

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

1·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Январь, 2025

№ 1 (806)

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

12+

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
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
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 Оронцо, 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
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
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, Italy
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

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Прохоров Е.С. Детонационное сжигание стратифицированного газового заряда, контактирующего с воздухом	5
Акулова Д.В., Шеремет М.А. Сравнительный анализ влияния доброкачественного и злокачественного новообразований на тепловое состояние ткани на основе одномерной модели Пеннеса	14

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Куксгаузен И.В., Победенная З.В., Куксгаузен Д.А. Исследование сопротивления циклическим деформациям в олиго- и монокристаллах сплавов FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo) с эффектом сверхэластичности	23
Савельева А.С., Позникова Д.А., Мамонтов Г.В. Влияние добавок CeO ₂ на физико-химические и каталитические свойства Ag/Fe ₂ O ₃ -катализаторов глубокого окисления толуола	32
Арефьев К.П., Агеев Б.Г., Батракин А.В., Бондаренко С.Л., Бордулев Ю.С., Лаптев Р.С., Савчук Д.А., Сапожникова В.А., Стучебров С.Г., Устинова И.Г., Цуй Цзян, Ломыгин А.Д. Измерения характеристик природного композита древесины методом аннигиляции позитронов на основе имитационной модели годичного кольца	40
Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С., Гришков А.А., Коваль Н.Н., Торба М.С., Картавцов Р.А. Влияние дополнительной инжекции электронов на параметры орбитронного тлеющего разряда в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР	52
Нифонтов А.С., Астафурова Е.Г. Влияние зернограничной σ -фазы на закономерности водородного охрупчивания многокомпонентного сплава CoCrFeMnNi	59

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Двужилов И.С., Двужилова Ю.В. Предельно короткие оптические импульсы в анизотропном фотонном кристалле с дефектом структуры	69
Беляев Б.А., Тюнев В.В., Шабанов Д.А. Исследование оптических резонаторов и полосно-пропускающих фильтров на структурах из чередующихся слоев кварца и серебра	76

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Юдин Н.Н., Подзвальный С.Н., Слюнько Е.С., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю., Баалбаки Х., Грибенюков А.И., Габдрахманов А.Ш., Кулеш М.М., Антипов О.Л. Ионная очистка поверхностей Ge-подложек перед ионно-лучевым напылением тонких пленок	90
---	----

CONTENTS

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Prokhorov E.S. Detonation combustion of a stratified gas charge in contact with air	5
Akulova D.V., Sheremet M.A. Comparative analysis of the effect of benign and malignant neoplasms on the thermal state of tissue based on the one-dimensional Pennes model	14

CONDENSED-STATE PHYSICS

Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V., Kuksgauzen I.V., Pobedennaya Z.V., Kuksgauzen D.A. Study of resistance to cyclic deformation in oligo- and single crystals of FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo) alloys with the superelasticity effect.....	23
Savel'eva A.S., Ponizovnaya D.A., Mamontov G.V. Influence of CeO ₂ additives on the physical-chemical and catalytic properties of Ag/Fe ₂ O ₃ catalysts for deep oxidation of toluene.....	32
Aref'ev K.P., Ageev B.G., Batranin A.V., Bondarenko S.L., Bordulev Y.S., Laptev R.S., Savchuk D.A., Sapozhnikova V.A., Stuchebrov S.G., Ustinova I.G., Cui Jian, Lomygin A.D. Measurements of the characteristics of a natural wood composite by positron annihilation based on a simulation model of the annual ring.....	40
Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S., Grishkov A.A., Koval N.N., Torba M.S., Kartavtsov R.A. Influence of additional electron injection on the parameters of wire discharge in accelerator based on non-self-sustaining HVGD.....	52
Nifontov A.S., Astafurova E.G. Influence of the grain boundary σ -phase on hydrogen embrittlement of the multicomponent CoCrFeMnNi alloy	59

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Dvuzhilov I.S., Dvuzhilova Yu.V. Few cycle optical pulses in an anisotropic photonic crystal with a structure defect	69
Belyaev B.A., Tyurnev V.V., Shabanov D.A. Investigation of optical resonators and bandpass filters on structures made of alternating layers of quartz and silver.....	76

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Kuznetsov V.S., Zinoviev M.M., Yudin N.N., Podzyvalov S.N., Slyunko E.S., Lysenko A.B., Kalsin A.Yu., Baalbaki H., Gribenyukov A.I., Gabdrakhmanov A.Sh., Kulesh M.M., Antipov O.L. Ionic cleaning of Ge substrate surfaces before ion beam spoiling of thin films	90
---	----

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 534.222.2

DOI: 10.17223/00213411/68/1/1

Детонационное сжигание стратифицированного газового заряда, контактирующего с воздухом*Е.С. Прохоров¹¹ *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Представлены расчеты параметров газодинамического течения при детонации стратифицированного реагирующего газового заряда, контактирующего с воздухом, в прямом (постоянного диаметра) стволе установки для детонационного нанесения порошковых покрытий. Выполнен сравнительный анализ численного решения для двух случаев: когда область перемешивания между реагирующим газом и воздухом бесконечно тонкая и когда она имеет конечную ширину.

Ключевые слова: газовая детонация, продукты детонации, воздух, ударная волна.

Введение

Современные установки для детонационного напыления могут работать не только при полностью заполненном взрывчатой смесью стволе, но и при некотором его недозаполнении [1, 2], когда оставшаяся часть ствола занимает инертный газ, например, воздух или азот. В этом случае после инициирования детонации стратифицированного газового заряда у закрытого конца ствола и выхода сформированной детонационной волны (ДВ) на контактную границу (взрывчатая смесь – инертный газ) по инертному газу будет распространяться ударная волна (УВ). При недозаполнении мелкодисперсные частицы, поступившие в ствол из дозатора порошка, могут некоторое время находиться в ударно-сжатом инертном газе. Остальное время перед вылетом из ствола они ускоряются потоком продуктов детонации. При математическом описании таких газодинамических процессов обычно пренебрегают возможным перемешиванием взрывчатого (химически реагирующего) и инертного газов [3, 4], т.е. полагают, что на контактной границе (КГ) между этими газами происходит резкое изменение концентрации химических веществ и, следовательно, термодинамических свойств газообразной среды. В связи с этим при преломлении детонации на КГ начальные параметры нестационарной УВ определяют из решения задачи о распаде произвольного разрыва [5, 6] между продуктами детонации и невозмущенным инертным газом.

Однако в реальных условиях при проточной подаче заряда взрывчатой смеси в ствол такая математическая постановка задачи не совсем корректна. По оценкам, полученным на основе анализа экспериментальных данных: по точности определения объема стратифицированного заряда перед выстрелом, скорости детонационного фронта и следовым отпечаткам ячеистой структуры детонации [2, 7–9], протяженность зоны перемешивания для двух контактирующих газов может достигать пяти калибров ствола.

Это означает, что в области перемешивания имеется градиент концентрации химических веществ, и процесс трансформации ДВ в УВ не может быть мгновенным. Поэтому для его описания предлагается воспользоваться предложенным в работе [10] унифицированным подходом к моделированию равновесных течений детонирующих газов. Он сформулирован на основе развитой приближенной модели равновесия, которая позволяет получать численные решения при детонации газовых смесей с различными соотношениями между углеводородным топливом и окислителем. В приближенной модели, по сравнению с точными (более детальными) моделями используются дополнительные физические предположения, позволяющие не только расширить область ее применения, но и существенно упростить вид системы решаемых уравнений. Показано, что для адекватных (согласованных с экспериментом) расчетов газодинамики детонационных течений

* Работа выполнена в рамках государственного задания Институту гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (номер госрегистрации 121121600293-2).

Сравнительный анализ влияния доброкачественного и злокачественного новообразований на тепловое состояние ткани на основе одномерной модели Пеннеса

Д.В. Акулова¹, М.А. Шеремет¹

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

Проведен сравнительный анализ воздействия доброкачественных и злокачественных опухолей на тепловое состояние биологической ткани с использованием биотеплового уравнения Пеннеса. Молочная железа была выбрана в качестве модели многослойной биологической системы. Результаты исследования явно показывают, что злокачественные опухоли существенно изменяют поверхностную и внутреннюю температуру ткани по сравнению с их доброкачественными аналогами.

Ключевые слова: модель Пеннеса, одномерный подход, многослойная биологическая структура, математическое моделирование.

Введение

В современной медицине одним из ключевых направлений исследований является изучение влияния новообразований на организм человека [1]. Особое значение в этой области имеет понимание различий между доброкачественными и злокачественными опухолями, а также их воздействие на биологические ткани. Для анализа этого влияния используется исследование теплового состояния тканей с применением модели Пеннеса [2].

Доброкачественные и злокачественные новообразования представляют собой серьезную медицинскую проблему, так как оказывают разное воздействие на организм человека [3, 4]. Доброкачественные опухоли, в отличие от злокачественных, обычно растут медленно и ограничиваются определенной областью, не прорастая в окружающие ткани. Тем не менее они могут влиять на соседние структуры, что в конечном итоге изменяет тепловое состояние окружающих тканей [5, 6].

Злокачественные новообразования, напротив, часто характеризуются быстрым и неограниченным ростом, инвазивно распространяясь по окружающим тканям и оказывая деструктивное воздействие [7–9]. Эти процессы значительно изменяют тепловое состояние тканей и оказывают негативное влияние на организм в целом [10].

Для выявления новообразований в молочной железе используются различные методы визуализации, такие как маммография, магнитно-резонансная томография и ультразвуковое исследование. Известно, что клетки новообразований отличаются по кровотоку и метаболизму от здоровых клеток. Эти изменения, вызванные наличием новообразования, влияют на окружающие ткани и приводят к изменениям температуры на поверхности молочной железы.

Инфракрасная термография является неинвазивным методом, позволяющим визуализировать тепловые характеристики тел и систем с помощью инфракрасных приборов. В отличие от других методов, инфракрасная термография не способна точно определить местоположение опухолей. Однако включение термографических данных в комплексные исследования значительно повышает вероятность ранней диагностики заболевания [11–14].

Модель Пеннеса, основанная на математических принципах описания процесса теплообмена, позволяет анализировать тепловое состояние тканей при наличии новообразований. Эта модель учитывает теплопроводность и теплоотдачу в тканях, что позволяет оценить их тепловое поведение в различных условиях, включая присутствие различных новообразований.

В данной статье проводится сравнительный анализ влияния доброкачественных и злокачественных опухолей на тепловое состояние тканей с применением модели Пеннеса. На основании современных исследований рассмотрено, как два типа опухолей влияют на тепловые характеристики тканей.

Математическая модель

Для исследования влияния доброкачественных и злокачественных опухолей на температуру кожного покрова выбрана одномерная модель биологической ткани, представленная на рис. 1.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.371: 548.55

DOI: 10.17223/00213411/68/1/3

**Исследование сопротивления циклическим деформациям
в олиго- и монокристаллах сплавов FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo)
с эффектом сверхэластичности***Ю.И. Чумляков¹, И.В. Киреева¹, И.В. Куксгаузен¹, З.В. Победенная¹, Д.А. Куксгаузен¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На олиго- и монокристаллах сплавов FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo) с эффектом сверхэластичности впервые исследовано сопротивление циклическим деформациям при сжатии в зависимости от химического состава, температуры испытания и размера d частиц β -фазы. Показано, что при температуре 298 К олигокристаллы сплава FeMnNiAlTi характеризуются низким сопротивлением циклическим нагрузкам, связанным с влиянием границ зерен на стабилизацию мартенсита. Монокристаллы сплава FeMnNiAlC, ориентированные для сжатия вдоль направления [001], в закаленном состоянии при температуре испытания 298 и 373 К имеют высокое сопротивление циклическим деформациям при циклировании до 30 циклов «нагрузка – разгрузка». Монокристаллы сплава FeMnNiAlCr с осью сжатия [001], состаренные при 473 К в течение 3 ч, характеризуются низким сопротивлением циклическим нагрузкам при 298 и 473 К. В монокристаллах [001] сплава FeMnNiAlCr, дополнительно легированных Mo и состаренных при 473 К в течение 3 ч, сопротивление циклическим деформациям зависит от температуры испытания и возрастает с увеличением температуры от 297 до 573 К.

Ключевые слова: олиго- и монокристаллы FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo), ОЦК–ГЦК-мартенситное превращение, сверхэластичность, циклическая деформация, сжатие.

Введение

Термоупругие мартенситные превращения (МП) определяют уникальные свойства сплавов – эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ), которые наблюдаются при различных МП: B2–B19', ГЦК–ОЦТ, ГЦК–ГПУ, ОЦК–ГЦК [1–20]. В последнее время сплавы на основе железа привлекают внимание исследователей благодаря своим уникальным свойствам. Во-первых, эти сплавы по прочностным и функциональным свойствам не уступают широко исследованным сплавам TiNi, которые используются в медицине и технике [1]. Во-вторых, эти сплавы имеют неупорядоченную структуру и по пластическим характеристикам превосходят упорядоченные сплавы TiNi. В-третьих, сплавы на основе железа FeNiCoAlX (X = Ti, Ta, Nb), FeMnSi состоят из достаточно дешевых компонентов и могут использоваться, в отличие от сплавов TiNi, как массивные элементы демпферов и для соединений труб [2]. Наконец, в-четвертых, недавно разработанные сплавы на основе железа FeMnNiAlX (X = C, Cr, Ti, Mo) характеризуются уникальными функциональными свойствами. В этих сплавах наблюдается аномально высокий интервал СЭ от 10 до 573 К и близкая к нулю или даже отрицательная зависимость напряжений от температуры для начала МП $\sigma_{Ms}(T)$ [3–10, 14].

Обычно напряжения σ_{Ms} растут с увеличением температуры согласно соотношению Клапейрона – Клаузиуса [1]:

$$\frac{d\sigma_{Ms}(T)}{dT} = -\frac{\Delta H}{T_0 \varepsilon_0} = \frac{\Delta S}{\varepsilon_0} = \alpha. \quad (1)$$

Здесь ΔH , ΔS – изменение энтальпии и энтропии превращения на единицу объема соответственно; T_0 – температура химического равновесия фаз; ε_0 – деформация решетки при превращении. В большинстве сплавов с термоупругими МП величина α изменяется от 3 до 18 МПа/К и имеет положительное значение [1]. Следовательно, ΔS оказывается отрицательной величиной. В сплавах FeMnNiAlX (X = C, Cr, Ti, Mo) α имеет близкие к нулю или отрицательные значения, что связано с влиянием на ОЦК–ГЦК МП в этих сплавах магнитных переходов в мартенсите и в высокотемпе-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00017.

Влияние добавок CeO_2 на физико-химические и каталитические свойства $\text{Ag}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ -катализаторов глубокого окисления толуола*

А.С. Савельева¹, Д.А. Понизовная¹, Г.В. Мамонтов¹

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

Рассмотрено влияние добавок CeO_2 на физико-химические и каталитические свойства $\text{Ag}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ -катализаторов глубокого окисления толуола. Установлено, что введение добавки CeO_2 в состав носителя способствует увеличению дисперсности оксидов, а также реакционной способности поверхности $1\text{Ce}6\text{Fe}$ образца. Установлен синергетический эффект каталитического действия в реакции глубокого окисления толуола для образца $\text{Ag}/1\text{Ce}6\text{Fe}$, заключающийся в повышении реакционной способности за счет взаимодействия дисперсных оксидов CeO_2 и Fe_2O_3 и нанесенного серебра.

Ключевые слова: серебро, оксид церия, оксид железа, окисление толуола, синергетический эффект.

Введение

Толуол относится к летучим органическим соединениям (ЛОС) и выделяется в атмосферу в составе промышленных выбросов полимерных и лакокрасочных производств. Толуол является опасным загрязнителем, негативно влияющим на состояние окружающей среды и здоровье человека, поэтому контроль над количеством выбросов и уменьшение концентрации толуола является важной задачей для многих производств. В настоящее время применяются различные технологии очистки газовых выбросов от ЛОС: адсорбция, абсорбция, биоразложение и каталитическое окисление [1]. Каталитическое глубокое окисление толуола до CO_2 и воды считается наиболее экономичным и эффективным методом разложения ЛОС при относительно низких температурах. Наиболее эффективными катализаторами в окислении ЛОС являются благородные металлы, такие как Pt, Pd [2, 3], нанесенные на различные носители. Однако их высокая стоимость ограничивает практическое применение и побуждает разрабатывать альтернативные катализаторы.

Перспективными по сравнению с дорогостоящими Pt- и Pd-катализаторами являются катализаторы на основе переходных металлов, уже используемые в промышленности Cu-содержащие катализаторы [4], а также Ag-содержащие катализаторы, проявляющие высокую активность в реакциях окисления ЛОС, что подтверждается ростом интереса к дизайну нанесенных Ag-катализаторов [5], управлению взаимодействием металл – носитель [6], получению биметаллических Ag-содержащих катализаторов [7]. Для Ag-катализаторов в качестве носителей обычно используются как «инертные» носители, такие как SiO_2 и Al_2O_3 , так и оксиды переходных металлов, к которым относятся MnO_x , CeO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_3 и др. [8–10]. Среди оксидных носителей CeO_2 считается одним из наиболее активных благодаря своим уникальным окислительно-восстановительным свойствам, высокой кислородной емкости и сильному взаимодействию с нанесенными металлами [11]. Перспективным является комбинирование оксидов церия и с другими оксидами для увеличения общей кислородной емкости, дисперсности частиц, их реакционной способности, кооперации с окислительными центрами нанесенного серебра или других благородных металлов, что в совокупности определяет увеличение активности в реакциях глубокого окисления [12, 13]. Выбор оксидов железа в качестве компонента носителя обусловлен собственной активностью в процессах глубокого и селективного окисления, высокой доступностью, а также возможностью стабилизации нанесенных благородных металлов в высокодисперсном состоянии, включая стабилизацию одноатомных (single-atom) центров [14].

Цель работы – установление влияния добавок CeO_2 на физико-химические свойства Fe_2O_3 , а также установление эффекта Ag, нанесенного на оксидные CeO_2 – Fe_2O_3 -носители, в реакции глубокого окисления толуола.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-73-10152.

Измерения характеристик природного композита древесины методом аннигиляции позитронов на основе имитационной модели годичного кольца*

К.П. Арефьев¹, Б.Г. Агеев², А.В. Батрагин¹, С.Л. Бондаренко³,
Ю.С. Бордулев¹, Р.С. Лаптев¹, Д.А. Савчук³, В.А. Сапожникова²,
С.Г. Стучебров¹, И.Г. Устинова¹, Цуй Цзян¹, А.Д. Ломыгин¹

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

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

Рассматривается простейшая аддитивно-агрегатная модель, согласно которой в дендрохронологическом сигнале хвойных деревьев суммируются сигналы от трех основных агрегатных компонент – древесного вещества, воды и углекислого газа. Представлена интерпретация результатов измерений с использованием позитронной аннигиляционной спектроскопии, а также их сравнение с измерениями, полученными другими методами. Показаны новые возможности для изучения процессов, происходящих в деревьях и экосистеме.

Ключевые слова: позитронная аннигиляционная спектроскопия, углекислый газ, имитационная модель, дендрохронологический сигнал, древесное вещество.

Введение

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) – метод исследования структуры и свойств материалов путем изучения аннигиляционных характеристик позитронов с электронами вещества [1]. Измерения при помощи ПАС позволяют оценить свойства структуры древесины и ее дефекты, концентрацию различных элементов, плотность, могут быть экспертами состояния и перспектив дальнейшего роста.

Для интерпретации результатов измерений ПАС необходима имитационная модель, которая бы предварительно указывала на элементный состав древесного композита. Это модель годичного кольца, нарастающего каждый год древесного слоя ствола дерева. Модель учитывает взаимодействие между этими компонентами и их влияние на макро- и микромеханические свойства древесины, такие как механическая прочность, упругость, деформируемость и т.д. Учет структуры и соотношений компонент, а также их межфазных взаимодействий важен для объяснения и моделирования свойств древесины и устойчивости растущего дерева.

В модели также должны быть учтены особенности древесины, связанные с ее пористой структурой. Пористость древесины влияет на ее массу, плотность, теплопроводность и другие свойства. Кроме того, при моделировании природного композита древесины следует учитывать воздействие окружающей среды, включая влажность и температуру, а также внешние факторы, такие как механические нагрузки и воздействие вредителей.

В работе представлена простейшая аддитивная модель, предполагающая, что дендрохронологический сигнал является результатом суммирования сигналов трех основных компонент разной природы: древесного вещества, воды и углекислого газа. Такое разложение дендрохронологического отклика помогает лучше понять связь структуры годичного кольца с изменениями окружающей среды [2, 3].

В современных исследованиях при анализе растущего в естественных условиях дерева практически не используются свойства древесины как природного полимера и композита. Однако информация о структуре годичных колец и декомпозиция на отдельные элементы, ответственные за прирост, влажность и прочность, может оказаться более информативной, чем декомпозиция дендрохронологического сигнала (ДС) на климатические компоненты различной природы [4].

Измерения годичных колец методами ПАС и оптико-акустической спектроскопии позволяют выделить в серии измерений концентрацию углекислого газа и воды. Рентгенографический метод при помощи специальных алгоритмов позволяет визуализировать структуру древесины, а совре-

* Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Влияние дополнительной инжекции электронов на параметры орбитронного тлеющего разряда в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР*

С.Ю. Дорошкевич¹, М.С. Воробьев¹, А.А. Гришков¹,
Н.Н. Коваль¹, М.С. Торба¹, Р.А. Картавцов¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты экспериментов по использованию дополнительной инжекции электронов для генерации орбитронного тлеющего разряда с полым катодом площадью $\approx 20000 \text{ см}^2$, являющегося вспомогательным в ускорителе электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда. В роли дополнительного источника электронов использовался термокатод прямого накала из вольфрамовой проволоки диаметром 0.35 мм и длиной 2 см. Дополнительная инжекция электронов позволила снизить напряжение горения орбитронного разряда в гелии на величину до 300 В при амплитуде тока разряда до 400 мА, что может быть использовано для достижения оптимального значения прикатодного падения потенциала орбитронного разряда, определяющего ионно-электронную оптическую систему ускорителя. Получены зависимости напряжения горения орбитронного разряда от давления рабочего газа для различных схем подключения термокатада.

Ключевые слова: орбитронный разряд, разряд с полым катодом, дополнительная инжекция электронов, термокатод, ускоритель электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда.

Введение

Ускорители электронов с энергией в несколько сотен кэВ позволяют выводить электронный пучок в атмосферу через тонкую металлическую фольгу и используются для решения многих технологических задач: модификация полимеров [1, 2], инициирование плазмохимических процессов [3], накачка газовых лазеров [4, 5], радиационная обработка посевного материала [6] и др. В данном классе ускорителей для генерации электронного пучка используются разные типы эмиссии (термоэлектронная, взрывная, эмиссия из плазмы), в том числе и ионно-электронная. Ускорители на основе ионно-электронной эмиссии, также известные как ускорители на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [7, 8], обладают рядом преимуществ: относительная простота конструкции, большой срок службы высоковольтного катода, возможность управления током пучка без изменения ускоряющего напряжения, умеренные требования к насосной группе и др. Для реализации несамостоятельного режима ВТР используется вспомогательный разряд, играющий роль плазменного эмиттера ионов, которые ускорившись в области горения ВТР бомбардируют поверхность высоковольтного катода и выбивают вторичные электроны. Вторичные электроны ускоряются в электрическом поле ускоряющего зазора, проходят плазму вспомогательного разряда и выводятся в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Несмотря на ряд перечисленных достоинств, ускорители с несамостоятельным ВТР имеют узкий диапазон режимов работы для стабильной и эффективной генерации электронного пучка, что обуславливается формируемой ионно-электронной оптической системой и электрической прочностью ускоряющего промежутка. Расширение рабочего диапазона параметров генерации электронного пучка в таком типе ускорителей, а также оптимизация режимов горения вспомогательного разряда являются актуальными задачами, требующими проведения дополнительных исследований.

Методы и материалы

На рис. 1 представлена схема конструкции используемого ускорителя электронов, более подробное описание которого представлено в работе [9]. Для генерации плазменного эмиттера ионов в ускорителях электронов на основе несамостоятельного ВТР часто используют самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом и тонкопроволочным анодом, называемый в литературе «орбитронным разрядом» [7] или «wire discharge» [10]. Многочисленные осцилляции электронов вокруг

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00998).

Влияние зернограницной σ -фазы на закономерности водородного охрупчивания многокомпонентного сплава CoCrFeMnNi *

А.С. Нифонтов¹, Е.Г. Астафурова¹

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

Установлено влияние электролитического наводороживания на механические свойства и механизм разрушения многокомпонентного сплава Кантора CoCrFeMnNi с разной микроструктурой. Показано, что формирование частиц зернограницной σ -фазы и, как следствие, создание дополнительных границ раздела «частица/матрица» способствуют повышению устойчивости сплава Кантора к водородному охрупчиванию с точки зрения макромеханического поведения. Выявлены основные факторы, определяющие толщину хрупких поверхностных зон, формирующихся при наводороживании и последующем одноосном растяжении наводороженных образцов, а также установлены микромеханизмы их разрушения. Показано, что формирование частиц зернограницной σ -фазы повышает диффузионный транспорт водорода вдоль границ раздела во время пластической деформации, обеспечивая формирование вторичных трещин в центральной части образца, при этом дислокационный транспорт водорода в гетерофазных образцах оказывается подавленным.

Ключевые слова: водород, водородное охрупчивание, высокоэнтропийный сплав, сплав Кантора, электролитическое наводороживание.

Введение

Негативному влиянию водорода (водородному охрупчиванию (ВО)) подвержены конструкционные металлические материалы, используемые в различных отраслях промышленности: энергетике, авиации и транспорте [1, 2]. Данный эффект сдерживает развитие относительно нового, но активно развивающегося направления – водородной энергетики. В этой отрасли существует потребность в решении вопросов создания инфраструктуры для безопасного хранения и транспортировки водорода. Поэтому поиск новых материалов конструкционного и функционального назначения, которые могут быть использованы при эксплуатации в водородосодержащих средах, остается важной задачей для материаловедения и физики твердого тела. В качестве материалов для создания контейнеров и/или ответственных узлов конструкций в водородной энергетике используются наиболее устойчивые к ВО аустенитные нержавеющие стали (АНС) [3, 4]. При этом Джао Ю. с соавт. [5, 6] показали, что разработанные в 2004 г. высокоэнтропийные многокомпонентные сплавы (ВЭС) с ГЦК (ГЦК – гранецентрированная кубическая), кристаллической решеткой в ряде случаев демонстрируют большую устойчивость к ВО, чем АНС. То есть такие сплавы можно рассматривать как перспективные для использования в водородосодержащих средах. В частности, наиболее популярный среди ВЭСов сплав Кантора (CoCrFeMnNi), помимо устойчивости к ВО, обладает высокими коррозионными свойствами, превосходной пластичностью при комнатной и криогенных температурах [7, 8].

Существующие к настоящему времени работы о водородно-индуцируемых эффектах в сплаве Кантора показывают, что его поведение в водородосодержащих средах во многом похоже на поведение АНС, но имеются различия. Так же как и для традиционных сплавов, для понимания эффектов водородной хрупкости прежде всего необходимо получить данные о растворимости водорода в кристаллической решетке и структуре новых сплавов, путях его диффузии, о влиянии на механические характеристики и механизмы охрупчивания. Однако для сплава Кантора пока еще нет полного понимания данных процессов и механизмов [4, 9, 10]. Но сейчас уже понятно, что особенности ВО многокомпонентных систем вызваны сильным искажением кристаллической структуры и механизмами деформации (дислокационное скольжение и двойникование) [10].

Известно, что микроструктура является одним из ключевых параметров, который оказывает влияние на склонность материала к ВО. Одним из используемых методов повышения устойчивости к индуцированному водородом хрупкому разрушению в традиционных сплавах является измельчение зеренной структуры, он основан на формировании высокой плотности границ зерен –

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261/>.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.3

DOI: 10.17223/00213411/68/1/8

**Предельно короткие оптические импульсы
в анизотропном фотонном кристалле с дефектом структуры**И.С. Двужиллов¹, Ю.В. Двужилова¹¹ *Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Россия*

Проведено теоретическое исследование и численное моделирование взаимодействия трехмерного предельно короткого оптического импульса со средой оптически-анизотропного фотонного кристалла, имеющего дефект структуры, построенного на основе полупроводниковых углеродных нанотрубок. Показана временная эволюция x - и y -компонент напряженности электрического поля импульса в такой среде на временах до 15 пс. Установлены зависимости формы импульса и его групповой скорости от параметров модуляции показателя преломления фотонного кристалла. Продемонстрирована стабилизация формы импульса после преодоления им дефекта структуры фотонного кристалла.

Ключевые слова: предельно короткие оптические импульсы, фотонный кристалл, углеродные нанотрубки, оптическая анизотропия.

*Работа посвящена замечательному наставнику и другу,
профессору, д.ф.-м.н. Михаилу Борисовичу Белоненко.
Светлая память!*

Введение

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с различными веществами является одной из приоритетных задач современной фотоники. В качестве электромагнитного излучения в данной работе подразумеваются предельно короткие оптические импульсы (ПКОИ), которые представляют собой узкие во времени импульсы с высокой интенсивностью поля [1], обладающие дисперсионными эффектами. Такие импульсы могут иметь различные профили и устойчиво распространяться в нелинейных средах [2–5]. Сверхбыстро меняющееся электрическое поле видимого света позволяет манипулировать и отслеживать движение электронов в атомном масштабе. Инструменты и методы для управления и отслеживания электронного движения в атомах, молекулах и наноструктурах теперь становятся доступными благодаря развитию оптики предельно коротких импульсов [6]. Особенно стоит отметить актуальность задач взаимодействия солитоноподобных импульсов в периодических средах [7]. В частности, большой интерес представляют задачи о распространении предельно коротких импульсов в нелинейных средах, содержащих углеродные нанотрубки (УНТ) [8, 9]. Там выявлены параметры среды, которые позволяют контролировать характеристики импульса и обеспечивают его локализованное распространение. Стоит отметить, что периодические массивы углеродных нанотрубок были получены в 1998 г., на точках Ni , методом самосогласованной сборки или химического осаждения из газовой фазы [10, 11].

Использование УНТ для построения периодических структур имеет большой потенциал в области нелинейной оптики и фотоники, поскольку такие объекты обладают рядом уникальных свойств в оптическом диапазоне, о чем свидетельствуют их спектры поглощения, фотолюминесценции, комбинационного рассеяния и т.д. [12, 13]. Таким образом, построение фотонных кристаллов [14, 15], представляющих собой сверхрешетку, с периодическим показателем преломления, на основе УНТ является весьма актуальной сферой науки.

Ранее был описан учет оптически-анизотропных свойств среды при временной эволюции в ней ПКОИ [16], в том числе фотонный кристалл на основе УНТ [17, 18]. Так было установлено, что распространение импульса в такой среде является устойчивым. Другой результат показал, что угол между вектор-потенциалом электрического поля импульса и осью УНТ оказывает влияние на форму импульса, энергия которого перекачивается на передний фронт, и, как следствие, импульс сужается. В работах [19, 20] показано распространение малоцикловых и квазимонохроматических

Исследование оптических резонаторов и полосно-пропускающих фильтров на структурах из чередующихся слоев кварца и серебра*

Б.А. Беляев^{1,2,3}, В.В. Тюрнев³, Д.А. Шабанов³

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Россия

Исследованы характеристики планарного оптического резонатора из кварцевого стекла, окруженного серебряными зеркалами, при изменении их толщины. Измерены амплитудно-частотные характеристики полосно-пропускающих фильтров на планарных структурах, полученных вакуумным напылением на подложки из кварцевого стекла (SiO_2) трех слоев также из кварца, являющихся полуволновыми резонаторами, разделенными друг от друга, от подложки и от свободного пространства четырьмя слоями из серебра (Ag). Толщины слоев Ag и SiO_2 определялись по заданным параметрам полосы пропускания фильтров синтезом одномерных моделей с использованием электродинамического анализа. При этом учитывались экспериментальные частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости серебра. Измеренные амплитудно-частотные характеристики изготовленных опытных образцов фильтров красного, зеленого и фиолетового цветов хорошо согласуются с характеристиками, полученными при синтезе. Проведены систематические исследования фильтров с центральной частотой полосы пропускания 300 ТГц (длина волны 1 мкм) и относительной ее шириной 2–20%, содержащих от 3 до 6 резонаторов. Высокие характеристики разработанных фильтров показывают перспективность их использования в оптических устройствах.

Ключевые слова: слоистая металлодиэлектрическая структура, полосно-пропускающий фильтр, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость.

Введение

Оптические фильтры конструируют, как правило, на слоистых диэлектрических структурах, в которых полуволновые резонаторы разделены многослойными зеркалами из чередующихся четвертьволновых слоев с высоким и низким показателем преломления [1–5]. Зеркала создают оптимальную связь резонаторов друг с другом под заданную ширину полосы пропускания фильтра, а зеркала крайних резонаторов создают оптимальную связь еще и с портами фильтра на его входе и выходе, например, со свободным пространством [6–9], обеспечивая тем самым требуемый уровень неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания. Отражательная способность зеркал растет как с увеличением контраста показателей преломления смежных слоев, так и с увеличением их числа [10–12]. Известно, что при определенных ширинах полосы пропускания фильтра в его зеркалах на четвертьволновых слоях бывает невозможно использовать необходимые величины показателей преломления из-за отсутствия таковых у реальных материалов. Эта проблема решается, если слои в зеркалах сделать немного отличными от четверти длины волны. В этом случае максимальное затухание в высокочастотной полосе заграждения немного увеличивается, а в низкочастотной – уменьшается. Методики синтеза таких конструкций, состоящих всего лишь из трех и даже из двух материалов, позволяющих создавать фильтры с равномерными характеристиками в полосе пропускания, описаны в [13] и [14] соответственно.

Отметим, что в [15] показана возможность создания полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на слоистых структурах из композитных материалов, в которых наночастицы серебра находятся в диэлектрической матрице из полистирола. Установлено, что с ростом объемной концентрации частиц в композите до ~33% действительная компонента его относительной диэлектрической проницаемости плавно увеличивается с 2.6 до ~10³. При этом вплоть до частоты 1 ТГц тангенс угла диэлектрических потерь не превышает 10⁻², что дает возможность создавать устройства с малыми потерями в полосе пропускания. Настройка таких фильтров осуществляется подбором кон-

* Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания Института физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.375.826

DOI: 10.17223/00213411/68/1/10

**Ионная очистка поверхностей Ge-подложек
перед ионно-лучевым напылением тонких пленок***

В.С. Кузнецов^{1,2}, М.М. Зиновьев^{1,2}, Н.Н. Юдин^{1,2}, С.Н. Подзывалов^{1,2},
Е.С. Слюнько^{1,2}, А.Б. Лысенко^{1,2}, А.Ю. Кальсин^{1,2}, Х. Баалбаки^{1,2},
А.И. Грибенюков^{1,2}, А.Ш. Габдрахманов^{1,2}, М.М. Кулеш¹, О.Л. Антипов³

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

² ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

На базе вакуумно-напылительной установки Аспира-200 определены оптимальные параметры ионной очистки для обработки поверхности полупроводниковых материалов на примере монокристалла Ge. Определены характерные размеры кратеров пробоев на полупроводниковой поверхности при недостаточной (0.8–1.8 мкм) и избыточной (12–25 мкм) компенсации заряда от источника ионной очистки. Из вольт-амперных характеристик найден коэффициент компенсации, при котором не наблюдается пробоев на поверхности монокристалла Ge. Установлено, что при оптимальных параметрах нагрев подложки не влияет на результат ионной очистки.

Ключевые слова: ионная очистка, полупроводниковые материалы, система вакуумного осаждения.

Введение

Изменение светопропускающих и светоотражающих свойств оптических элементов при помощи технологии нанесения тонкопленочных оптических покрытий в настоящее время стало необходимым атрибутом при изготовлении высокоточного, качественного оптического оборудования. Вместе с этим с каждым годом повышаются стандарты качества при изготовлении таких оптических элементов и, в частности, при нанесении оптических покрытий [1, 2]. Это может выражаться как в оптимизации технических процессов подготовки оптических элементов и нанесения покрытий, так и в добавлении новых подготовительных этапов, влияющих на адгезию поверхности подложки и наносимой пленки [3]. Так, к примеру, разрабатывают и сравнивают между собой системы оптического контроля, необходимые для высокоточного отслеживания толщины и скорости нанесения слоя [4], используют преимущества различных методов нанесения покрытий [5].

Перед нанесением тонкопленочных покрытий на подложки их обычно отправляют на несколько подготовительных процедур. Одной из таких процедур является отмывка подложек химикатами. Чаще всего используют спиртосодержащие жидкости (органические растворители), кислоты и воду. Отмывка является кропотливым процессом, требующим определенных навыков от исполнителя, так как в конечном результате на поверхности могут оставаться капли и разводы отмывающих жидкостей. Следующим этапом подготовки подложек к напылению является их нагрев. При помощи нагрева подложек обычно удается избавиться от большого количества остаточных органических и химических соединений, которые остаются после отмывки. Однако у большинства оптически прозрачных материалов температура нагрева, при которой не происходит значительных повреждений, сильно ограничена. Так, например, монокристалл Ge (ZGP) повреждается уже при температурах выше 150 °С. При этом оптимальной температурой, при которой происходит качественная очистка поверхности является 300 °С (при данной температуре органические загрязнения удаляются путем разложения и испарения). Таким образом, не все материалы можно эффективно очищать термическим методом. Для решения этой проблемы существует еще одна подготовительная процедура – ионная очистка [6, 7]. Она часто используется как метод обработки

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-20035, <https://rscf.ru/ru/project/22-12-20035>, дата обращения 25 марта 2022 г.) и Министерства образования и науки Нижегородской области (соглашение 316-06-16-11/24 от 21.03.2024).

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 1

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 20.01.2025. Выпуск в свет 22.01.2025. Заказ № 6192.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.63. Уч.-изд. л. 13.02. 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

