

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

9·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Сентябрь, 2024

№ 9 (802)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций



Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов,
включенных в список ВАК, для публикации основных результатов
кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия
Багров В.Г., проф. (зам. гл. редактора), Томск,
Россия
Козырев А.В., проф. (зам. гл. редактора), Томск,
Россия
Пермякова Л.В. (отв. секретарь), Томск, Россия
Алексеев С.В., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Асеев А.Л., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Борисов А.В., проф., Москва, Россия
Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН, Москва, Россия
Ворожцов А.Б., проф., Томск, Россия
Войцеховский А.В., проф., Томск, Россия
Гитман Д.М., проф., São Paulo, Бразилия
Демин В.А., проф., Пермь, Россия
Джафаров Р.Г., д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан
Дитенберг И.А., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Ивонин И.В., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Казинский П.О., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Кистенев Ю.В., проф., Томск, Россия
Ковалевская Т.А., проф., Томск, Россия
Колобов Ю.Р., проф., Белгород, Россия
Коротаев А.Д., проф., Томск, Россия
Майер Г.В., проф., Томск, Россия
Манка Оронцио, проф., Неаполь, Италия
Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия
Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков
Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция
Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия
Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада
Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия
Суржиков А.П., проф., Томск, Россия
Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Тао Вен-Куан, академик Китайской академии
наук, Сиань, Китай
Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь
Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия
Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия
Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия
Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Bagrov V.G. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk,
Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor,
Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Corr. Member RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kazinski P.O., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, Italia
Mesyats G.A., Academician RAS, Moscow, Russia
Neklyudov I.M., Academician UAS, Kharkov, Ukraine
Oztop Hakan, Professor, Elazığ, Turkey
Ratakhin N.A., Academician RAS, Tomsk, Russia
Saghir Ziad, Professor, Toronto, Canada
Saranin A.A., Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia
Surzhikov A.P., Professor, Tomsk, Russia
Sukhanov D.Y., Professor, Tomsk, Russia
Tao Wen-Quan, Academician of the Chinese Academy
of Sciences, Xi'an, China
Uglov V.V., Professor, Minsk, Republic of Belarus
Ushakov V.Ya., Professor, Tomsk, Russia
Tchaikovskaya O.N., Professor, Tomsk, Russia
Cherepanov V.N., Professor, Tomsk, Russia
Chumlyakov Y.I., Professor, Tomsk, Russia
Shapovalov A.V., Professor, Tomsk, Russia
Shipilov S.E., Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>. Публикация статей в журнале – бесплатная.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Ферромагнитный нитрид галлия, легированный марганцем, в качестве материала для спинтроники	5
--	---

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Демкин В.П., Мельничук С.В., Светлик М.В., Акинина М.Д., Руденко Т.В., Алифирова В.М., Гребенюк О.В., Смаглий Л.В., Демкин О.В. Прохождение электрических сигналов через ткани вестибулярного органа при стимулировании отолитовых мембран.....	20
Ивченко В.А. Полевая ионная микроскопия интерфейсов в сплаве ЖС36-ВИ.....	31
Аникеев С.Г. Особенности создания порошкового пористо-монокристаллического материала на основе TiNi с помощью реакционно-диффузионного спекания и электронно-пучковой обработки	39
Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Саммель А.Ю., Ткачев Д.А., Жуков И.А., Ахмадеев Ю.Х., Шугуров В.В., Ажажа И.И. Влияние антифрикционных покрытий системы Al-Mg-B на высокоскоростное взаимодействие ударников из тяжелого сплава с алюминиевой преградой	48
Русин Н.М., Скоренцев А.Л. Влияние свинца на структуру и механические свойства спеченного сплава Al-40Sn	57
Турсунханова Р.Б., Сергеев В.П., Калашников М.П., Сергеев О.В., Воронов А.В., Христенко Ю.Ф., Жалнин Е.В. Влияние прозрачных пленок на основе Ta, Si, Al, N на локальные повреждения поверхности кварцевых пластин при воздействии высокоскоростного потока микрочастиц.....	66
Вовнова И.Г., Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. 3D-моделирование дефектной субструктуры в объеме металлического монокристалла при растяжении.....	75

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Гладков С.О., Зо Аунг. О выводе формулы Стокса с учетом проскальзывания.....	84
---	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Фисанов В.В. Поверхностные волны на границе плазменного метаматериала и вакуума в геометрической конфигурации Фойгта.....	90
--	----

CONTENTS**PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS**

- Khludkov S.S., Prudaev I.A., Tolbanov O.P., Ivonin I.V.** Ferromagnetic gallium nitride doped with manganese as a material for spintronics..... 5

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Demkin V.P., Melnichuk S.V., Svetlik M.V., Akinina M.D., Rudenko T.V., Alifirova V.M., Grebenuk O.V., Smaglii L.V., Demkin O.V.** Propagation of electrical signals through the tissue of the vestibular organ by stimulating otolith membranes..... 20
- Ivchenko V.A.** Field ion microscopy of interfaces in ZhS36-VI alloy 31
- Anikeev S.G.** Features of production of powder porous-monolithic material based on TiNi using reaction-diffusion sintering and electron beam treatment 39
- Ishchenko A.N., D'yachkovskii A.S., Sammel'A.Yu., Tkachev D.A., Zhukov I.A., Ahmadeev Yu.H., Shugurov V.V., Azhazha I.I.** The influence of antifriction coatings of the Al-Mg-B system on the high-speed interaction of heavy alloy strikers with an aluminum barrier 48
- Rusin N.M., Skorentsev A.L.** Effect of lead on the structure and mechanical properties of sintered Al-40Sn alloy 57
- Tursunkhanova R.B., Sergeev V.P., Kalashnikov M.P., Sergeev O.V., Voronov A.V., Khristenko Yu.F., Zhalnin E.V.** Influence of transparent films based on Ta, Si, Al, and N on local surface damage of quartz plates under the impact of high-velocity micro-particle flow 66
- Vovnova I.G., Lipatnikova Ya.D., Solov'eva Yu.V., Starenchenko V.A.** 3D modeling of defect substructure in the volume of a metal single crystal under tension..... 75

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Gladkov S.O., Zaw Aung.** On the derivation of the Stokes formula taking into account slippage..... 84

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Fisanov V.V.** Surface waves at the interface of a plasma metamaterial and vacuum in the geometrical Voigt configuration..... 90

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.382.2

DOI: 10.17223/00213411/67/9/1

**Ферромагнитный нитрид галлия, легированный марганцем,
в качестве материала для спинтроники***С.С. Хлудков¹, И.А. Прудаев¹, О.П. Толбанов¹, И.В. Ивонин¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приведен обзор литературы по магнитным свойствам GaN, легированного марганцем. В обзоре использованы данные, опубликованные преимущественно за последнее десятилетие. Представлены данные по свойствам GaN, легированного марганцем в процессе роста слоев методами молекулярно-лучевой и металлоорганической газофазной эпитаксии, в процессе ионного легирования, а также другими методами. По данным теоретических и экспериментальных исследований GaN, легированный марганцем, обладает ферромагнитными свойствами с температурой Кюри выше комнатной и является материалом, перспективным для спинтроники.

Ключевые слова: нитрид галлия, ферромагнитные свойства, примеси переходных элементов, марганец.

Введение

В настоящее время нитрид галлия (GaN), наряду с арсенидом галлия, относится к наиболее важным полупроводниковым материалам микроэлектроники. Основная область практического применения GaN – оптоэлектроника. Об этом, в частности, свидетельствует присуждение Нобелевской премии за 2014 г. за разработку высокоэффективных светоизлучающих диодов на основе нитрида галлия.

В последнее время большое внимание уделяется изучению GaN, легированного переходными элементами, как материала, перспективного для спинтроники. Это обусловлено, в частности, тем, что для получения разбавленных магнитных полупроводников (в англоязычной литературе – DMS) на основе GaN могут использоваться уже существующие технологии изготовления гетероструктур для оптоэлектронных и электронных приборов. Эти исследования развернулись после открытия эффекта ферромагнетизма, индуцированного носителями заряда в полупроводниках $A^{III}B^V$: InMnAs [1] и GaMnAs [2]. Причем вначале большее внимание привлекали материалы $A^{III}As$, позднее – $A^{III}N$.

Исследованию GaN, легированного переходными металлами, посвящено значительное число как теоретических, так и экспериментальных работ. В том числе есть ряд обзоров по ферромагнитным свойствам GaN [3–6]. Однако со времени их опубликования появилось достаточно много новых данных как экспериментальных, так и расчетного характера, требующих рассмотрения и обобщения.

В настоящем обзоре представлены материалы по получению и исследованию магнитных свойств нитрида галлия, легированного марганцем, обсуждаются перспективы использования его в качестве материала для спинтроники.

1. Ферромагнитный нитрид галлия, легированный марганцем

Среди полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$ нитрид галлия стал интенсивно исследоваться в качестве материала, перспективного для спинтроники, после выхода в 2000 г. работы [7]. Авторы работы на основании теоретических исследований предсказали существование ферромагнетизма в GaN при комнатной температуре в результате легирования нитрида галлия примесями переходных элементов. К настоящему времени наиболее изученной магнитной примесью в GaN является марганец. По числу публикаций можно считать, что нитрид галлия, легированный марганцем (GaN:Mn), достиг статуса модельной системы.

* Работа поддержана грантом в рамках Постановления Правительства Российской Федерации № 220 от 09.04.2010 (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.06.2022).

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.951

DOI: 10.17223/00213411/67/9/2

Прохождение электрических сигналов через ткани вестибулярного органа при стимулировании отолитовых мембран*В.П. Демкин¹, С.В. Мельничук¹, М.В. Светлик¹, М.Д. Акинина¹, Т.В. Руденко^{1,2},
В.М. Алифирова², О.В. Гребенюк^{1,2}, Л.В. Смаглий^{1,2,3}, О.В. Демкин¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия*³ *Северский биофизический научный центр, г. Северск, Россия*

Разработана электрофизическая модель отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы) с применением эквивалентной электрической схемы замещения. Электрофизическая модель представлена в виде совокупности проводящих и диэлектрических областей на основе анатомической структуры, определенной из МРТ/КТ-снимков. Эквивалентная электрическая схема замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного составлена на основе измеренных удельных электрофизических характеристик тканей отолитовых структур с учетом изменяющейся ионной проводимости волосковых клеток. Для определения спектральной чувствительности отолитовых органов проведен расчет электрического импеданса клеточных элементов утрикулы и саккулы и сдвига фаз протекающего тока по отношению к внешнему электрическому стимулу на основании геометрических данных и электрофизических параметров отолитовых органов лабораторного животного (крысы) в интервале частот 0–5000 Гц. Показано, что отклик волосковых клеток отолитовых мембран на внешний электрический стимул носит колебательный характер.

Ключевые слова: *вестибулярный лабиринт, вестибулярная дисфункция, отолитовая мембрана, волосковые клетки, физико-математическая модель, импеданс волосковых клеток, вестибулярный имплант.*

Введение

Вестибулярная система человека является одной из самых сложных сенсорных систем, отвечающей за генерацию и передачу в мозг информации о положении тела в пространстве и его движении. Функциональные нарушения вестибулярной системы вызывают постуральную нестабильность, осциллопсию и хроническое нарушение равновесия [1]. При двухсторонней вестибулярной дисфункции единственным методом лечения является имплантация – замена вестибулярного органа вестибулярным протезом, восстанавливающим функции отолитов и полукружных каналов. Несмотря на многолетние исследования в данной области, физиологические механизмы работы вестибулярного аппарата человека недостаточно изучены, поскольку их диагностика «*in vivo*» очень сложна. В таких случаях эффективным методом является физико-математическое моделирование и последующая проверка путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными результатами, полученными на лабораторных животных. Как показано в [2–5], прямая гальваническая стимуляция вестибулярного нерва открывает широкий спектр новых вариантов исследования центральной вестибулярной системы и дает возможность протезирования вестибулярного органа для восстановления вестибулярной функции. Однако практическим результатом этих исследований стало пока создание вестибулярного импланта, заменяющего функции только полукружных каналов, отвечающих за детектирование вращений головы [6–8].

Необходимость учета всех сенсоров движения для поддержания четкости зрения и стабильности позы вызвана тем, что полукружные каналы и отолитовые сенсорные области внутреннего уха функционируют как интегрированная система – в ответ на движения головы сигналы отолитов взаимодействуют с сигналами полукружных каналов, вызывая соответствующие ощущения, движения глаз и постуральные реакции. Таким образом, концепция вестибулярного импланта должна строиться на многоканальной стимуляции вестибулярных нервов, моделирующих стимулы от трех

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00259, <https://rscf.ru/project/23-25-00259/>.

Полевая ионная микроскопия интерфейсов в сплаве ЖС36-ВИ

В.А. Ивченко¹

¹ *Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Представлены результаты изучения атомной структуры и строения интерфейсов безуглеродистого монокристаллического сплава ЖС36-ВИ методом полевой ионной микроскопии. Установлено, что атомная структура ЖС36-ВИ в исследованном состоянии представляет собой смесь наноструктурных фаз разного типа в объеме монокристаллической сверхструктуры $L1_2$. Проведена оценка размеров таких нановыделений. Ширина границ интерфейсов в сплаве ЖС36ВИ составляет межплоскостное расстояние в соответствующих кристаллографических направлениях. Обнаружено, что в граничной области межфазных интерфейсов не наблюдается каких-либо выделений легирующих атомов. В работе поддержана модель создания материалов с единой сверхструктурой, в которую встроены наноструктурные фазы, не нарушающие ее кристаллическую решетку.

Ключевые слова: полевая ионная микроскопия, сплав ЖС36-ВИ, атомная структура, нанофазы, интерфейсы.

Введение

В настоящей работе представлены результаты исследований кристаллической структуры и строения интерфейсов безуглеродистого монокристаллического сплава ЖС36-ВИ в атомном масштабе [1]. Лопатки из такого сплава широко применяются в современных авиационных двигателях [2, 3]. В работе использовали метод полевой ионной микроскопии (ПИМ). Потенциальные возможности ПИМ позволяют непосредственно исследовать реальное строение кристаллической решетки твердых растворов на уровне отдельных атомов, работать с атомно-чистой поверхностью при криогенных температурах и в то же время анализировать объем материала в процессе контролируемого последовательного удаления поверхностных атомов электрическим полем. Применение методов атомно-зондовой томографии (Atom Probe Tomography, АРТ или 3D Atom Probe) и полевой ионной микроскопии позволяет получать уникальные результаты в различных областях физики конденсированного состояния [4–11]. В [12] представлен обзор наноструктурных особенностей суперсплавов на основе никеля, полученных методами атомно-зондовой полевой ионной микроскопии (APFIM) и атомно-зондовой томографии (АРТ). Показано, что APFIM и АРТ позволяют определять состав нанокластеров фазы γ' размером в несколько нанометров и устанавливать химический порядок внутри этих выделений. Анализ плоскостей $\{001\}$ γ' -фазы типа Ni_3Al позволяет оценить степень упорядочения, а также преимущественное расположение различных элементов (Ti, Cr, Co, W, Ta, Re, Ru и т. д.), входящих в состав суперсплавов. Было обнаружено, что границы зерен в суперсплавах Astroloy или N18 обогащены В, Мо и обеднены Сг и Аl. Исследования, проведенные с помощью методов атомных зондов ПИМ [13–16], позволили изучить сплавы типа ЖС36-ВИ (которые несколько отличались по составу) в атомном масштабе. В [13] была обнаружена высокая степень упорядочения в чередующихся плоскостях чистого Ni и смешанных Ni/Al: только 0.4% обнаруженных атомов Al располагались в плоскостях чистого Ni. Ступенчатая диаграмма показала, что бериллий равномерно распределен в матрице, причем почти весь Ве находится в плоскостях чистого Ni. Предположение о том, что бериллий преимущественно оседает в этих плоскостях, подтверждается сообщениями о сильной связи Ni–Ве, поскольку в плоскостях Ni атомы Ве могут размещаться в октаэдрических междоузлиях, окруженных только атомами Ni. Работа [14] показала, что плоскости чистого никеля в фазе γ' демонстрируют значительно более темный контраст, чем смешанные плоскости Ni/Al. Морфология выделений Ве аналогична морфологии зон ГП в γ' -фазе в сплавах с более высоким содержанием Ве на ранних стадиях старения. Отличие методов атомного зонда от метода ПИМ состоит в его эффективности. Эффективность АРТ составляет примерно 70%, тогда как ПИМ позволяет в процессе полевого испарения фиксировать практически все атомы материала.

Поэтому основные задачи настоящей работы состояли в исследовании атомной структуры сплава ЖС36-ВИ, распределении легирующих элементов по узлам кристаллической решетки и изучении атомного строения интерфейсов в структуре рабочей лопатки турбины методом полевой ионной микроскопии.

Особенности создания порошкового пористо-монокристаллического материала на основе TiNi с помощью реакционно-диффузионного спекания и электронно-пучковой обработки*

С.Г. Анисеев¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследованы структурные особенности и физико-механические свойства пористо-монокристаллического материала на основе никелида титана, полученного сочетанием реакционно-диффузионного спекания и электронно-пучковой обработки. Описаны условия подготовки монокристаллической и порошковой частей для получения качественной границы в области их соединения. Методами оптической и растровой электронной микроскопии охарактеризованы параметры порового пространства, установлен фазовый состав. Показано, что электронно-пучковая обработка химически очищенного монокристаллического материала TiNi необходима при плотности энергии 3.5 Дж/см² и 15 импульсах. Использование пористой части с соотношением экзотермической добавки [1:1] позволяет снижать температуру спекания на 150 °С, сохраняя мартенситные превращения и регулярную пористую структуру. Данные температурные режимы спекания в сочетании с электронно-пучковой обработкой позволяют получать пористо-монокристаллический материал с высокими деформационно-прочностными характеристиками и качественной границей между пористой и монокристаллическими частями, свободной от частиц вторичных фаз.

Ключевые слова: никелид титана, пористо-монокристаллический материал, структура, электро-пучковая обработка.

Введение

Сплавы на основе TiNi обладают уникальными функциональными свойствами памяти формы и сверхэластичности, позволяющими успешно применять их в медицинской практике от имплантационных конструкций до медицинского инструментария [1–5]. Высокие параметры биосовместимости сплава TiNi обусловлены оксидным слоем, который формируется на его поверхности [6]. На основе пористо-монокристаллических материалов из TiNi создают стоматологические дентальные имплантаты, эндопротезы для замещения резецированных фрагментов ребер, устранения дефектов нижней челюсти [1–4]. Вышеперечисленные устройства объединяет схожая композитная конструкция из монокристаллической пластины TiNi и окружающей ее пористой части TiNi, которую получают методами спекания или самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Монокристаллическая часть необходима для повышения деформационно-прочностных характеристик в условиях знакопеременных нагрузок, а пористая часть увеличивает параметры приживаемости имплантируемой конструкции за счет прорастания биологическими тканями. Эндопротезы нижней челюсти и дентальные имплантаты имеют массивные пористые части, напротив при создании имплантатов ребер пористая часть должна быть как можно тоньше, чтобы исключить снижения деформационного ресурса монокристаллической части. При создании эндопротезов ребер тонкая порошковая часть предназначена для увеличения удельной поверхности имплантируемой конструкции.

В случае создания эндопротезов ребер пористая часть решает серьезную проблему прорезывания кожи, которая может проявиться в отдаленные периоды функционирования эндопротеза [1]. Эту проблему обостряют несколько факторов, связанных с физиологическими особенностями работы, а также с технологическими параметрами функционирования эндопротезов ребер. Первый фактор определяется высокими деформационными нагрузками в процессе дыхательной деятельности и в результате повседневных физических нагрузок человека. Второй – сложностью создания качественного контакта на границе монокристаллической и пористой частей. Что касается технологических особенностей получения искусственных ребер, особого внимания требует граница пористой и монокристаллической частей.

Таким образом, в перспективе создания эндопротезов ребер актуальным является исследование условий подготовки монокристаллической части для качественного припекания необходимой пористой порошковой части. Совершенствование структурных параметров, характеристик шероховатости и коррозионной устойчивости монокристаллической части является актуальной задачей.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10045, <https://rscf.ru/project/19-79-10045/>.

Влияние антифрикционных покрытий системы Al–Mg–В на высокоскоростное взаимодействие ударников из тяжелого сплава с алюминиевой преградой*

А.Н. Ищенко¹, А.С. Дьячковский¹, А.Ю. Саммель¹, Д.А. Ткачев¹, И.А. Жуков¹,
Ю.Х. Ахмадеев², В.В. Шугуров², И.И. Ажажа²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Проведено исследование влияния антифрикционного покрытия системы Al–Mg–В на высокоскоростное взаимодействие ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама с алюминиевой преградой при варьируемой скорости метания. Покрытия были получены методом ионно-плазменного напыления с использованием порошковой мишени системы Al₁₂Mg₁₇–В. На серии ударников конической формы были получены покрытия толщиной 1.5 мкм. Средний коэффициент трения полученных покрытий составил 0.17 при минимальном значении 0.12, твердость (35±2) ГПа, скорость износа 4.65·10⁻⁶ мм³/(Н·м). По результатам экспериментов показано предположительное влияние покрытия системы Al–Mg–В на процесс взаимодействия таких ударников с преградами.

Ключевые слова: антифрикционные покрытия, баллистические испытания, трение, высокоскоростное взаимодействие.

Введение

Одним из путей повышения функциональных характеристик кинетических ударников, помимо разработки новых составов исходных материалов, методов изготовления и постобработки, является модификация поверхности путем создания различного рода покрытий, обладающих повышенной твердостью, износостойкостью, сниженным коэффициентом трения. В данном направлении среди известных высокотвердых антифрикционных покрытий возможно выделить покрытия на основе тройной керамической системы Al–Mg–В. В различных источниках [1–3] сообщается о сверхнизком коэффициенте трения покрытий на основе данного керамического материала при их повышенной твердости, более 30 ГПа. При этом в литературных источниках отсутствуют данные о рассмотрении подобных керамических покрытий применительно к системам, подверженным экстремальным высокоскоростным трибологическим воздействиям, к которым можно отнести условную пару трения «ударник – материал преграды» в процессе высокоскоростного взаимодействия. Высокоскоростное взаимодействие кинетических ударников с различными преградами широко исследуется в работах многих авторов [4–7]. В ходе исследований определяются параметры, влияющие на процесс взаимодействия ударника с преградой. К таким параметрам можно отнести материал, из которого изготовлены ударник и преграда, массу и скорость ударника, а также угол, при котором происходит взаимодействие. В исследованиях чаще всего используются кинетические ударники цилиндрической формы, изменению подвергается только головная часть, которая может быть плоской или заданной формы [8–11]. В данной работе представлены результаты исследования высокоскоростного взаимодействия ударников конической формы, изготовленных из тяжелого сплава на основе вольфрама, с нанесенными покрытиями системы Al–Mg–В, в сравнении с идентичными ударниками без покрытия, с целью выявления возможного вклада покрытий в параметры высокоскоростного взаимодействия с алюминиевой преградой.

1. Материалы и методы исследований

Для напыления использовалась вакуумно-дуговая система ионно-плазменного нанесения покрытий («КОМПЛЕКС», ИСЭ СО РАН). Напыление производилось в конфигурации с «горячим анодом», впервые предложенной в работе [12]. Метод заключается в использовании графитового тигля для размещения порошкового материала мишени, что позволяет, замкнув заряд на тигле, обеспечить высокотемпературный нагрев распыляемого материала. За счет этого возможна реали-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10042, <https://rscf.ru/project/22-79-41025/>. Исследования процессов высокоскоростного взаимодействия кинетических ударников с преградой выполнены при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Влияние свинца на структуру и механические свойства спеченного сплава Al–40Sn*

Н.М. Русин¹, А.Л. Скоренцев¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследованы особенности структуры и состава сплава Al–40Sn, формирующиеся при замене части олова на свинец. Установлено, что спеченный сплав имеет 3-фазную структуру, состоящую из фаз Al, α -Pb и β -Sn. Однако фазы распределены неравномерно, границы между зернами матрицы заняты в основном оловом, тогда как свинец распределяется по междоузлиям. Свинец плохо смачивает алюминий, их межфазные границы слабее, чем границы Al–Sn. Как следствие, прочность легированного свинцом спеченного сплава снижается и износостойкость ухудшается по сравнению с базовым сплавом.

Ключевые слова: спекание, антифрикционный алюминиевый сплав, структура, механические свойства.

Введение

Алюминиевые сплавы по своим физическим, химическим и механическим свойствам удовлетворяют требованиям, предъявляемым к антифрикционным материалам. Однако широкому их использованию в качестве антифрикционных материалов препятствует склонность сплавов к схватыванию со стальным контртелом при граничном и сухом трении [1, 2].

Попытки использовать покрытия в качестве промежуточного слоя, предотвращающего схватывание с алюминиевой поверхностью при трении, оказались не эффективными. Поэтому для повышения износостойкости алюминия обычно используют способы, позволяющие увеличить толщину уже существующей на нем оксидной пленки. Получаемое при этом керамическое покрытие оказывается пористым, хрупким и очень твердым, разрушающим поверхность стального контртела [3, 4].

Снизить интенсивность адгезионного изнашивания алюминиевых сплавов удалось путем введения в их состав легкоплавких металлов, из которых наиболее распространенной добавкой является олово (ГОСТ 14113-78) [5, 6]. Объяснение данному эффекту основано на предположении, что олово или другие мягкие металлы выдавливаются из алюминиевой матрицы и размазываются по поверхности трения тонким слоем, предотвращающим ее схватывание со стальным валом [7, 8]. Формирующийся смазочный слой тем качественнее, а интенсивность адгезионного изнашивания алюминиевого подшипника тем ниже, чем больше выдавится на поверхность трения металла-смазки. Также отмечается, что с ростом их концентрации давление начала интенсивного схватывания растет и, например, в случае олова достигает максимума при его концентрации $C_{Sn} = 50$ мас.% [1]. Однако ГОСТ рекомендует ограничивать содержание олова 20 мас.%. Обусловлено это тем, что указанные металлы не растворяются в твердом алюминии и при охлаждении расплава оттесняются на периферию растущих алюминиевых зерен, образуя жидкую оболочку. Плотность жидкости и алюминия существенно различаются, поэтому в течение времени кристаллизации сплава фазы расслаиваются, формируя неоднородную структуру. При больших концентрациях жидкие прослойки объединяются в непрерывную сеть, стенки ячеек которой окружают и разъединяют алюминиевые зерна и их агломераты. Данная замена прочных когезивных границ Al–Al на адгезионные границы Al–Sn существенно снижает несущую способность алюминиевой матрицы в сплавах Al–Sn.

Обеспечить сохранение несущей способности алюминиевого каркаса при большой доле олова удастся в случае использования при получении сплавов системы Al–Sn методов порошковой металлургии. В ходе спекания порошковой смеси частицы алюминия остаются твердыми и образуют прочный каркас, который сохраняется при расплавлении олова. Благодаря этому процессы расслоения отличающихся по плотности фаз существенно замедляются, и формируется однородная структура. До тех пор, пока число ближайших соседей у алюминиевых зерен остается не менее двух, такой каркас сохраняет несущую способность даже при наличии непрерывной оловянной

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (тема FWRW-2021-0006).

Влияние прозрачных пленок на основе Ta, Si, Al, N на локальные повреждения поверхности кварцевых пластин при воздействии высокоскоростного потока микрочастиц*

Р.Б. Турсунханова¹, В.П. Сергеев¹, М.П. Калашников¹, О.В. Сергеев¹,
А.В. Воронов¹, Ю.Ф. Христенко¹, Е.В. Жалнин¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследованы структура и свойства полученных методом импульсного магнетронного распыления тонких двухслойных пленок на кварцевых подложках: I – на основе Ta/AlSiN и II – на основе AlSiN/TaN. Величина светопропускания в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, определенная по спектральным кривым, имеет среднее значение, близкое 59 и 24% соответственно. Оба слоя AlSiN в покрытии I и верхний слой TaN в покрытии II формируются в наноструктурном состоянии, нижний слой AlSiN в покрытии II разделяется на два: прилегающий к подложке – аморфный, располагающийся выше него – в аморфно-кристаллическом состоянии. Покрытие II имеет более высокую адгезию к кварцевой подложке по сравнению с покрытием I. Установлено, что покрытие I на основе Ta/AlSiN имеет более высокие на 15–20% механические свойства, такие как микротвердость и коэффициент упругого восстановления, что придает стеклу более высокий защитный эффект от локальных микроповреждений поверхности (кратеров) при ударах высокоскоростных микрочастиц железного порошка.

Ключевые слова: магнетронное распыление, стекло, двухслойное защитное покрытие, высокоскоростные частицы, удары, кратеры.

Введение

На сегодняшний день создание эффективной противэрозионной защиты оптических элементов космических аппаратов (КА) является актуальной проблемой современной космонавтики. Для КА, эксплуатируемых на околоземных орбитах, главную опасность представляют высокоскоростные столкновения с осколками «космического мусора» и микрометеороидами. Техногенным «космическим мусором» считаются вышедшие из строя спутники и ступени ракет, которые распадаются на мелкие осколки в результате многочисленных столкновений при вращении вокруг Земли [1]. Так как скорость микрочастиц космической пыли и микроосколков космического мусора составляет порядка нескольких километров в секунду [2] и может достигать 50 км/с, столкновения их с поверхностью стекол иллюминаторов КА, несмотря на малые размеры, приводят к значительной эрозии поверхности из-за образования множества локальных повреждений (кратеров). Из-за ухудшения оптических характеристик внешние стекла иллюминаторов выходят из строя [3, 4], сокращая в целом ресурс работы КА. Решение данной проблемы может быть найдено с помощью нанесения защитных ударостойких покрытий, которые должны обладать, с одной стороны, высокой ударной стойкостью, с другой, достаточной прозрачностью в видимой области спектра. В [5] сообщается, что осажденные на металлической подложке с помощью несбалансированного магнетрона пленки Al–Si–N с низким содержанием Si (менее 5 ат.%) являются оптически прозрачными, высокоэластичными, демонстрируют при низкоэнергетическом напылении столбчатую микроструктуру с низким сопротивлением растрескиванию, а при высокоэнергетическом – плотную микроструктуру с повышенной стойкостью к растрескиванию. В [6] изучено влияние режимов импульсного реактивного магнетронного нанесения покрытия AlSiN на кремниевую подложку при использовании мишени $Al_{0,8}Si_{0,2}$ с точки зрения изменения структуры и механических свойств. Установлено, что при определенном соотношении в потоке реактивного газа N_2 к рабочему Ag наблюдается наноструктурное состояние покрытия с максимальным значением микротвердости. Авторы работы [7] при исследовании структуры, механических и оптических свойств нанокompозитных покрытий на основе системы Si–Al–N обнаружили, что эти покрытия, осажденные на поверхность стеклянной подложки из кварца, при испытании на ударную стойкость твердыми микрочастицами, движущимися со скоростями 5–8 км/с, демонстрируют существенное уменьшение поверхностной плотности образующихся кратеров. Подобное покрытие [8, 9] позволяет практически

* Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (тема № FWRW-2021–0003) и программы развития Томского политехнического университета.

3D-моделирование дефектной субструктуры в объеме металлического монокристалла при растяжении*

И.Г. Вовнова¹, Я.Д. Липатникова¹, Ю.В. Соловьева¹, В.А. Старенченко¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Представлены результаты 3D-моделирования распределения и накопления дислокаций и малоугловых границ в объеме металлического ГЦК-монокристалла в процессе деформации одноосным растяжением. Расчеты выполнены в математической модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела в полной трехмерной постановке. Приведены картины распределения напряжений, плотностей дислокаций и границ разориентации в плоскости центрального продольного сечения деформируемого прямоугольного образца. Получено математическое описание образования локального сужения (шейки) при растяжении образца. Проведена количественная оценка структурной неоднородности в объеме образца, связанной с процессом образования шейки разрушения.

Ключевые слова: моделирование, металлы, ГЦК-решетка, одноосное растяжение, дислокации, малоугловые границы, дислокационная кинетика, механика деформируемого твердого тела.

Введение

Изучение общих фундаментальных вопросов физики и механики пластической деформации металлов и сплавов неизменно привлекает интерес значительного количества исследователей и научных школ. Традиционно наблюдается разделение подходов к описанию и объяснению явлений пластического течения и дальнейшего разрушения, в которых преобладает рассмотрение, основанное на принципах физического материаловедения или подходов, базирующихся на описании деформируемого объекта с точки зрения законов механики твердого тела. Впервые объединение физической теории прочности и механики деформируемых сред для описания явлений пластической деформации и разрушения было выполнено в работах [1, 2].

Одноосное растяжение является одним из наиболее распространенных видов механических испытаний, применяемых как в исследовательских целях, так и для конструкторских расчетов. Образование шейки при растяжении – хорошо известное явление, приводящее к последующему разрушению, проявляется в виде локального сужения образца [3]. Экспериментально неоднократно показывалось, что в области формирования шейки деформации наблюдается существенное изменение структуры, опережающее развитие деформационной фрагментации субструктуры в областях локального сужения образца [4–7]. Однако в отношении теоретического описания структурных неоднородностей при формировании шейки разрушения существует ряд проблем. К настоящему времени в научной литературе практически отсутствуют работы, в которых было бы представлено модельное описание особенностей дефектной подсистемы, а также ее неоднородностей в объеме деформированного образца при растяжении.

В классических работах, посвященных изучению эволюции дислокационной структуры в процессе пластической деформации металлов и сплавов [8–11], было обнаружено, что в зависимости от степени деформации меняется деформационная субструктура от однородной до субструктур с малоугловыми, а затем с большеугловыми разориентациями. В моделях дислокационной кинетики [12], описывающих наблюдаемые в эксперименте субструктурные превращения, показано, что возможно перестроение систем дислокаций и точечных дефектов с последующим образованием дисклинаций [13]. Такие модели дают описание структуры, деформации и напряжения элемента деформируемой среды и являются моделями среднего поля напряжений дефектной подсистемы. Объединение моделей кинетики накопления деформационных дефектов с моделями механики деформируемого твердого тела позволяет построить синтетическую модель, с помощью которой описываются неоднородности пластического течения типа макролокализации пластической деформации, самозатачивания пробойника при взаимодействии с преградой, локализации при канальноугловом прессовании [14–16]. В настоящем исследовании решается задача получения опи-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.5.013.12

DOI: 10.17223/00213411/67/9/9

О выводе формулы Стокса с учетом проскальзывания

С.О. Гладков¹, Зо Аунг¹¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Приведено подробное вычисление силы Стокса при учете эффекта проскальзывания. Задача ставится как смешанная граничная задача математической физики с подробным анализом в разных частных случаях.

Ключевые слова: тензор скольжения, уравнение Навье – Стокса, граничные условия, сила сопротивления.

Введение

Как хорошо известно [1–3], при решении дифференциальных уравнений в частных производных необходимо задавать соответствующие граничные и начальные условия, отвечающие физическому смыслу конкретно поставленной задачи. В том случае, если речь идет о вычислении силы сопротивления шара, обтекаемого стационарным потоком вязкой несжимаемой жидкости (задача Стокса), то в области ее контакта с поверхностью шара используются так называемые условия прилипания, формально записываемые в виде равенства $\mathbf{V}|_{\Sigma_V} = 0$, где \mathbf{V} – скорость, а Σ_V – поверхность шара. В том случае, если речь идет о неоднородных структурах, то граничная задача формулируется уже совсем иначе, примером чего могут служить, например, работы [4–7] и монографии [8, 9].

Стоит также отметить, что, как это не парадоксально, при изложении задачи Стокса, когда речь идет о малых скоростях гидродинамического потока, нигде не упоминается о вполне возможном эффекте стекания жидкости под воздействием силы тяжести с поверхности шара и о вполне возможном влиянии стекания на силу сопротивления. С физической точки зрения этот эффект вполне эквивалентен решению задачи об обтекании вращающегося шара. Однако эта задача была решена в сравнительно недавней работе [10], в которой было доказано, что эффект вращения вообще не влияет на силу Стокса. С физической же точки зрения сам факт стекания, на наш взгляд, весьма любопытен для отдельного анализа.

1. Граничная задача при учете проскальзывания

При обтекании шара в приближении Стокса граничная задача, как мы чуть выше отметили, формулируется в виде условий прилипания

$$\mathbf{V}|_{\Sigma_V} = 0. \quad (1)$$

При этом возможное влияние эффекта проскальзывания в условия (1) не заложено. Элементарная теория проскальзывания впервые была предложена Д.К. Максвеллом с помощью феноменологически введенного им кинетического уравнения. Ее физическая суть вполне понятна. Действительно, если h – некоторая условная длина свободного перемещения молекулы по поверхности макроскопического тела, а ее средняя тепловая скорость есть v_T , то время проскальзывания формально можно определить как $\tau_s = \frac{h}{v_T}$. Однако остановка молекулы в конце пути проскальзывания свидетельствует о необходимости учесть силу сопротивления, роль которой обусловлена взаимодействием молекулы с поверхностью. Это может быть, например, дальнедействующее ван-дер-ваальсово взаимодействие или энергия Морзе. При этом вполне очевидно, что чем меньше размер частицы, тем меньше и время проскальзывания. Стоит в этой связи подчеркнуть, что эффект аккомодации во внимание не принимается, и формально считаем, что он равен нулю.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 537.874.6

DOI: 10.17223/00213411/67/9/10

Поверхностные волны на границе плазменного метаматериала и вакуума в геометрической конфигурации Фойгта*В.В. Фисанов^{1,2}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль плоской поверхности раздела полупространства плазменного метаматериала и вакуума, рассматриваются в геометрии Фойгта (постоянное магнитное поле приложено вдоль границы и поперек волнового распространения). Характеристики поверхностных волн сопоставляются для двух гирозлектрических сред, различающихся знаком магнитной проницаемости.

Ключевые слова: гиротропные плазменные метаматериалы, вакуум, конфигурация Фойгта, однонаправленные поверхностные волны, дисперсионное уравнение.

Начиная с основополагающей статьи Дж. Ценнека [1] и вплоть до настоящего времени, поверхностные электромагнитные волны являются неперенной темой электродинамических исследований, например, [2–5]. В случае пары контактирующих изотропных однородных сред, которые формируют плоскую границу, направляющую поверхностные волны, их диэлектрические (или магнитные) проницаемости должны иметь разные знаки. Такие условия реализуются в плазмонике (поверхностные плазмоны, поверхностные плазмонные поляритоны), а также при наличии искусственных сред – электромагнитных метаматериалов [6, 7]. Примерами плазмонных метаматериалов могут служить среды Веселаго («дважды отрицательные» среды [8, 9]), плазмоподобные материалы с искусственно созданными магнитными свойствами («мю-негативные метаматериалы»). В самой первой основополагающей работе по метаматериалам уже были упомянуты гиротропные метаматериалы [10]. Известны примеры реализации плазменных метаматериалов [11]. Под воздействием внешнего постоянного магнитного поля плазма становится гирозлектрической средой и приобретает дополнительные способности управления электромагнитными полями. Например, в так называемой конфигурации Фойгта, когда подмагничивающее поле приложено вдоль границы и поперек направления волнового движения по ней, могут существовать однонаправленные поверхностные волны, причем не только для поверхности раздела двух сред [12–15], но и для идеально проводящего экрана, который ограничивает магнитоплазменное полупространство [16, 17].

Хотя дисперсионное уравнение для поверхностных волн в этой конфигурации в принципе допускает точное решение, его получение и анализ затрудняет наличие иррациональностей в уравнении. Наиболее полное аналитическое исследование свойств поверхностных волн выполнено в работе [14] применительно к модели холодной электронной магнитоплазмы, граничащей с вакуумом. Показано, что обе однонаправленные поверхностные волны являются прямыми поперечно-магнитными волнами, но они различаются не только направлениями распространения, но и фазовыми скоростями, а также показателями ослабления и условиями существования. Были выделены характерные критические частоты, которые зависят от материального параметра плазменной среды R – отношения циклотронной и плазменной частот. Цель данной работы – изучение характеристик поверхностных волн в аналогичной постановке, но с заменой плазменной среды на плазменный метаматериал, характеризующийся отрицательной магнитной проницаемостью.

Плоская поверхность $z = 0$ является границей раздела между вакуумом ($z > 0$) и магнитоплазменным метаматериалом ($z < 0$), который находится под воздействием внешнего постоянного магнитного поля, приложенного в положительном направлении оси y . Исследуются поверхност-

* Работа выполнена при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и частично по проекту Государственного задания Минобрнауки России (проект № 0270-2021-0002).

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 9

Адрес редакции и издателя:
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
Томский государственный университет,
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

Подписано к печати 23.09.2024. Выпуск в свет 26.09.2024. Заказ № 6031.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.39. Уч.-изд. л. 12.76. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: rio.tsu@mail.ru

