизотропии γ . При практических вычислениях для достижения вычислительной погрешности не более 1 % достаточно 100 членов ряда.

На рис. 3 представлены рассчитанные в вычислительной программе MathCad [20; 21] графические зависимости $R_{12}/R_{34} = f(\gamma, c/b)$ при различных размерах контакта для квадратного образца. Использование квадратного образца наиболее удобно, поскольку наглядно показывает отличие сопротивлений в двух различных направлениях протекания тока при аналогичных геометрических параметрах полупроводникового кристалла. В случае точечных контактов ($c/b < 0,001$) при $a = b$ можно воспользоваться рассчитанными зависимостями на рис. 4.

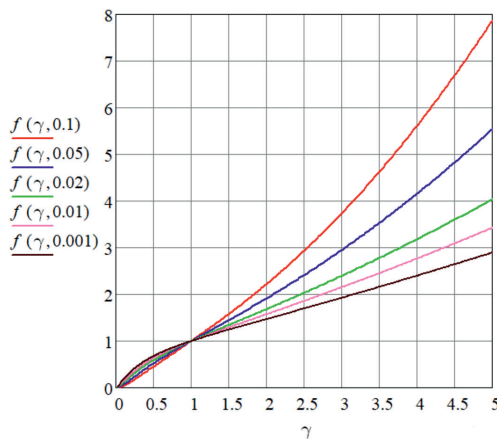


Рис. 3. Расчетная зависимость отношения сопротивлений f от параметра анизотропии γ

Fig. 3. Calculated dependence of the resistance ratio f on the anisotropy parameter γ

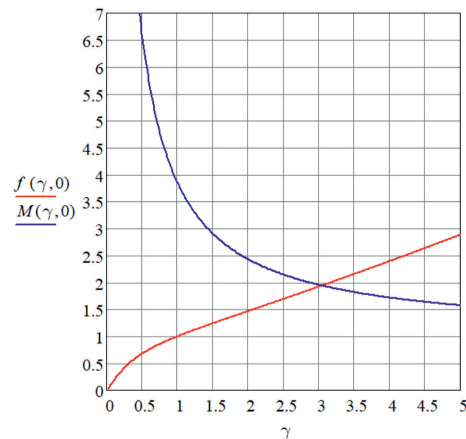


Рис. 4. Расчетная зависимость величин f и M от величины анизотропии γ для точечного контакта

Fig. 4. Calculated dependence of the parameter f and M on the value of anisotropy γ for a point contact

3. Экспериментальная установка

Принципиальная схема измерительной установки приведена на рис. 5. Образец полупроводникового кристалла закрепляется в специальном держателе с четырьмя контактами. В качестве контактов в зависимости от объекта исследования могут применяться прижимные вольфрамовые зонды или сплавные контакты. Для улучшения электрических свойств контактов необходимо провести их формовку электрическим разрядом. Однако если измерения разности потенциалов между зондами производить компенсационным методом или высокоомным вольтметром, то требования к омичности контактов не являются жесткими. При измерениях компонент тензора электропроводимости зонды 1, 2 (или 3, 4) служат для включения образца в электрическую цепь, т. е. через них пропускается ток, который измеряется цифровым учебным мультиметром (например, Ф4800, Keithley 2400 или аналог). В качестве источника тока используется источник постоянного напряжения (Б5-44 или аналогичный), величина тока регулируется магазином сопротивлений (Р-33 или аналог). Контакты 1–4 служат для подведения тока и измерений разности потенциалов, в качестве измерительного прибора для холловской разности потенциалов рекомендуется использовать высокоомный вольтметр В2-34 или аналог.

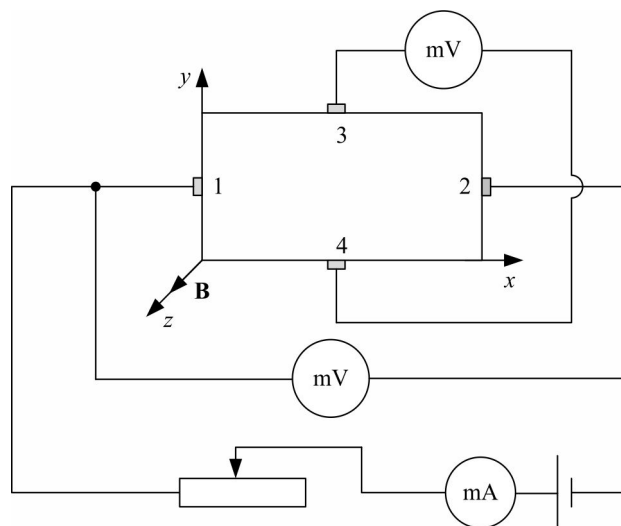


Рис. 5. Схема экспериментальной установки
Fig. 5. Scheme of the experimental setup

Для измерений ЭДС Холла необходимо замкнуть токовую цепь через контакты 1, 2, контакты 3, 4 служат для измерения холловского напряжения. Образец помещается в поперечное магнитное поле, которое создается регулируемым электромагнитом.

4. Методика выполнения работы

Размеры образца и расстояние между контактами можно определить при помощи штангенциркуля. Для образцов малых размеров эти величины необходимо определять более точно с помощью измерительного микроскопа (например, МБС-10). Так как контакты 3, 4 практически невозможно установить точно вдоль эквипотенциальной поверхности, то вольтметр будет показывать некоторое начальное напряжение U_{34}^0 и без внешнего магнитного поля (напряжение асимметрии). Для возникновения холловской ЭДС образец помещают в поперечное магнитное поле B_z (см. рис. 1), вольтметр при этом показывает значение U_{34} , ЭДС Холла ξ_{34} при этом равна:

$$\xi_{34} = U_{34} - U_{34}^0. \quad (24)$$

Заметим, что в (24) необходимо учитывать знак разности потенциалов U_{34} и U_{34}^0 на шкале вольтметра. Если знаки различны, то показания складываются.

Чтобы устранить нежелательные сопутствующие ЭДС Холла эффекты [6], измерения ξ_{34} обычно проводят при двух направлениях магнитного поля. При этом ЭДС Холла определяют следующим образом. Помещают образец в магнитное поле и отмечают показания вольтметра U_{34}^1 , затем изменяют направление магнитного поля и снова снимают показания вольтметра U_{34}^2 , ЭДС Холла соответственно равна:

$$\xi_{34} = (U_{34}^1 - U_{34}^2) / 2, \quad (25)$$

где необходимо учитывать знак разности потенциалов по шкале вольтметра.

Для определения коэффициента Холла необходимо провести несколько измерений (не менее трех) холловской ЭДС при различных значениях тока через образец (50–100 мА). Для определения параметра анизотропии проводимости σ_y/σ_x также необходимо произвести не менее трех измерений U_{12} и U_{34} при различных значениях тока.

5. Обработка результатов и оценка погрешностей измерений

1. Используя теоретический график для данных размеров образца и контактов (a/b , c/b) и измеренных значений R_{12}/R_{34} (для квадратного образца можно использовать рис. 3), определить параметр анизотропии $\gamma = \sqrt{\sigma_y/\sigma_x}$.

2. Определив γ , найти значение множителя M для данного значения a/b и размера контакта $2c$ по соотношению (20) (по рис. 2 при $a = b$). Затем по формулам (1), (2) вычислить компоненты σ_x , σ_y тензора электропроводимости. В случае если при выбранном положении контактов получаем $\gamma < 1$, оптимально провести преобразование поворота на $\pi/2$, т. е. изменить нумерацию контактов.

3. Используя полученные данные, определить по формулам (4) параметры анизотропного полупроводника: компоненты тензора холловской подвижности и концентрацию свободных носителей заряда.

4. Исходя из формулы (3), оценить инструментальную погрешность измерения коэффициента Холла R_z :

$$\frac{\Delta R_z}{R_z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \xi_{34}}{\xi_{34}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{12}}{I_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}, \quad (26)$$

где знаком Δ обозначены абсолютные погрешности соответствующих измерительных приборов. Случайную среднеквадратичную погрешность $\Delta R_z/\langle R_z \rangle$ находим из серии n измерений для заданной надежности $\alpha = 0,95$ [22].

Относительную инструментальную погрешность измерения γ можно определить как результат отдельных погрешностей измерений необходимых для ее определения величин:

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{12}}{I_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{34}}{I_{34}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{12}}{U_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{34}}{U_{34}}\right)^2}. \quad (27)$$

Случайную среднеквадратичную погрешность $\Delta \gamma/\gamma$ следует определять с точностью измерений напряжений при данном геометрическом факторе.

Экспериментальная проверка распределений поля (16) в данной работе не приводится ввиду неоднократного представления сопоставления опытных данных и используемых теоретических потенциалов [12; 14; 15].

Заключение

Представленная экспериментальная методика изучения электрических свойств анизотропных полупроводников весьма уместна не только при изучении полупроводниковых кристаллов, но может быть использована при освоении физики твердого тела или в учебно-научной практике обучающихся. Наиболее рационально изучать анизотропию кристаллов после изучения классического эффекта Холла, когда обучающиеся достаточно подготовлены по данной теме.

Однако зачастую в учебном процессе не выделяют отдельных дисциплин для физики полупроводников или твердого тела, в таком случае предлагаемая методика определения анизотропии электронных свойств проводимости может изучаться в рамках лабораторного практикума по электродинамике. В стандартном курсе электродинамики есть раздел, посвященный изучению протекания электрического тока в различных средах. При этом практическое изучение анизотропии проводимости полупроводников существенно закрепит знания о тензорном характере электрических свойств кристаллов. Представленная (учебно-научная) лабораторная работа также может быть предложена студентам при изучении раздела общей физики «Квантовая физика», поскольку ее завершающей частью является изучение физики твердого тела и наиболее важных вопросов физической электроники.

Предлагаемая методика изучения электрических свойств анизотропных полупроводников может быть предложена не только «завтрашним» специалистам в области микро- и нанoeлектроники, но и химикам или будущим педагогам по направлению «Физика».

В качестве полупроводникового кристалла, проявляющего анизотропию, удобно выбрать соединения A_2B_5 , например диарсениды кадмия и цинка ($\sigma_y / \sigma_x = 3 \div 10$, анизотропия может количественно существенно различаться в зависимости от условий роста кристалла, выбранной ориентации, температуры, легируемых примесей) [23], поскольку данные материалы хорошо поддаются механической обработке и необходимые электрические контакты к этим материалам легко изготавливаются обычной пайкой олова. Омичность паянных оловянных контактов (без высоковольтной формовки) для $CdAs_2$, $ZnAs_2$, $CdSb$ подтверждена литературными данными [12; 23], а это значительно упрощает изготовление экспериментальной установки.

Предлагаемая в работе методика изучения анизотропных полупроводников может быть использована и в научной работе, поскольку необходимые электрокинетические параметры полупроводниковых кристаллов определяются при минимальном количестве контактов малой площади, и это позволяет сохранить целостность образца для дальнейших экспериментальных исследований.

Список литературы

1. **Лучинин В.** Индустрия микро- и наносистем: От импортозамещения к технологическому суверенитету // Наноиндустрия. 2018. Т. 11, № 6. С. 450–461. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.5.450.461>
2. **Шелепин Н.** Глобализация и монополизация микроэлектроники в современных условиях // Электроника: наука, технология, бизнес. 2023. № 2 (223). С. 32–43. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.223.2.32.42>
3. **Эннс В.** Меры по развитию отечественной микроэлектроники в современных условиях // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 6 (217). С. 86–93. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.217.6.86.92>

4. **Кокин С. М.** О физическом образовании в вузах в условиях необходимости обеспечения технологического суверенитета страны // Физическое образование в вузах. 2022. Т. 28. № 4. С. 5–11. https://doi.org/10.54965/16093143_2022_28_4_5.
5. **Свистова Т. В.** Методы исследования материалов и структур электроники. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. 225 с.
6. **Рембеза С. И., Синельников Б. М., Рембеза Е. С., Каргин Г. И.** Физические методы исследования материалов твердотельной электроники. Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. 432 с.
7. **Павлов Л. П.** Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. шк., 1987. 240 с.
8. **Yang J., Li J., Zhang C., Feng Z., Shi B., Zhai W., Yan Y., Wang Y.** Excellent thermoelectric performance of BaMgSi driven by low lattice thermal conductivity: A promising thermoelectric material // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 827. P. 154342. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154342>
9. **Wang C., Zheng C., Gao G.** Bulk and Monolayer ZrS₃ as Promising Anisotropic Thermoelectric Materials: A Comparative Study // The Journal of Physical Chemistry C. 2020. Vol. 124, № 12. P. 6536–6543. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c00298>
10. **Немов С. А., Улашкевич Ю. В., Погумирский М. В., Степанова О. С.** Отражение от боковой грани кристалла PbSb₂Te₄ // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 3. С. 228–231. <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.03.49023.9308>
11. **Япрынцев М. Н., Иванов О. Н., Васильев А. Е., Жежу М. В., Попков Д. А.** Синтез, структура и анизотропия термоэлектрических свойств соединения Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3}, легированного самарием // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, № 12. С. 1156–1161. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.12.51699.16>
12. **Филиппов В. В., Бормонтов Е. Н.** Особенности распределения электрических полей в пластинах анизотропных полупроводников в поперечном магнитном поле // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, № 7. С. 878–881. <https://doi.org/10.1134/S1063782613070063>
13. **Балагуров Б. Я.** Электрофизические свойства композитов: Макроскопическая теория. М.: URSS, 2018. 752 с.
14. **Filippov V. V., Mitsuk S. V.** Modelling Magnetoresistance Effect in Limited Anisotropic Semiconductors // Chinese Physics Letters. 2017. Vol. 34, № 7. P. 077201. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/34/7/077201>
15. **Филиппов В. В., Заворотный А. А., Тигров В. П.** Измерение компонент тензора удельной электропроводности анизотропных полупроводниковых пластин модифицированным методом Ван дер Пау // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 1. С. 92–99. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01689-w>
16. **Баранский П. И., Буда И. С., Даховский И. В., Колмоец В. В.** Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1977. 270 с.
17. **Аскеров Б. М.** Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука, 1985. 320 с.
18. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2019. 656 с.
19. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. СПб.: Лань, 2003. 832 с.
20. **Черняк А. А., Черняк Ж. А.** Математические расчеты в среде Mathcad: Учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт, 2023. 163 с.
21. **Maxfield B.** Essential Mathcad for Engineering, Science and Math. 2nd ed. Academic Press, 2009. 501 p.
22. **Прошин В. И., Сидоров В. Г.** Анализ результатов измерений в экспериментальной физике. М.: URSS, 2021. 172 с.
23. **Маренкин С. Ф., Трухан В. М.** Фосфиды, арсениды цинка и кадмия. Минск: Вараскин, 2010. 224 с.

References

1. **Luchinin V.** Industry of micro- and nanosystems: From import substitution to technological sovereignty. *Nanoindustry*, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 450-461. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.11.5.450.461>
2. **Shelepin N.** Globalization and monopolization of microelectronics in modern conditions. *Electronics: Science, technology, business*, 2023, no. 2 (223), pp. 32-43. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.223.2.32.42>
3. **Enns V.** Measures for the development of domestic microelectronics in modern conditions. *Electronics: Science, technology, business*, 2022, no. 6 (217), pp. 86-93. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.217.6.86.92>
4. **Kokin S. M.** On physical education in universities in the context of the need to ensure the technological sovereignty of the country. *Physical education in universities*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 5-11. https://doi.org/10.54965/16093143_2022_28_4_5
5. **Svistova T. V.** Methods for researching materials and structures of electronics. Voronezh, Voronezh State Technical University, 2013. 225 p. (in Russ.)
6. **Rembeza S. I., Sinelnikov B. M., Rembeza E. S., Kargin G. I.** Physical methods for studying materials of solid-state electronics. Stavropol, North-Caucasian State Technical University, 2002. 432 p. (in Russ.)
7. **Pavlov L. P.** Methods for measuring the parameters of semiconductor materials. Moscow, Higher School, 1987. 240 p. (in Russ.)
8. **Yang J., Li J., Zhang C., Feng Z., Shi B., Zhai W., Yan Y., Wang Y.** Excellent thermoelectric performance of BaMgSi driven by low lattice thermal conductivity: A promising thermoelectric material. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 827, pp. 154342. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154342>
9. **Wang C., Zheng C., Gao G.** Bulk and Monolayer ZrS₃ as Promising Anisotropic Thermoelectric Materials: A Comparative Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, vol. 124, no. 12, pp. 6536–6543. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c00298>
10. **Nemov S. A., Ulashkevich Yu. V., Pogumirsky M. V., Stepanova O. S.** Reflection from the Side Face of a PbSb₂Te₄ Crystal. *Semiconductors*, 2020, vol. 54, no. 3, pp. 282–284. <https://doi.org/10.1134/S1063782620030161>
11. **Yapryntsev M. N., Ivanov O. N., Vasil'ev A. E., Zhezhu M. V. Popkov D. A.** Synthesis, structure and anisotropy of thermoelectric properties of Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} compound doped with samarium. *Semiconductors*, 2022, vol. 55, no. 14, pp. 2121. <http://dx.doi.org/10.21883/SC.2022.14.53856.16>
12. **Filippov V. V., Bormontov E. N.** Features of the electric-field distribution in anisotropic semiconductor wafers in a transverse magnetic field. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 7, pp. 884-891. <https://doi.org/10.1134/S1063782613070063>
13. **Balagurov B. Ya.** Electrophysical properties of composites: Macroscopic theory. Moscow, URSS, 2018. 752 p. (in Russ.)
14. **Filippov V. V., Mitsuk S. V.** Modelling magnetoresistance effect in limited anisotropic semiconductors. *Chinese Physics Letters*, 2017, vol. 34, no. 7, pp. 077201. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/34/7/077201>
15. **Filippov V. V., Zavorotny A. A., Tigrov V. P.** Modified Van der Pauw method of measuring the electrical conductivity tensor of anisotropic semiconductor films. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, № 1, pp. 105-113. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01689-w>
16. **Baranskij P. I., Buda I. S., Dahovsky I. V., Kolomoets V. V.** Electrical and galvanomagnetic phenomena in anisotropic semiconductors. Kiev, Naukova dumka, 1977. 270 p.
17. **Askerov B. M.** Electron Transport Phenomena in Semiconductors. World Scientific: Singapore, New Jersey, London, 1994. 412 p. <https://doi.org/10.1142/1926>

18. **Landau L. D., Lifshitz E. M.** Electrodynamics Of Continuous Media. Elsevier, New Delhi, India, 1984. 474 p.
19. **Korn G. A., Korn T. M.** Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. Dover Publications, Inc., New York, 2000. 1152 p.
20. **Chernyak A. A., Chernyak Zh. A.** Mathematical calculations in the Mathcad environment: textbook for universities. Moscow: Urayt Publishing House, 2023. 163 p. (in Russ.)
21. **Maxfield B.** Essential Mathcad for Engineering, Science, and Math. 2nd edition. Elsevier Science, Academic Press, 2009. 501 p.
22. **Proshin V. I., Sidorov V. G.** Analysis of measurement results in experimental physics. Moscow, URSS, 2021. 172 p.
23. **Marenkin S. F., Truhan V. M.** Phosphides, zinc and cadmium arsenides. Minsk, Varaskin, 2010. 224 p.

Сведения об авторах

Владимир Владимирович Филиппов, доктор физико-математических наук

Анатолий Анатольевич Заворотный, кандидат физико-математических наук

Михаил Юрьевич Смирнов, кандидат физико-математических наук

Владимир Сергеевич Зияутдинов, кандидат педагогических наук

Дмитрий Денисович Лыков, студент, лаборант

Information about the Authors

Vladimir V. Filippov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor

Anatoly A. Zavorotny, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Assistant Professor

Mikhail Yu. Smirnov, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Assistant Professor

Vladimir S. Ziyautdinov, Candidate of Science (Pedagogical), Assistant Professor

Dmitry D. Lykov, Student, Laboratory Assistant

*Статья поступила в редакцию 18.05.2023; одобрена после рецензирования 19.05.2023;
принята к публикации 21.09.2023*

*The article was submitted 18.05.2023; approved after reviewing 19.05.2023;
accepted for publication 21.09.2023*

«Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – *.doc, или *.docx, или *.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);

- в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);
- в состав электронной версии рукописи должны входить:
- файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;
- отдельные файлы с рисунками высокого качества;
- файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);
- файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, ФИО авторов (полностью), название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08

Оценка конвективного массопереноса

Иван Иванович Иванов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича

Сибирского отделения Российской академии наук

Новосибирск, Россия

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация

Ключевые слова

Благодарности

Evaluation of Convective Mass Transfer

Ivan I. Ivanov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Novosibirsk, Russian Federation

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract

Keywords

Acknowledgements

Основной текст статьи

Список литературы / References (в порядке цитирования)**Сведения об авторе / Information about the Author**

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор
Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
WoS Researcher ID
Scopus Author ID
SPIN

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (см): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Сур), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;
- распределять текст по двум или более столбцам;
- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

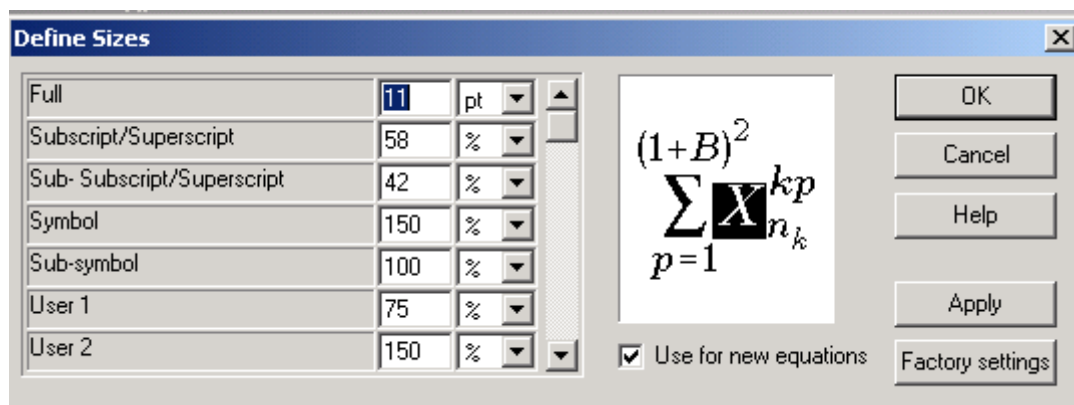
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ, и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

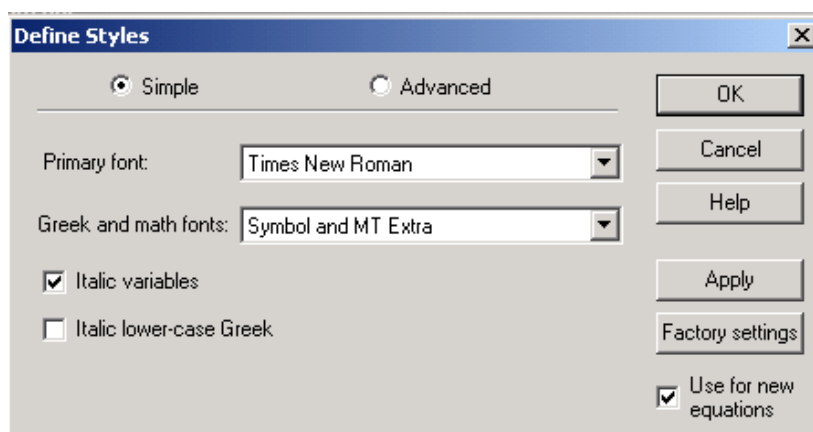
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегль 11 пт.**

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



a



б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается.

15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат А4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25
physics@vestnik.nsu.ru