

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

2·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Февраль, 2024

№ 2 (795)

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 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
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

Диб Х., Лозовой К.А., Коханенко А.П. Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si на длину волны 850 нм5

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Ципилев В.П., Олешко В.И., Яковлев А.Н., Форат Е.В., Гречкина Т.В. Влияние длины волны лазерного излучения на пороги инициирования энергетических материалов14

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Беляев Б.А., Волошин А.С., Ходенков С.А., Галеев Р.Г. Наклонное падение электромагнитной волны на плоский резонатор из двух диэлектрических слоев с субволновыми решетками полосковых проводников на границах25

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Шаповалов А.В., Кулагин А.Е., Синоков С.А. Невязка квазиклассически сосредоточенных решений кинетического уравнения на примере нелокальной модели ионизации активной среды36

Абдуллаев С.К., Годжаев М.Ш. Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. I45

Тимошкин А.В. Голографическое описание поздней Вселенной на основе обобщенной энтропии55

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Павленко В.И., Романюк Д.С., Кашибадзе В.В., Ручий А.Ю., Форова Е.В. Исследования радиационно-защитных свойств многокомпонентного композиционного материала с использованием источников ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co 60

Попова Н.А., Громов В.Е., Никоненко Е.Л., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Шляров В.В., Крюков Р.Е. Оценка механизмов упрочнения, формирующих предел текучести в заэвтектоидной стали70

Тихонов И.Д., Смирнов А.В., Тюнтеров Е.С. Исследование газочувствительных свойств нанокристаллических пленок83

Таловская А.А., Моховиков Д.М., Барбин Е.С., Кулинич И.В., Гуляева А.А. Исследование механических параметров чувствительного элемента резонансно-частотного датчика давления91

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Кизириди П.П., Озур Г.Е., Шнайдер А.В. Электронно-оптическое наблюдение свечения плазмы в сильноточном диоде со взрывоэмиссионным катодом на базе вакуумных дуг101

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Тельминов Е.Н., Бердыбаева Ш.Т., Солодова Т.А. Генерационные характеристики активного полимерного волновода с борфторидными комплексами дипиррометенов107

Лукин В.П. Прогноз фазовых флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере на основе текущих данных114

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Тимофеев В.С., Гордиенко А.Б., Басалаев Ю.М. Исследование структуры и особенностей химической связи тройных соединений бериллия Be_2N_A ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) с использованием функций Ванье124

ПЕРСОНАЛИЯ

Памяти Владислава Гавриловича Багрова128

CONTENTS

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Deeb H., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P.** Calculation of characteristics of avalanche Ge/Si photodiodes for a wavelength of 850 nm 5

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Tsipilev V.P., Oleshko V.I., Yakovlev A.N., Forat E.V., Grechkina T.V.** Effect of laser radiation wavelength on the thresholds of initiation of energy materials 14

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Belyaev B.A., Voloshin A.S., Khodenkov S.A., Galeev R.G.** Oblique electromagnetic wave incidence on a plane resonator consisting of two dielectric layers with strip conductor subwavelength gratings at their interfaces 25

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Shapovalov A.V., Kulagin A.E., Siniukov S.A.** Residual of semiclassically concentrated solutions to a kinetic equation by the example of nonlocal model for the ionization of active medium 36
- Abdullayev S.K., Gojayev M.Sh.** Production of the Higgs boson and γ -quantum in muon-antimuon collisions (I) 45
- Timoshkin A.V.** Holographic description of the late Universe based on generalized entropy 55

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Pavlenko V.I., Romanyuk D.S., Kashibadze V.V., Ruchiy A.Yu., Forova E.V.** Studies of radiation-protective properties of multicomponent composite material using sources of ^{207}Bi , ^{137}Cs , and ^{60}Co 60
- Popova N.A., Gromov V.E., Nikonenko E.L., Ivanov Yu.F., Porfiriev M.A., Shlyarov V.V., Kryukov R.E.** Assessment of hardening mechanisms forming the yield strength in hypereutectoid steel 70
- Tikhonov I.D., Smirnov A.V., Tyunterov E.S.** Investigation of gas-sensitive properties of nanocarbon films 83
- Talovskaya A.A., Mokhovikov D.M., Barbin E.S., Kulinich I.V., Guliaeva A.A.** Study of mechanical parameters of the sensitive element of the resonant-frequency pressure sensor 91

PLASMA PHYSICS

- Kiziridi P.P., Ozur G.E., Schneider A.V.** Electron-optical observation of plasma glow in high-current diode with explosive-emission cathode based on vacuum arcs 101

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Tel'minov E.N., Berdybaeva Sh.T., Solodova T.A.** Generation characteristics of active polymer waveguide with borofluoride complexes of dipyrromethenes 107
- Lukin V.P.** Prediction of phase fluctuations of optical waves in a turbulent atmosphere based on current data 114

BRIEF COMMUNICATIONS

- Timofeev V.S., Gordienko A.B., Basalaev Yu.M.** Study of the structure and features of chemical bonds in beryllium ternary compounds $\text{Be}_2\text{N}A$ ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) using Wannier functions 124

PERSONALIA

- To the memory** of Vladislav Gavriilovich Bagrov 128

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/67/2/1

Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si на длину волны 850 нм*Х. Диб¹, К.А. Лозовой¹, А.П. Коханенко¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проведена оценка коэффициента усиления, полосы пропускания и эффективности поглощения лавинных фотодиодов Ge/Si с нанотверстиями для захвата фотонов с длиной волны 850 нм. Предложенная конструкция Ge/Si лавинного фотодиода с ловушками для фотонов позволяет добиться значительного увеличения усиления, полосы пропускания и эффективности поглощения. Продемонстрировано, что существует возможность улучшения отклика фотоприемника без ущерба для коэффициента усиления и быстродействия устройства. Результаты работы могут применяться для проектирования лавинных фотодиодов Ge/Si с использованием ловушечных структур с высоким усилением, быстродействием и эффективностью поглощения в перспективных технологиях, таких как флуоресцентная микроскопия с измерением времени жизни, позитронно-эмиссионная томография, квантовые коммуникационные системы, лидарные технологии и 3D-системы визуализации.

Ключевые слова: *оптоэлектроника, лавинный фотодиод, Ge/Si-гетеропереход, лавинное умножение, фотоприемник, захват фотонов.*

Введение

Лавинные фотодетекторы (ЛФД) представляют собой полупроводниковые устройства с внутренним усилением, что делает их основным решением для достижения высоких соотношений сигнал/шум в фотоприемных модулях. Эти устройства играют важную роль в различных областях применения, таких как волоконная связь [1–7], спектроскопия [8] и системы визуализации [9, 10]. Компромисс между откликом и полосой пропускания, известный как произведение усиления и полосы пропускания (GBP), является ключевым аспектом при проектировании лавинных фотодетекторов.

Снижение избыточного шума в высокоскоростных лавинных фотодетекторах включает в себя выбор материала с низким коэффициентом ионизации в качестве умножающего слоя [11]. Кремний, известный своим низким коэффициентом ионизации [12–14], представляет собой перспективный материал для лавинных фотодетекторов с высокой производительностью. Однако устройства на основе кремния сталкиваются с трудностями, связанными с эффективностью детектирования и временными характеристиками из-за компромисса между толщиной области поглощения и быстродействием [15].

Введение германия в качестве поглотителя в структуре с отдельным поглощением и умножением заряда (separate-absorption-charge-multiplication, SACM) позволяет адаптировать кремниевые ЛФД для работы на оптических длинах волн телекоммуникационных систем. В последние годы наблюдается рост интереса к исследованиям Ge/Si ЛФД. Они предлагаются в качестве основного решения для оптических приемников связи благодаря их совместимости с технологией CMOS и более простой структуре по сравнению с лавинными фотодиодами на основе материалов III–V групп [16]. Текущие исследования направлены на повышение эффективности работы лавинных фотодиодов Ge/Si путем улучшения эффективности умножения заряда, снижения уровней темного тока и оптимизации времени отклика [17–23]. Кроме того, микро- и наноструктуры для захвата фотонов в кремнии проявили потенциал для модификации распространения света и улучшения поглощения как в фотодетекторах типа PIN-диодов, так и в фотодетекторах с контактами металл–полупроводник–металл (MSM) для инфракрасных длин волн. Этот подход может помочь решить проблему ограничения произведения полосы пропускания и эффективности в полупроводниковых детекторах за счет улучшения поглощения и увеличения вероятности лавинообразного умножения электронов для получения более высоких значений усиления и более низких уровней шума [24–27].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10031, <https://rscf.ru/project/21-72-10031/>.

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 544.454

DOI: 10.17223/00213411/67/2/2

**Влияние длины волны лазерного излучения
на пороги инициирования энергетических материалов***В.П. Ципилев¹, В.И. Олешко¹, А.Н. Яковлев², Е.В. Форат¹, Т.В. Гречкина¹¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*² *Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия*

Измерены энергетические пороги инициирования и кинетические характеристики процесса взрывного разложения азидов тяжелых металлов, тетранитрата пентаэритрита и фуразанотетразиндиоксида на различных длинах волн при длительностях воздействующего импульса $\sim 10\text{--}20$ нс. Установлено, что поведение энергетических материалов определяется длиной волны лазерного излучения и существенно меняется при инициировании в условиях открытой и закрытой облучаемой поверхности, что связано с особенностями газодинамической разгрузки тепловых микроочагов.

Ключевые слова: лазерное излучение, инициирование энергетических материалов, горячие точки, микроочаговая модель.

Введение

Количество работ, посвященных влиянию длины волны лазерного излучения (ЛИ) на поведение энергетических материалов (ЭМ), весьма ограничено, поскольку, начиная с начального этапа исследований (с 1969 г.) по настоящее время, подавляющее большинство работ выполнено на основной гармонике неодимового лазера, т.е. на длине волны 1060 или 1064 нм. На других длинах волн интерес представляют работы [1–5], а также [6, 7]. Работы [1–5] выполнены по инициированию тетранитрата пентаэритрита (тэна) на первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармониках неодимового лазера, и их результаты являются противоречивыми. Так, в [1, 2] утверждается, что при воздействии на предварительно нагретый тэн первой гармоникой излучения при температуре образца 450 К порог инициирования H_{05} составляет 0.5 Дж/см^2 , а излучением второй гармоникой инициировать тэн при той же температуре не удалось даже при 10 Дж/см^2 . В [3] показано, что излучением второй гармоники инициировать тэн при комнатной температуре образца относительно легко ($H_{05} = 12.3 \text{ Дж/см}^2$), а излучением первой не удастся инициировать даже при $H_{05} = 120 \text{ Дж/см}^2$. В [6] нами определены пороги инициирования азидов тяжелых металлов (АТМ) на длинах волн 10600 нм (CO_2 -лазер) и 308 нм (эксимерный лазер). Показано, что в ИК-области спектра (фононное поглощение) пороговая плотность энергии для азидов свинца составляет $H_{05} = 2 \text{ Дж/см}^2$, в области прозрачности (1060 нм) $H_{05} = 5 \text{ мДж/см}^2$, а в УФ-области (собственное поглощение) порог составил 5 Дж/см^2 . Данный результат не может быть объяснен с позиций фотохимического разложения [7, 8] (цепная фотохимическая электронно-дырочная модель взрыва), поскольку в УФ-области спектра квантовый выход близок к единице, а в области прозрачности он на 4 порядка ниже. Таким образом, с точки зрения [7, 8] в эксперименте при воздействии в области прозрачности следовало ожидать увеличение порога инициирования по сравнению с УФ на 4 порядка величины. Одновременно за счет увеличения показателя поглощения (на 4–7 порядков) увеличивается поглощенная объемная плотность энергии, а следовательно, и температура облученного объема, и начальная концентрация электронно-дырочных пар. Однако эксперимент показал обратное, т.е. измеренные пороги в области прозрачности оказались, наоборот, на 3 порядка ниже по сравнению с областью собственного поглощения. Более подробно этот парадокс исследован в [9], где были определены пороги инициирования прессованных порошков, пластинчатых и нитевидных кристаллов АТМ на первой (1064 нм), второй (532 нм), третьей (354.7 нм) и четвертой (266 нм, область собственного поглощения) гармониках неодимового лазера. Измерения проводились при воздействии лазерного пучка

* Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 621.3.029.6

DOI: 10.17223/00213411/67/2/3

**Наклонное падение электромагнитной волны
на плоский резонатор из двух диэлектрических слоев
с субволновыми решетками полосковых проводников на границах***Б.А. Беляев^{1,2,3}, А.С. Волошин^{1,2,3}, С.А. Ходенков¹, Р.Г. Галеев^{1,4}¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия³ Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия⁴ АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск, Россия

Определены параметры резонатора, состоящего из двух диэлектрических пластин с решетками полосковых проводников между слоями в виде квадратов, а на наружных поверхностях в виде квадратных сеток, имеющих одинаковый субволновой период. Добротность резонатора, измеренная при нормальном падении волны, определяется соотношением ширин внутренних и наружных проводников. С помощью электродинамического анализа 3D-модели резонатора исследовано распространение плоских линейно-поляризованных электромагнитных волн при отклонении их угла падения φ от нормали к плоскости слоистой структуры. Обнаружено, что при параллельной поляризации волны добротность наблюдаемого полуволнового резонанса с ростом φ сначала падает до минимума при приближении к углу Брюстера, а затем растет при $\varphi \rightarrow 90^\circ$. В случае перпендикулярной поляризации волны добротность полуволнового резонанса с ростом φ постоянно увеличивается, приближаясь к максимальной величине при $\varphi \rightarrow 90^\circ$.

Ключевые слова: диэлектрическая пластина, плоская электромагнитная волна, наклонное падение волны, амплитудно-частотная характеристика, полуволновой резонанс, добротность, угол Брюстера.

Введение

В настоящее время исследователи активно изучают особенности прохождения и отражения электромагнитных волн, падающих на конструкции из диэлектрических слоев, на поверхностях которых созданы периодические структуры из полосковых проводников (2D-решетки) [1–4]. Интерес к таким конструкциям, которые называют частотно-селективными поверхностями (ЧСП), обусловлен возможностью создания на их основе полосно-пропускающих фильтров в диапазонах от дециметровых до субмикронных длин волн [3–6]. Разнообразные полосковые элементы, из которых строят периодические 2D-структуры, например, металлические квадратные или круглые патчи, полосы или сетки из полосковых проводников, проявляют свойства параллельных и последовательных колебательных контуров [7, 8]. Это позволяет, используя многослойные конструкции из взаимодействующих резонансных структур, создавать полосно-пропускающие фильтры [9–11], антенны [12–14], поляризаторы [15, 16] и поглотители электромагнитного излучения [17–19]. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по распространению электромагнитных волн, падающих на такие слоистые структуры, представлены в монографии [20].

Важно отметить, что собственная добротность полосковых резонаторов на высоких частотах падает с уменьшением толщины скин-слоя из-за увеличения влияния шероховатости подложки. Поэтому многослойные фильтры на резонансных структурах из полосковых проводников имеют в полосе пропускания сравнительно большие потери.

Существенно меньшими потерями обладают конструкции фильтров, в которых сами диэлектрические слои являются высокодобротными резонаторами, а 1D- или 2D-структуры из полосковых проводников, сформированных на их поверхностях, служат зеркалами с заданной отражательной способностью [21, 22]. Для расширения высокочастотной полосы заграждения в таких конструкциях период полосковых структур должен быть много меньше длины волны в диэлектри-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание FEFE-2023-0004.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.182

DOI: 10.17223/00213411/67/2/4

Невязка квазиклассически сосредоточенных решений кинетического уравнения на примере нелокальной модели ионизации активной среды*А.В. Шаповалов^{1,2}, А.Е. Кулагин^{3,4}, С.А. Синюков¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*³ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*⁴ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследуется главный член асимптотики для решения двумерного кинетического уравнения с нелокальной кубической нелинейностью, являющегося моделью ионизации активной среды. Рассматриваемое асимптотическое решение построено аналитически в классе траекторно-сосредоточенных функций в приближении слабой диффузии. Построено численное решение уравнения модели, соответствующее асимптотическому решению. Аналитическими и численными методами проведено исследование зависимости невязки асимптотического решения от времени и от асимптотического малого параметра. В выбранной области значений параметров модели показана согласованность асимптотических и численных решений.

Ключевые слова: активная среда, нелокальное кинетическое уравнение, асимптотические решения, квазиклассические асимптотики, невязка.

Введение

Метод квазиклассически сосредоточенных состояний, основанный на теории роста Маслова [1–3], является мощным инструментом построения асимптотических решений нелокальных нелинейных уравнений. Метод применялся к ряду уравнений, в частности, эволюционных уравнений типа Шредингера и кинетических уравнений (см. [4–6] и цитированную там литературу). Поэтому важной является задача исследования невязки и точности данных решений.

В данной работе исследуется невязка решений применительно к нелокальной модели ионизации активной среды на парах металлов (АСПМ) [7], уравнение которой можно записать в виде [4]

$$\begin{aligned} \partial_t u(\vec{x}, t) = & D\tilde{D}_a(t)\Delta u(\vec{x}, t) + a(\vec{x}, t)u(\vec{x}, t) - \\ & - \kappa u(\vec{x}, t) \int_{R^2} d\vec{y} \int_{R^2} d\vec{z} b(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t) u(\vec{y}, t) u(\vec{z}, t). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение (1) описывает двумерное распределение концентрации ионов в активной среде в поперечном сечении газоразрядной трубки (ГРТ) в предположении его однородности вдоль оси ГРТ [8]. В этом случае концентрация ионов $u(\vec{x}, t)$, равная концентрации электронов в силу условия квазинейтральности, зависит от вектора $\vec{x} = (x_1, x_2) \in R^2$, задающего положение точки в декартовых координатах плоскости сечения ГРТ с началом координат на ее оси, и от времени t . В приближении контрагированного разряда концентрация ионов быстро убывает с удалением от оси ГРТ, вследствие чего можно избавиться от граничных условий на стенках ГРТ, заменив их на условие $u(\vec{x}, t) \rightarrow 0$ при $|\vec{x}| \rightarrow \infty$, где $|\vec{x}|$ – длина вектора \vec{x} . Оператор Лапласа в декартовых координатах обозначен Δ ; $\partial_t = \partial / \partial t$; κ – параметр нелинейности; выражение $D\tilde{D}_a(t)$ задает коэффициент амбиполярной диффузии; функция $a(\vec{x}, t)$ определяется кинетическим коэффициентом процесса ионизации нейтральных атомов и их концентрацией и полагается заданной; ядро интеграла в (1), $b(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, t)$, где $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z} \in R^2$, пропорционально плотности вероятности акта тройной рекомбинации при взаимодействии иона с двумя электронами и будет задаваться в виде модельных функций.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-01047, <https://rscf.ru/project/23-71-01047/>.

Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. I

С.К. Абдуллаев¹, М.Ш. Годжаев¹

¹ Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

В рамках Стандартной модели рассмотрен процесс совместного рождения хиггс-бозона H и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях: $\mu^-\mu^+ \rightarrow H\gamma$. С учетом спиральностей мюон-антимюонной пары и циркулярной (линейной) поляризации γ -кванта получены аналитические выражения для дифференциального и интегрального сечений процесса. Определены степени циркулярной и линейной поляризации γ -кванта и подробно изучена зависимость этих характеристик, а также эффективного сечения процесса от угла вылета фотона θ_γ и энергии \sqrt{s} мюон-антимюонной пары.

Ключевые слова: мюон-антимюонная пара, хиггс-бозон, γ -квант, степень циркулярной поляризации, степень линейной поляризации.

Введение

Открытие хиггс-бозона H с характеристиками, соответствующими предсказаниям Стандартной модели (СМ), осуществилось коллаборациями ATLAS и CMS в Большом адронном коллайдере (БАК) в 2012 г. [1, 2] (см. обзоры [3–5]). С его открытием найден недостающий кирпичик в здании СМ и выполнена задача, поставленная проекту БАК и его основным детектором. Путь к открытию хиггс-бозона был долгим и одновременно с фактом открытия началась большая работа по проверке достоверности обнаруженного сигнала и выяснению природы этой частицы.

Новая частица – хиггс-бозон H – нестабильна и может распадаться по различным каналам. На БАК ее открыли, изучая распады на два фотона $H \rightarrow \gamma\gamma$ и на две пары лептон-антилептон $H \rightarrow 4\ell$, где $\ell = e^\mp$ или μ^\mp . Второй тип процессов происходит в две стадии: сперва хиггс-бозон распадается на два Z -бозона, один из которых виртуальный: $H \rightarrow ZZ^*$, а затем каждый из Z -бозонов распадается на пару $\mu^-\mu^+$ или e^-e^+ . Это записывают как $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$. В число распадов хиггс-бозона входили и следующие распады: $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, где W – заряженный калибровочный бозон, ν – мюонное или электронное нейтрино. Масса хиггс-бозона H по данным коллаборации ATLAS составляла $M_H = (126.0 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.4(\text{сист.}))$ ГэВ, а по данным коллаборации CMS – $M_H = (125.3 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.5(\text{сист.}))$ ГэВ.

В дальнейших экспериментах, проводимых в БАК установлены основные свойства хиггс-бозона H – все они находятся в согласии со СМ: это частица со спином нуль, положительной четностью и вакуумным средним, отличным от нуля, которая взаимодействует с W - и Z -бозонами, а также с лептонами и кварками с константой, пропорциональной массам последних. Все же исследование физических свойств хиггс-бозона СМ продолжается. Необходимо с высокой точностью измерить его основные характеристики: массу, ширину распада, константы взаимодействия с фундаментальными частицами. Новые эксперименты на БАК при полной энергии протон-протонных пучков 14 ТэВ помогут в измерении его характеристик с точностью на порядок выше достигнутой. Возможно, для решения этих задач потребуется строительство нового поколения электрон-позитронного или мюон-антимюонного коллайдера высокой энергии [6–11].

Следует отметить, что изучение процессов рождения хиггс-бозонов в поляризованных электрон-позитронных или мюон-антимюонных столкновениях представляет огромный интерес. Это связано со следующими обстоятельствами. Во-первых, взаимодействие электрон-позитронной или мюон-антимюонной пары описывается СМ, поэтому полученные результаты хорошо интерпретируемы. Во-вторых, поскольку электрон-позитронная (мюон-антимюонная) пара не участвует в сильных взаимодействиях, то существенно улучшаются фоновые условия экспериментов по срав-

Голографическое описание поздней Вселенной на основе обобщенной энтропии

А.В. Тимошкин^{1,2}

¹Томский государственный педагогический университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Голографический принцип применяется к описанию поздней Вселенной с учетом свойства вязкости темной жидкости в пространственной метрике Фридмана – Леметра – Робертсона – Уокера. Рассматривается голографическая космология на основе функции обобщенной энтропии. Используется идея обобщенного отсечения голографической темной энергии, предложенная Ноджири и Одинцовым. Исследуются космологические модели вязкой жидкости с обобщенным уравнением состояния. В рамках этих моделей вычисляется инфракрасный радиус в терминах горизонта частиц. Получены законы сохранения энергии с голографической точки зрения. Показано, что энтропийная космология, построенная на основе функции обобщенной энтропии, эквивалентна голографической космологии, в которой голографическое отсечение определено в терминах горизонта частиц.

Ключевые слова: темная энергия, энтропия, голографический принцип, объемная вязкость.

Введение

Один из успешных подходов объяснения ускоренного расширения ранней и поздней Вселенной состоит в применении голографического принципа [1–3]. Происхождение голографического принципа объясняется термодинамикой черных дыр и теорией струн. Обобщенная модель голографической темной энергии с отсечением была предложена Ноджири – Одинцовым [2]. Голографическая теория описания темной энергии подтверждается результатами астрономических наблюдений [4–6]. Разработке различных подходов и обобщений голографической темной энергии посвящены обзоры [7–9]. Примеры недавних исследований с применением голографического принципа в космологии представлены в работах [10, 11]. Показано, что все известные модели голографической темной энергии являются подклассами модели Ш. Ноджири и С.Д. Одинцова [12].

Другой подход к модифицированной теории гравитации основан на соотношении между гравитацией и термодинамикой. Одним из важных открытий теоретической физики является излучение Хокинга, которое проявляется в черных дырах и связано с существованием видимого горизонта черной дыры. Оно описывается определенной температурой и энтропией Бекенштейна – Хокинга [13, 14]. Показано, что энтропийная космология эквивалентна голографической космологии с подходящим выбором голографического отсечения [15, 16]. Голографическая космология успешно описывает эпоху темной энергии во Вселенной для различных форм энтропии, отличных от энтропии Бекенштейна – Хокинга (например, энтропии Цаллиса, Ренье, Барроу). Эти типы энтропии имеют некоторые общие свойства: они сводятся к энтропии Бекенштейна – Хокинга при определенном пределе и являются монотонно возрастающими функциями.

Возникает вопрос: существует ли функция, обобщающая все вышеупомянутые виды энтропии? В качестве ответа предложена обобщенная энтропия с четырьмя параметрами, которая сводится к известным функциям энтропии [17]:

$$S_g(\alpha_+, \alpha_-, \beta, \gamma) = \frac{1}{\gamma} \left[\left(1 + \frac{\alpha_+}{\beta} S \right)^\beta - \left(1 + \frac{\alpha_-}{\beta} S \right)^{-\beta} \right], \quad (1)$$

где $\alpha_+, \alpha_-, \beta, \gamma$ – положительные параметры; S – энтропия Бекенштейна – Хокинга.

Применим термодинамический подход для описания космологического поведения Вселенной, основанный на обобщенной энтропии S_g .

Рассмотрим однородную и изотропную на больших масштабах Вселенную Фридмана – Леметра – Робертсона – Уокера с плоской метрикой

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \sum_{i=1,2,3} (dx^i)^2, \quad (2)$$

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.45.038.77

DOI: 10.17223/00213411/67/2/7

**Исследования радиационно-защитных свойств
многокомпонентного композиционного материала
с использованием источников ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co ***В.И. Павленко¹, Д.С. Романюк¹, В.В. Кашибадзе¹, А.Ю. Ручий¹, Е.В. Форова¹¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Рассмотрен синтез композиционного материала на основе полиэтилена с добавками оксида висмута Bi_2O_3 и карбида бора B_4C . Представлены исследования радиационно-защитных свойств образцов с использованием источников γ -излучения Bi , Cs , Co с энергиями $E(^{207}\text{Bi}) = 0.570$ МэВ, $E(^{137}\text{Cs}) = 0.662$ МэВ, $E(^{60}\text{Co}) = 1.252$ МэВ. Оценены физико-механические характеристики образцов. Проведены испытания на микротвердость по Виккерсу, а также испытания на изгиб. Представлена теоретическая оценка вклада фотоэффекта, эффекта Комптона и эффекта образования электрон-позитронных пар в суммарный коэффициент ослабления. Теоретически и практически для всех составов определены показатели линейного коэффициента ослабления, слой половинного ослабления, массовый коэффициент ослабления.

Ключевые слова: защитный композит, γ -излучение, пластическая деформация, линейный коэффициент ослабления, слой половинного ослабления, массовый коэффициент ослабления, процент ослабления γ -излучения образцом.

Введение

Радиация и термины, связанные с радиацией, встречаются во многих сферах жизни, поскольку различные типы излучения широко используются и применяются в разных видах деятельности и аппаратах, таких как ускорители частиц, ядерные реакторы, исследовательские центры, медицинская промышленность, сельскохозяйственные применения, космические полеты, и т.д. [1]. Основной задачей обеспечения безопасности на данных объектах является радиационная защита, поскольку нежелательное облучение может нанести радиационный ущерб вовлеченному персоналу, окружающей среде и человеку [2].

Для комбинированной защиты от нейтронного и γ -излучения необходимо одновременно выбирать материалы с высоким Z (атомными номерами), низким Z и атомами, поглощающими тепловые нейтроны. Материалы с высоким Z эффективно ослабляют γ -излучение. Материалы с низким Z (такие как полиэтилен, вода, парафин и т.д.) замедляют нейтроны до тепловых за счет упругого рассеяния, а тепловые нейтроны поглощаются материалами, такими как бор, кадмий и др., за счет реакции захвата [3–5].

Основываясь на литературных данных, можно смело утверждать, что некоторые полимерные композиты на основе полиэтилена являются гибкими и прочными материалами и могут быть легко заполнены различными элементами. Они также доступны по цене и не требовательны к обслуживанию. Благодаря этим свойствам они являются хорошими кандидатами для ослабления нейтронного излучения, а при введении наполнителя можно добиться и защиты от γ -излучения [6–8].

В работе [9] изучалась роль микроразмерного пуццолана в повышении радиационно-защитных свойств полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Плотность полученных композитов увеличилась с 0.089 до 1.234 г/см³. Измерения показали, что добавление порошка природного пуццолана в концентрации 50 мас.% увеличивает коэффициент линейного ослабления полимера ПЭВП в 6.8 раза при $E = 59$ кэВ, в 1.7 раза при $E = 662$ кэВ и в 1.3 раза при $E = 1252$ кэВ.

В работе [10] исследовано экранирование нейтронного и γ -излучения композита из гадолиния. Авторы утверждают, что поверхности микро- Gd_2O_3 и нано- Gd_2O_3 были успешно модифицированы связующим агентом. Композиционный материал, содержащий 10 мас.% нано- Gd_2O_3 /20 мас.% B_4C ПЭВП 70 вес.%, обеспечивает степень защиты от нейтронов на 90% при толщине 9.1 см в сре-

* Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Оценка механизмов упрочнения, формирующих предел текучести в заэвтектоидной стали*

Н.А. Попова¹, В.Е. Громов², Е.Л. Никоненко¹, Ю.Ф. Иванов³,
М.А. Порфирьев², В.В. Шляров², Р.Е. Крюков²

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

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Методами просвечивающей электронной микроскопии изучены структурно-фазовые состояния в головке дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов из заэвтектоидной стали по центральной оси на глубине до 10 мм после эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД (пропущенный тоннаж 187 млн тонн брутто). Показано, что прочность стали определяется совместным действием ряда физических механизмов. Проведена количественная оценка вкладов в упрочнение от трения кристаллической решетки, твердорастворного упрочнения, упрочнения перлитной составляющей частицами цементита, границами зерен и субграницами, скалярной и избыточной плотностью дислокаций и установлена их иерархия. Установлена зависимость аддитивного предела текучести от состояния до поверхности катания головки рельсов.

Ключевые слова: механизмы упрочнения, электронная микроскопия, заэвтектоидная сталь, рельсы, эксплуатация.

Введение

В России с ее разветвленной сетью железных дорог на их долю приходится до 85% грузооборота и более 50% пассажирских перевозок. В последние годы наблюдается значительное увеличение интенсивности железнодорожного транспорта и его грузонапряженности, что требует высокой эксплуатационной стойкости рельсов. Улучшение эксплуатационных характеристик рельсов невозможно без детального рассмотрения их поведения при длительной эксплуатации, анализа причин их изъятия и выявления факторов, способствующих их разрушению. Перед российскими производителями рельсов стоит задача увеличить межремонтный тоннаж, повысить погонные нагрузки вагонов, осевые нагрузки и массу грузовых поездов и обеспечить надежную эксплуатацию рельсов до пропущенного тоннажа 2.0–2.5 млрд тонн брутто [1]. Учитывая огромную роль железных дорог в народном хозяйстве, производство рельсов, соответствующих современным условиям экстремальной эксплуатации (в том числе при пониженных температурах, сложном профиле пути, высоких скоростях движения), приобретает все большую актуальность.

Три года назад на АО «Евраз-объединенный ЗСМК» начато производство 100-метровых рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости категории ДТ400ИК для эксплуатации в прямых участках пути со скоростями до 200 км/ч и кривых участках без ограничения грузонапряженности. Экстремально длительная эксплуатация инициирует сложные процессы в рельсах, приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний и ухудшению механических свойств. Накопленные повреждения могут стать причиной выхода рельсов из строя, что наносит значительный экономический ущерб. По данным РЖД, до 75% изъятий рельсов происходит при достижении предельного состояния по износу и контактно-усталостным дефектам, причем верхняя часть боковой грани головки рельсов наиболее подвержена формированию этих дефектов [1].

В работах отечественных [2, 3] и зарубежных исследователей [4–9] сформирован значительный банк данных по эволюции структурно-фазовых состояний и свойств рельсов при эксплуатации, что можно считать основой физического материаловедения рельсовых сталей. Преобразования при различных воздействиях структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры рельсов, выявленные с использованием высокоинформативных методов современного физического материаловедения [10–14], существенным образом сказываются на свойствах металла, определяя в конечном итоге срок службы рельсов. Вскрыть физическую природу процессов эволюции свойств и выявить закономерности, связывающие параметры структуры и субструктуры и прочностные

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

УДК 539.216.2

DOI: 10.17223/00213411/67/2/9

Исследование газочувствительных свойств наноуглеродных пленок

И.Д. Тихонов¹, А.В. Смирнов¹, Е.С. Тюнтеров¹

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чувашская Республика,
г. Чебоксары, Россия

Синтезированы тонкопленочные образцы на основе наносистем углеродных нанотрубок и графена. Рассмотрена взаимосвязь газочувствительности тонкопленочных образцов с температурой отжига, коэффициентами пропускания и поглощения, поверхностным сопротивлением, шероховатостью и другими параметрами. Разработан метод программного определения фрактальной размерности образца; при помощи данного метода можно определять более газочувствительные образцы.

Ключевые слова: тонкопленочные системы, пленки графена, пленки углеродных нанотрубок, фрактальная размерность, газочувствительность, тонкопленочные сенсоры.

Введение

Современные технологии требуют все более точных и чувствительных датчиков газовых компонентов. В частности, в таких сферах, как промышленность (газочувствительные сенсоры используются для обнаружения опасных газов в промышленных процессах) и медицина (газочувствительные сенсоры используются для диагностики заболеваний дыхательной системы). На роль таких сенсоров отлично подходят наноуглеродные пленки. Кроме того, они могут быть интегрированы в различные устройства и системы, такие как мобильные приложения или системы управления зданиями, что делает их еще более перспективными материалами для создания газочувствительных сенсоров.

Растущая потребность в высококачественных газовых датчиках требует улучшения таких их характеристик, как чувствительность, селективность, отклик, время восстановления, энергопотребление и долговечность. Одним из способов повышения чувствительности является использование благородных металлов (Au, Pd, Pt и Ag) в качестве катализаторов [1]. В последнее время углеродные нанотрубки (УНТ) использовались в качестве активного, а также и пассивного материала для газозондирования [2]. Углеродные нанотрубки имеют возможность улучшить вышеперечисленные характеристики датчика. Повышение чувствительности связано с тем, что УНТ имеют высокое отношение поверхности к объему, из-за чего активная поверхность площади адсорбции, т.е. область чувствительности, значительно увеличивается. Сообщается о небольшом количестве работ по использованию оксида меди (II), наностержни/нанопроволоки CuO для сенсорных приложений [3]. Несмотря на то, что было предпринято несколько попыток улучшить чувствительность реакции пленок оксидов металлов с использованием многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), на принципе резистивного газового зондирования [4], существует ограниченное количество сообщений о датчиках летучих органических соединений [5] на основе ZnO/CuO/УНТ [6], функционирующих при комнатных температурах.

Сообщается об исследованиях газовых датчиков на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в составе композитов наноматериалов на оксидах металлов, чтобы улучшить чувствительные свойства газовых датчиков. Чой и др. продемонстрировали применение ОСУНТ, декорированных наночастицами платины, нанесенных с помощью распыления, а затем термически обработанных в атмосфере, для изготовления высокочувствительных/селективных датчиков газа NO₂ при комнатной температуре с пределом обнаружения 2 ppm [7]. Также было определено влияние температуры на чувствительные свойства этих датчиков. В то же время было отмечено, что, несмотря на лучшую чувствительность к NO₂ при 100 °С по сравнению с 25 °С, эти датчики также применимы к другим газам, в том числе и при комнатной температуре.

Установлено, что применение прозрачных УНТ позволило разработать гибкое газовое сенсорное устройство при комнатной температуре [8]. Это было достигнуто путем послойной сборки прозрачных заживляемых полиэлектролитных пленок и сеток УНТ, нанесенных на заживляемые подложки. Подчеркивалось, что данные пленки УНТ имеют лучшую сетчатую структуру на этих подложках благодаря возвращению в контакт разделенных областей слоя УНТ за счет бокового

Исследование механических параметров чувствительного элемента резонансно-частотного датчика давления

А.А. Таловская¹, Д.М. Моховиков¹, Е.С. Барбин¹,
И.В. Кулинич¹, А.А. Гуляева¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Рассматривается чувствительный элемент резонансно-частотного датчика давления, его характеристики и сравнение с другими видами датчиков давления. В результате анализа выявлено, что основным недостатком данного типа устройств являются низкие значения чувствительности. Для решения данной проблемы предлагается заменить монокристаллическую кремниевую мембрану на композитную с последующим изменением геометрии резонаторов. Для подтверждения действенности данного метода представлено моделирование мембраны из кремния и композитных материалов, отображающее изменение частоты собственных колебаний и внутренних напряжений.

Ключевые слова: датчик давления, резонансная частота, чувствительность, внутреннее напряжение.

Введение

Микроэлектромеханические (МЭМС) датчики давления находят широкое применение во многих отраслях промышленности: в нефтегазовой и химической для контроля параметров сырья при транспортировке и переработке [1], в энергетической для измерения расхода уровня рабочего тела, при производстве тепла и электроэнергии, в медицине для контроля внутриартериального давления [2], а также в автомобильной и аэрокосмической отраслях [3].

По принципу измерения давления МЭМС-датчики подразделяются на следующие категории: емкостные, тензорезистивные, пьезорезистивные, резонансно-частотные и др.

Емкостной датчик давления работает по принципу фиксации изменения емкости конденсатора при приложении разности давлений [4]. К достоинствам емкостных датчиков можно отнести простоту конструкции и высокую чувствительность 0.05 фФ/Па [5]. В качестве недостатков выделяют нелинейный выходной сигнал и высокое значение паразитной емкости 0.03 пФ [6].

Принцип действия тензорезистивных и пьезорезистивных датчиков давления основан на измерении изменения сопротивления материала под действием деформации, вызванной оказываемым давлением. К достоинствам тензорезистивных датчиков давления можно отнести хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия агрессивных сред. В качестве недостатков отмечают существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры, а также временную нестабильность градуировочной характеристики. Однако у пьезорезистивных датчиков, наоборот, наблюдается более высокая стабильность характеристик по сравнению с тензодатчиком, но в качестве недостатка присутствуют уже температурные ограничения [7]. Тензорезистивные и пьезорезистивные датчики, так же как и емкостные, обладают нелинейной характеристикой выходного сигнала.

Резонансно-частотный датчик давления работает по принципу изменения частоты собственных колебаний резонаторов под действием разности давлений. К преимуществам данного устройства можно отнести высокую стабильность, отсутствие гистерезиса и потребности в аналого-цифровом преобразовании выходного сигнала [8]. Основным недостатком данного датчика является низкое значение чувствительности, около 0.003 Гц/Па. Данное значение чувствительности свидетельствует о том, что цена деления при измерении давления в резонансно-частотном датчике меньше в несколько раз, чем в емкостном датчике давления [9].

Чувствительный элемент резонансно-частотного датчика давления представляет собой мембрану, на которой сформировано два резонатора. Первый резонатор располагается на краю области оказания давления, второй резонатор – ближе к центру.

При приложении разности давления мембрана изгибается, из-за чего первый резонатор испытывает сжатие и его собственная частота колебаний уменьшается, второй резонатор испытывает растяжение и его собственная частота увеличивается (рис. 1). Разность частот резонаторов в стационарном состоянии и при оказании на мембрану разности давлений прямо пропорциональна оказываемому давлению.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

DOI: 10.17223/00213411/67/2/11

Электронно-оптическое наблюдение свечения плазмы в сильноточном диоде со взрывоэмиссионным катодом на базе вакуумных дуг*П.П. Кизириди¹, Г.Е. Озур¹, А.В. Шнайдер¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

С помощью высокоскоростной четырехканальной электронно-оптической камеры исследована динамика свечения плазмы в сильноточной электронной пушке со взрывоэмиссионным катодом. Катод представлял собой медный диск диаметром 5.8 см со встроенными в него 69-ю резистивно развязанными дуговыми источниками плазмы, вписанными в окружность диаметром 4.8 см. Установлено, что все источники плазмы срабатывают за время не более 50 нс при амплитуде импульса ускоряющего напряжения 8 кВ и выше. Изучено влияние ведущего магнитного поля на число и локализацию катодных пятен. При наличии ведущего магнитного поля число катодных пятен в течение импульса увеличивается незначительно, и рост тока в диоде обеспечивается, в основном, их расширением, т.е. увеличением площади эмитирующей поверхности. Напротив, в отсутствие ведущего магнитного поля наблюдается значительное число катодных пятен на экранном электроде из нержавеющей стали, окружающем катодный диск и электрически соединенным с ним. Это обусловлено так называемым эффектом «подхвата», т.е. возникновением новых катодных пятен под плазмой, контактирующей с поверхностью катода.

Ключевые слова: *сильноточный электронный пучок, взрывоэмиссионный катод, дуговые источники плазмы, катодное пятно, свечение плазмы, электронно-оптическая камера (изображение), ведущее магнитное поле.*

Введение

Источники широкоапертурных ($> 10 \text{ см}^2$) низкоэнергетических (10–30 кэВ) сильноточных (до 20 кА) электронных пучков (НСЭП) длительностью несколько микросекунд на основе пушек с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом находят все большее применение для поверхностной термообработки материалов [1–3]. Однако, несмотря на известные успехи в практическом использовании НСЭП, ряд физических процессов, протекающих в сильноточных электронных пушках, до сих пор остается далеко неясным.

В работах [4–6] нами был представлен новый катодный узел сильноточной электронной пушки со встроенными в катод резистивно развязанными источниками плазмы на базе вакуумных дуг, иницируемых пробоем по поверхности диэлектрика. По сравнению с традиционными пушками с многопроволочным медным катодом [7], данный катодный узел обладает улучшенными характеристиками: повышенной средней плотностью тока, лучшей стабильностью параметров, возможностью работы не только в режиме плазмонаполненного диода, но и в режиме вакуумного и газонаполненного диода. Настоящая работа посвящена исследованию свечения плазмы (прежде всего, катодной) в сильноточной электронной пушке с данным катодным узлом.

Методика эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Использовался катодный узел, описанный в [4–6], на базе медного дискового катода с 69-ю дуговыми источниками. Анод 7 представлял собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали, что обеспечивало беспрепятственное прохождение света в объектив электронно-оптической камеры HSFC-Pro (предоставлена ТомЦКП СО РАН). «Сброс» электронов пучка на анод происходил вдоль расходящихся силовых линий ведущего магнитного поля (около 0.11 Тл в максимуме), создаваемого импульсным соленоидом 11. В ряде экс-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (программа ФНИ Сибирского отделения РАН «Низкотемпературная газоразрядная плазма и ее применение для решения научных и технологических задач», проект «Низкотемпературная плазма стационарных и импульсных разрядов в газах и вакууме и ее применение в электрофизических устройствах», № FWRM-2021-0007).

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.015

DOI: 10.17223/00213411/67/2/12

Генерационные характеристики активного полимерного волновода с борфторидными комплексами дипиррометенов*Е.Н. Тельминов¹, Ш.Т. Бердыбаева¹, Т.А. Солодова¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования люминесцентных и генерационных характеристик активного фотовозбуждаемого планарного волновода из полиметилметакрилата (ПММА), допированного борфторидными комплексами дипиррометенов 2,2'-bisBODIPY. Отмечены особенности спектральных характеристик в растворе толуола и тонкопленочном волноводе из ПММА, допированного 2,2'-bisBODIPY. Получено значение фотостабильности 2,2'-bisBODIPY в пленке ПММА, значительно превосходящее значение фотостабильности в растворе толуола. Исследованы пороговые характеристики лазерной генерации в планарном волноводе из ПММА, допированного 2,2'-bisBODIPY. Показано, что вблизи порога генерации в активном планарном волноводе сначала происходит сужение линии генерации, затем экспоненциальный рост интенсивности излучения.

Ключевые слова: лазерная генерация, спектры люминесценции, фотостабильность, борфторидные дипиррометеновые комплексы, активный полимерный волновод, порог лазерной генерации.

Введение

Флуорофоры на основе BODIPY нашли широкое применение в различных областях науки и техники благодаря таким свойствам, как высокая квантовая эффективность флуоресценции, высокие коэффициенты молярной экстинкции и фотостабильность. Они используются в качестве лазерных сред [1–3], компонентов светоизлучающих диодов и солнечных батарей [4, 5], оптических материалов для сенсоров и зондов [6, 7], в фотодинамической терапии [8–10].

В работах [11–13] показана возможность создания эффективных твердотельных органических лазерных сред, излучающих в красном и желто-зеленом диапазоне спектра с возбуждением 2-й гармоникой (532 нм) Nd³⁺:YAG-лазера (LQ 215).

В [14] создан твердотельный перестраиваемый лазер с использованием матрицы полиметилметакрилата (ПММА), допированной пиррометеном, продемонстрированы низкое значение порога генерации, сужение спектральной полуширины линии генерации до нескольких сотых долей нанометра, при общей перестройке линии генерации в десятки нанометров; лазерно-активный элемент был выполнен в виде полимерного блока.

Органические тонкопленочные лазеры с использованием пиррометенов [15] ввиду своей компактности могут найти применение в интегральной оптике и в качестве химических сенсоров. Тонкопленочный фотовозбуждаемый лазер представляет собой планарную волноводную структуру, содержащую органическую лазерно-активную среду в виде тонкой пленки, нанесенной на подложку. Возбуждение лазерно-активной среды производится внешним источником оптической накачки и может осуществляться как в продольном, так и в поперечном вариантах. Лазерное излучение, генерируемое в активном волноводе, распространяется по нему в виде волноводных ТЕ-, ТМ-мод и состоит из дискретного набора частот, определяемого размерами волновода.

Если лазерно-активная среда имеет чувствительность к каким-либо анализитам (в виде изменений спектральных или амплитудных характеристик), тогда возможно создание фотовозбуждаемого лазерного сенсора. Такие сенсоры, работая в пороговых режимах лазерной генерации, реагируют на незначительные изменения в окружающей среде, что вызывает изменения характеристик лазерной генерации в течение короткого промежутка времени [16, 17].

В представленной работе приведены результаты исследований люминесцентных и генерационных характеристик фотовозбуждаемого планарного волновода из полиметилметакрилата, допи-

* Работа выполнена в рамках научного проекта Приоритет 2030, проект № НУ 2.0.7.22 МЛ.

Прогноз фазовых флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере на основе текущих данных*

В.П. Лукин¹

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Описываются подходы для построения алгоритма управления системами адаптивной оптики (АО), использующего прогнозирование эволюции пространственных и временных распределений фазовых искажений в оптической волне при распространении в условиях атмосферной турбулентности и выработку управляющих сигналов для коррекции искажений волнового фронта в реальном масштабе времени. Анализируются основные закономерности эволюции фазовых искажений оптических волн, распространяющихся в турбулентной атмосфере колмогоровского типа. Определена предельно высокая частота работы датчика волнового фронта типа Шэка – Гартмана. Выполнено численное моделирование работы системы АО в замкнутом и открытом контурах слежения. Оценены ошибки в оценке параметров турбулентности при работе датчика волнового фронта на высоких частотах.

Ключевые слова: турбулентность, прогноз, адаптивная оптика, волновой фронт, алгоритм, ветер, эволюция.

Введение

В настоящее время решение задачи коррекции атмосферных искажений лазерного излучения на протяженных атмосферных трассах ведется по нескольким направлениям. Активно развиваются методы фазового и амплитудно-фазового управления пучком в системах адаптивной оптики (АО). В настоящее время интенсивно развиваются гибридные схемы, использующие различные методы адаптивной коррекции. Причем эти методы применяются как для наземных систем передачи энергии и информации лазерным пучком, так и для астрономических инструментов. Во многом подходы к построению адаптивных систем являются общими, однако для применения на астрономических трассах проявляется своя специфика. Прежде всего, она связана с тем, что необходимо применение опорного источника, называемого лазерной опорной звездой. На протяженных атмосферных трассах, помимо фазовых искажений, обуславливающих эффекты дрожания и размытия излучения, появляются «сильные» флуктуации интенсивности излучения, что приводит к появлению эффектов мерцания, а также к проявлению вихревых структур в описании фазовых искажений оптической волны. Одним из путей преодоления этих проблем является развитие высокоэффективных алгоритмов, использующих, в том числе, различного рода схемы прогнозирования флуктуаций корректируемых искажений волнового фронта. Поэтому будут затронуты вопросы, связанные с построением алгоритмов фазовой адаптивной коррекции, которые учитывают эволюцию волнового фронта, обусловленного ветровым движением турбулентности поперек трассы распространения оптических волн.

1. Эволюция фазовых искажений оптической волны

Известно, что атмосферная турбулентность представляет собой случайный процесс со стационарными первыми приращениями [1]. Поэтому эволюцию как самой турбулентности, так и обусловленных ее фазовых искажений $S(\vec{\rho}, t)$ в оптической волне, прошедшей слой атмосферной турбулентности, соответственно можно описать [1–3] как урезанный ряд Тейлора следующего вида:

$$S(\vec{\rho}, t + T) = S(\vec{\rho}, t) + \frac{dS}{dt}T, \quad (1)$$

где $\vec{\rho} = (x, y)$ – двумерный вектор для произвольной точки оптического поля в пределах апертуры системы; t – текущее время; T – достаточно короткий интервал времени.

Применив гипотезу [1] «замороженной турбулентности», временную производную флуктуаций фазы dS/dt можно записать как скалярное произведение двумерного вектора скорости ветра \vec{V} и пространственного градиента фазы $\nabla_{\rho} S(\vec{\rho}, t)$, т.е.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.915:544.228

DOI: 10.17223/00213411/67/2/14

Исследование структуры и особенностей химической связи тройных соединений бериллия Be_2NA ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) с использованием функций Ванье

В.С. Тимофеев¹, А.Б. Гордиенко¹, Ю.М. Басалаев²¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия² Кемеровский государственный медицинский университет, г. Кемерово, Россия

Проведен количественный анализ химической связи группы гипотетических соединений Be_2NA ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) с решеткой антихалькопирита. Построены максимально локализованные функции Ванье, и на основе положений их центров определена степень ионности связи.

Ключевые слова: антихалькопирит, электронная структура, функции Ванье, химическая связь.

В работе [1] были выполнены теоретические исследования группы гипотетических полупроводниковых соединений Be_2NA ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$), структура которых строилась на основе обращения структуры халькопирита (антихалькопирит) с помощью взаимной замены катионных и анионных подрешеток. Возможность существования таких кристаллов обусловлена полиморфизмом безводных бинарных соединений бериллия с галогеном [2] ($\text{BeF}_2, \text{BeCl}_2, \text{BeBr}_2, \text{BeI}_2$), которые в ходе реакции с кубической фазой нитрида бериллия $\alpha\text{-Be}_3\text{N}_2$ ($\text{Be}_3\text{N}_2 + \text{BeA}_2 \rightarrow 2\text{Be}_2\text{NA}$) [3, 4] при последовательном заполнении соответствующих подрешеток дают изокатионный ряд тройных, алмазоподобных соединений Be_2NA с решеткой антихалькопирита. Результаты расчетов [1] включают равновесные параметры решетки и координаты атомов, анализ электронной структуры, фононных спектров, а также ряд качественных выводов о характере химической связи, которые, учитывая важность задачи поиска новых соединений, обладающих заданными свойствами, требуют дальнейшей детализации, включая и соответствующие количественные оценки. Для решения этой задачи ключевым является использование методов пространственной локализации волновых функций, хорошо разработанных в квантовой химии молекул и подобных систем конечного размера (метод локализованных молекулярных орбиталей (ЛМО), или «орбиталей Бойса» [5]), но плохо применимых к протяженным периодическим системам. В этом случае аналогом ЛМО являются функции Ванье (ФВ) [6], а также их обобщение в форме максимально локализованных функций Ванье (МЛФВ) [7], которые очень близки по свойствам к ЛМО и определяются на основе дополнительного критерия «максимальной пространственной локализации», позволяющего решить проблему неоднозначности ФВ [6], обусловленную большим произволом выбора фазы одноэлектронных состояний кристалла. Область применения ФВ (МЛФВ) достаточно широка и, кроме очень удобного средства для анализа локальной структуры химической связи в кристаллах, что является целью работы, они используются для интерполяции зонной структуры, построения методов типа $O(N)$, решения проблемы самодействия и т.д.

Согласно [6], функции Ванье $|\mathbf{R}n\rangle$, где n и \mathbf{R} – соответственно номера энергетической зоны и ячейки, вычисляются как унитарное преобразование:

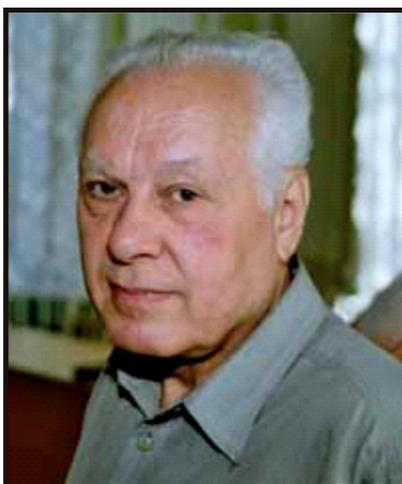
$$|\mathbf{R}n\rangle = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{BZ} d\mathbf{k} e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} |\psi_{n\mathbf{k}}\rangle,$$

где $|\psi_{n\mathbf{k}}\rangle$ – функции Блоха, и интегрирование проводится по всей зоне Бриллюэна. Для получения МЛФВ, как уже отмечено выше, необходимо использовать дополнительный критерий «максимальной пространственной локализации», который в работе [7] определен как условие минимального значения функционала дисперсии координаты, вычисляемого на функциях Ванье:

$$\Omega = \sum_n \left[\langle \mathbf{0}n | r^2 | \mathbf{0}n \rangle - \langle \mathbf{0}n | \mathbf{r} | \mathbf{0}n \rangle^2 \right] = \sum_n \left[\langle r^2 \rangle_n - r_n^2 \right] = \Omega_I + \Omega_V,$$

где Ω_I и $\Omega_V = \Omega_D + \Omega_{OD}$ – инвариантная и калибровочно-зависимая части Ω , а Ω_D и Ω_{OD} , в свою очередь, – диагональная и недиагональная составляющие Ω_V .

Вычисление максимально локализованных функций Ванье в настоящей работе осуществлялось с помощью программного пакета Wannier90 [8, 9], для визуализации использовалась программа VESTA [10], а

ПЕРСОНАЛИЯ**Памяти
Владислава Гавриловича Багрова**

ВЛАДИСЛАВ ГАВРИЛОВИЧ БАГРОВ
(1 октября 1938 г. – 28 января 2024 г.)

28 января 2024 г. ушел из жизни Владислав Гаврилович Багров, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки России, заслуженный профессор Томского университета – выдающийся ученый, педагог и организатор науки, основатель томской школы теоретической физики, воспитавший несколько поколений физиков-теоретиков.

В.Г. Багров принимал активное участие в создании квантовой теории синхротронного излучения. Им были теоретически исследованы спектрально-угловые и поляризационные характеристики синхротронного излучения ультрарелятивистских частиц, движущихся в ускорителях и накопителях, с учетом квантовых эффектов. В частности, был проведен анализ спиновых эффектов и всесторонне изучен эффект радиационной спиновой самополяризации в синхротронном излучении. Впервые были построены мгновенные угловые распределения синхротронного излучения для полного излучения и компонент линейной поляризации, методами квантовой теории для всей области значений физических параметров теоретически изучены свойства синхротронного излучения и проведен полный сравнительный анализ результатов, полученных методами классической теории и теории в ультрарелятивистском приближении. Им построена теория излучения заряженных частиц в плоских магнитных ондуляторах, в частности предсказана полная линейная поляризация этого излучения (что впоследствии было подтверждено экспериментально), проведены исследования алгебраической симметрии основных уравнений квантовой теории (уравнений Шредингера, Клейна – Гордона и Дирака), разработан метод генерации точно решаемых задач квантовой механики с помощью преобразования Дарбу. Сформулирован новый подход в методе квазиклассического приближения, введены понятия траекторно-когерентных и квазиклассически сосредоточенных состояний, позволившие распространить квазиклассический метод на новые области – статистическую физику и физическую кинетику.

В разные годы В.Г. Багров был руководителем крупных научных исследований, выполнявшихся в рамках грантов Президента РФ по поддержке ведущих научных школ, проектов ФЦП и РФФИ. В.Г. Багров – автор 480 научных трудов, 5 монографий (две из которых изданы за рубежом), 6 учебных пособий. Под его научным руководством защищено 43 кандидатские диссертации. Более 30 его учеников стали докторами наук.

В 1974 г. на физическом факультете Томского государственного университета по инициативе и под руководством В.Г. Багрова была создана кафедра электродинамики и квантовой теории поля (позднее переименованная в кафедру квантовой теории поля). В течение пятидесяти лет кафедра осуществляет подготовку элитных научных кадров по фундаментальным направлениям квантовой теории поля, теории элементарных частиц, теории излучения и математической физики. В 1988 г. на физическом факультете Томского государственного университета под научным руководством В.Г. Багрова создана лаборатория математической физики (ныне лаборатория теоретической и математической физики). В лаборатории выполнены десятки научных проектов международного уровня по широкому спектру направлений современной теоретической физики.

В.Г. Багров сыграл важную роль в организации еще одной кафедры – кафедры физики плазмы. Инициатива создания новой кафедры принадлежала директору вновь открытого в Томске академического Института сильноточной электроники (ИСЭ) члену-корреспонденту АН СССР Г.А. Месяцу. При самом деятельном участии профессора В.Г. Багрова в 1984 г. Г.А. Месяцу удалось основать и возглавить кафедру физики плазмы на физическом факультете ТГУ, а в новом академическом институте профессор В.Г. Багров возглавил лабораторию теоретической физики, где он по совместительству работал до конца своей жизни.

На протяжении 40 лет В.Г. Багров возглавлял совет по защите кандидатских, а с 1991 г. и докторских диссертаций, открытый в ТГУ в 1982 г. За это время в совете было защищено более 30 докторских и 120 кандидатских диссертаций по теоретической физике. В должности заведующего кафедрой и на посту председателя диссертационного совета проявились лучшие качества В.Г. Багрова: с одной стороны – безграничная преданность науке, широкая эрудиция, педагогический такт, научный талант, с другой – умение управлять научным коллективом, находить компромиссы при решении организационных и жизненных проблем.

В.Г. Багров – член оргкомитетов многих научных конференций, в том числе – международных ломоносовских конференций по физике элементарных частиц, организуемых с 1983 г. Московским государственным университетом, член оргкомитета и лектор международной летней школы-семинара по современным проблемам теоретической и математической физики «Волга» («Петровские чтения»), член редколлегий научных журналов «Гравитация и космология», «Пространство, время и фундаментальные взаимодействия», «Известия вузов. Физика».

Редакция журнала, коллеги, ученики, друзья искренне скорбят о кончине выдающегося ученого, педагога, организатора науки и замечательного человека – Владислава Гавриловича Багрова.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 2

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 19.02.2024. Выпуск в свет 27.02.2024. Заказ № 5792.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.11. Уч.-изд. л. 16.93. 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

