

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

8·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Август, 2024

№ 8 (801)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Синюков С.А., Кулагин А.Е., Шаповалов А.В. Динамическая система моментов для нелокального уравнения Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с дробной производной по времени в приближении слабой диффузии.....5

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Давыдов В.В., Гольдберг А.А., Проводин Д.С., Давыдов Р.В., Дудкин В.И. Новый метод формирования структуры линии нутации в ядерно-магнитных расходомерах-релаксометрах для различных режимов течения жидких сред15
- Ветлужский А.Ю. Ослабление приповерхностных электромагнитных полей магнитодиэлектрическими покрытиями.....30

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Юдин Н.Н., Слюнько Е.С., Подзывалов С.Н., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю., Власов Д.В., Габдрахманов А.Ш. Разработка дихроичного зеркала на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ для ЛИДАРных систем41
- Валиулина Л.И., Черепанов В.Н., Валиев Р.Р. Динамические электрическая и магнитная поляризуемости конформаций [28]гексафирина48

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Грабко Г.И., Батухтин А.Г. Анализ особенностей энергетического спектра локализованных состояний композитного состава на основе тонких слоев тетраоксида свинца59
- Выродова А.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И. Влияние двойникования и γ - ϵ -мартенситного превращения на механические и функциональные свойства монокристаллов CrMnFeCoNi высокоэнтропийных сплавов66
- Новицкая О.С., Лычагин Д.В., Филиппов А.В., Семенчук Н.В., Сизова О.В. Морфология деформационного рельефа в сплавах на основе железа и марганца при скретч-тестировании79
- Назаренко Н.Н., Князева А.Г. Физические особенности фильтрации двухфазной биологической жидкости в цилиндрической поре86
- Севостьянова И.Н., Савченко Н.Л. Влияние контактного трения между торцевыми поверхностями образцов и опорами испытательной машины на деформационное поведение высокопористой диоксидциркониевой керамики в условиях квазистатического одноосного сжатия94

CONTENTS

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Siniukov S.A., Kulagin A.E., Shapovalov A.V.** Dynamic system of moments for the nonlocal Fisher–Kolmogorov–Petrovskii–Piskunov equation with fractional time derivative in the weak diffusion approximation 5

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Davydov V.V., Gol'dberg A.A., Provodin D.S., Davydov R.V., Dudkin V.I.** A new method for forming the structure of the nutation line in nuclear magnetic flowmeters-relaxometers for different flow modes of liquid media 15
- Vetluzhsky A.Yu.** Attenuation of near-surface electromagnetic fields by magnetodielectric coatings 30

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Kuznetsov V.S., Zinoviev M.M., Yudin N.N., Slyunko E.S., Podzyvalov S.N., Lysenko A.B., Kalsin A.Yu., Vlasov D.V., Gabdrakhmanov A.Sh.** Development of a dichroic mirror based on $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ for lidar systems 41
- Valiulina L.I., Cherepanov V.N., Valiev R.R.** Dynamic electric and magnetic polarizabilities of [28]hexaphyrin conformations 48

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Grabko G.I., Batukhtin A.G.** Analysis of features of the energy spectrum of localized states of composite compound based on thin layers of lead tetraoxide 59
- Vyrodova A.V., Kireeva I.V., Chumlyakov Y.I.** Effect of twinning and γ - ϵ -martensitic transformation on mechanical and functional properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy single crystals 66
- Novitskaya O.S., Lychagin D.V., Filippov A.V., Semenchuk N.V., Sizova O.V.** Morphology of deformation relief in alloys based on iron and manganese during scratch testing 79
- Nazarenko N.N., Knyazeva A.G.** Physical properties of filtration of a two-phase biological liquid in a cylindrical pore 86
- Sevostyanova I.N., Savchenko N.L.** Influence of contact friction between the end surfaces of the samples and the supports of the testing machine on the deformation behavior of high-porous zirconium dioxide ceramics under conditions of quasi-static uniaxial compression 94

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.182

DOI: 10.17223/00213411/67/8/1

**Динамическая система моментов для нелокального уравнения
Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова
с дробной производной по времени в приближении слабой диффузии**С.А. Синюков¹, А.Е. Кулагин², А.В. Шаповалов^{1,3}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*³ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

Для популяционного уравнения Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с нелокальными конкурентными потерями и с дробной производной Капуто по времени порядка $0 < \alpha < 1$ получены динамические уравнения для системы моментов главного члена асимптотического решения в рамках разработанного ранее метода квазиклассических асимптотик в приближении слабой диффузии. Рассмотрен иллюстративный пример, для которого аналитическими и численными методами построены и исследованы приближенные решения динамической системы моментов при различных значениях параметра дробной производной α .

Ключевые слова: уравнение Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова, дробная производная, квазиклассические асимптотики, динамическая система моментов.

Введение

Эволюционные уравнения с дробной производной по времени используются для описания процессов с эффектами памяти (эридарности) в различных физических, биологических, химических и других системах (см., например, [1–6]).

Дробное дифференцирование, которое представляет собой интегро-дифференциальный оператор, существенно усложняет уравнение по сравнению с обычным дифференциальным уравнением с производными целого порядка. Свойства дробной производной таковы, что прямое применение известных аналитических методов и приемов интегрирования обычных дифференциальных уравнений, как правило, не приводит к желаемому результату [1, 3, 6]. Однако в отдельных случаях аналитические методы для обычных дифференциальных уравнений допускают модификацию и могут использоваться для некоторых дробно-дифференциальных уравнений (например, [6]).

В данной работе рассматривается обобщенное популяционное уравнение Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова (ФКПП) с нелокальными конкурентными потерями и с дробной производной по времени t ($t \geq 0$) типа Капуто (${}^C D_{0+,t}^\alpha$, $0 < \alpha \leq 1$) в случае одной пространственной переменной x , $-\infty < x < +\infty$, которое в безразмерном виде запишем следующим образом:

$$-{}^C D_{0+,t}^\alpha u(x,t) + \varepsilon u_{xx}(x,t) + a(x,t)u(x,t) - ku(x,t) \int_{-\infty}^{+\infty} b(x,y,t)u(y,t)dy = 0. \quad (1)$$

Производная Капуто ${}^C D_{0+,t}^\alpha$ (левосторонняя производная) по переменной t порядка α , $0 < \alpha \leq 1$, от некоторой вещественной функции $f(t)$ задается выражением (например, [2–6])

$${}^C D_{0+,t}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\xi)^{-\alpha} f'(\xi) d\xi, \quad f'(\xi) = df(\xi)/d\xi, \quad t \geq 0. \quad (2)$$

Здесь и далее будем полагать, что вещественная функция $u(x,t)$ представляет популяционную плотность и гладко зависит от своих аргументов таким образом, что выполняемые операции имеют смысл. Подробное описание свойств таких функций можно найти в [1–3]. Функция $u(x,t)$ по переменной x принадлежит пространству Шварца вместе со своими производными, что обеспечивает существование интеграла в уравнении (1) и существование всех необходимых в дальнейшем

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 53.082.2

DOI: 10.17223/00213411/67/8/2

**Новый метод формирования структуры линии нутации
в ядерно-магнитных расходомерах-релаксометрах
для различных режимов течения жидких сред**

В.В. Давыдов¹, А.А. Гольдберг¹, Д.С. Проводин¹,
Р.В. Давыдов^{1,2}, В.И. Дудкин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж.И. Алфёрова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы, возникающие при контроле параметров потока (расход, времена релаксации и число Рейнольдса) методом ядерного магнитного резонанса при быстром изменении его скорости в турбулентном режиме течения. Разработан новый метод формирования структуры линии нутации с намагнитченностью на уровне шумов от потока жидкой среды в сильном неоднородном магнитном поле. Проведены экспериментальные исследования линии нутации, формируемой от потока намагнитченной жидкости для различных его параметров. Подтверждена адекватность использования нового метода для измерения расхода жидкости q и времени продольной релаксации T_1 в текущем потоке. Предложены новые коэффициенты в уравнения Блоха, которые описывают движение трех компонент намагнитченности (M_x' , M_y' и M_z') в катушке нутации в потоке жидкости в сильном неоднородном поле. Для различных параметров магнитных полей и потока жидкой среды рассчитаны структуры линии нутации, которые соответствуют экспериментальным. Полученные экспериментальные и теоретические данные позволили установить соотношения между параметрами магнитных полей и скоростью потока (временем действия радиочастотного поля на намагнитченную жидкость в сечении трубопровода, на котором размещена катушка нутации) для обеспечения формирования линии нутации на уровне шумов.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, линия нутации, магнитное поле, неоднородность, поток жидкости, режим течения, отношение сигнал/шум, время продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации.

Введение

Исследование потоков жидких сред в настоящее время является одной из сложных задач в физике, особенно если необходимо применять метод, который позволяет проводить измерения в различных средах, включая агрессивные [1–4]. Кроме того, в ряде исследований необходимо обеспечить условие стерильности при измерениях (например, биологические растворы и медицинские суспензии). Отдельно стоит отметить тот факт, что проводимые измерения не должны вносить изменения в структуру потока жидкости и его химический состав [2–4], а также существенно изменять гидравлическое сопротивление в трубопроводе. Это возможно обеспечить только в случае, если для исследований и измерений использовать полностью бесконтактные методы или методы с минимальным контактом измерительных элементов с исследуемой жидкой средой [2, 4–6].

Использование явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с различными модификациями методов регистрации сигнала ЯМР является наиболее предпочтительным и эффективным для исследований структуры потоков и контроля его параметров по сравнению с другими методами. Это связано с тем, что регистрация сигнала ЯМР от потока жидкости реализована на резонансной частоте протонов (входят в состав 99.8% всех существующих жидких сред и их смесей), которые обладают наибольшей чувствительностью к методу ЯМР [5–8]. Поэтому при измерениях с использованием метода ЯМР в потоке жидкой среды нет ограничений на ее прозрачность, вязкость, наличие в ней пузырей, а также растворенных и нерастворенных примесей, в отличие от конструкций других измерителей. Кроме того, с использованием ЯМР можно измерять расход расплава различных солей или металлов, например, на резонансных частотах ядер лития – ^7Li , фтора – ^{19}F , фосфора – ^{31}P , бора – ^{11}B и других металлов, при наличии их концентрации в текущей среде, которая позволила бы обеспечить при регистрации сигнала ЯМР отношение сигнал/шум $(S/N) > 2.5$ [2, 5–8] в

Ослабление приповерхностных электромагнитных полей магнитодиэлектрическими покрытиями

А.Ю. Ветлужский¹

¹ *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Решена задача возбуждения вертикальным диполем магнитодиэлектрического слоя на проводящем основании. Получены аналитические выражения, позволяющие определить условия максимального ослабления приповерхностного поля, что может быть использовано для целей пространственной развязки бортовых антенн летательных аппаратов. Показано, что лучшими диапазонными свойствами обладают ослабляющие слои, образованные магнитодиэлектриками с комплексным характером как диэлектрической, так и магнитной проницаемостей. Проанализирована взаимосвязь отражающих и развязывающих свойств рассматриваемых покрытий.

Ключевые слова: магнитодиэлектрический слой, ослабление поля, развязка антенн, поверхностный импеданс.

Введение

Проблема взаимодействия излучения с плоскими границами раздела сред является одной из ключевых проблем радиофизики. Если в случае возбуждения границы плоской волной решение дифракционной задачи является достаточно тривиальным, то при рассмотрении источников излучения, имеющих конкретную пространственную локализацию, например, диполей, ситуация кардинально меняется. К числу таких задач относится классическая задача распространения радиоволн вдоль земной поверхности [1, 2]. В последние десятилетия активное развитие высокочастотной радиотехники и создание новых типов антенных устройств привели к тому, что проблема возбуждения локальными источниками плоских границ раздела сред получила развитие и в других разнообразных прикладных радиофизических задачах.

Одним из примеров подобных задач является проблема уменьшения взаимного влияния (пространственной развязки) антенных систем, размещаемых на летательных аппаратах. Наиболее целесообразным способом обеспечения развязки антенн в данном случае считается размещение на металлической плоскости между ними поглощающего электромагнитное излучение слоя или поверхностных развязывающих устройств, например, гребенчатых структур [3] или штырьковых слоев [4]. Термин «поверхностные» в данном случае означает, что устройства не выступают над плоскостями, образованными раскрытиями антенн (как правило, щелевых излучателей), не нарушая аэродинамические характеристики летательных аппаратов. Именно это в большинстве случаев играет решающую роль при выборе конкретных типов устройств ослабления поля (например, экранирующие элементы, позволяющие эффективно развязать антенны, в данном случае практически не используются). Указанные способы применяются для полей с вертикальной ориентацией электрического вектора относительно подстилающей поверхности. В случае горизонтальной поляризации эффективное ослабление помехового поля достигается размещением между антеннами металлической плоскости, поэтому такая ситуация нами рассматриваться не будет.

Как правило, в литературе физический принцип, лежащий в основе указанного метода ослабления поля, поясняется через использование понятия поверхностного импеданса, равного отношению касательных к поверхности компонент электрического и магнитного векторов поля. Распределение поля над такой поверхностью определяется знаком мнимой части поверхностного импеданса. В случае отрицательного ее значения (для временной зависимости компонент поля $e^{-i\omega t}$, используемой в настоящей работе) – индуктивный импеданс – поле концентрируется вблизи поверхности, иными словами распространяется поверхностная волна, характеризующаяся малой по отношению к распространению в свободном пространстве фазовой скоростью и экспоненциально убывающей при удалении от поверхности интенсивностью. Во избежание путаницы в терминологии следует отметить, что указанные поверхностные волны по своей природе принципиально отличаются от поверхностных волн Ценнека [5] и представляют собой резонанс одной из пространственных гармоник в спектре волн, создаваемых локальным источником поля. При емкостном импедансе поле оказывается «отжатым» от поверхности, т.е. сосредоточенным в некоторой области, удаленной от поверхности. Таким образом, в зависимости от характера поверхностного импеданса

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.375.826

DOI: 10.17223/00213411/67/8/4

Разработка дихроичного зеркала на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ для ЛИДАРных систем*

В.С. Кузнецов^{1,2,3}, М.М. Зиновьев^{1,2,3}, Н.Н. Юдин^{1,2,3},
Е.С. Слюнько^{1,3}, С.Н. Подзывалов^{1,3}, А.Б. Лысенко^{1,3},
А.Ю. Кальсин^{1,3}, Д.В. Власов¹, А.Ш. Габдрахманов^{1,3}

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

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

³ *ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия*

Проведено моделирование дизайна интерференционного покрытия из пары материалов $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ на подложке из кварцевого стекла. Создано дихроичное зеркало на основе рассчитанного дизайна с коэффициентами отражения $R \leq 1\%$ и $R \leq 99.6\%$ для спектральных диапазонов 1600–1750 и 2050–2100 нм соответственно.

Ключевые слова: дихроичное зеркало, параметрический генератор света, подложка, ЛИДАР, средний ИК-диапазон, ZnSe , ZnGeP_2 .

Введение

ЛИДАРные системы стали неотъемлемой частью современных технологий в различных областях, включая геодезию, автомобильную промышленность, дистанционное зондирование Земли и робототехнику [1–6]. Они используют лазерные излучатели и детекторы для измерения расстояния и создания детальных трехмерных моделей окружающего мира [7, 8]. ЛИДАРные системы обладают высокой точностью и разрешением, а также способностью работать в широком диапазоне условий, от ночного видения до плохой погоды [9]. В ЛИДАРных системах используются интерференционные оптические элементы – зеркала лазерного резонатора, интерференционные фильтры для выделения узких спектральных линий, светоделители и дихроичные зеркала [10]. Так как отраженный от атмосферы сигнал имеет низкую интенсивность, то к таким зеркалам разработчики систем предъявляют жесткие требования: к оптическим характеристикам пропускания и отражения излучения в заданных спектральных диапазонах, а также к лучевой прочности и износостойкости интерференционного покрытия. Важным этапом при разработке интерференционной оптики является подбор прозрачной (непоглощающей) подложки и пленкообразующих материалов в требуемом спектральном диапазоне. От этого в дальнейшем будет зависеть итоговое качество оптики, устанавливаемой в ЛИДАРный комплекс.

В связи с вышеизложенным целью работы является, во-первых, подбор пленкообразующих материалов для интерференционного многослойного оптического покрытия, выполняющего функцию дихроичного зеркала ЛИДАРной системы для неполяризованного излучения с $T > 98\%$ ($R < 2\%$) на длинах волн 1600–1750 нм и $R > 98\%$ ($T < 2\%$) на длинах волн 2050–2100 нм. Во-вторых, подбор подложек, прозрачных в требуемом спектральном диапазоне, а также на которые можно наносить многослойные диэлектрические покрытия с хорошей адгезией. На основании этой информации сначала необходимо было провести моделирование интерференционных покрытий в программном обеспечении Optilayer, а затем нанести их на выбранные подложки.

1. Оборудование и методы

При выборе подложки необходимо найти прозрачный, не имеющий резонансных пиков поглощения в заданном спектральном диапазоне материал. Для создания дихроичных зеркал подходит множество материалов, из которых мы хотели бы выделить селенид цинка, кварцевое стекло и сапфир.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193>.

Динамические электрическая и магнитная поляризуемости конформаций [28]гексафирина*

Л.И. Валиулина¹, В.Н. Черепанов¹, Р.Р. Валиев¹

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

Представлены результаты исследования динамических электрических и магнитных поляризуемостей для скрученной хюккелевской и мебиус-конформации расширенного порфирина (А,D-ди-р-бензи[28]гексафирин(1.1.1.1.1.1)). Предложена методика расчета динамической магнитной поляризуемости молекул. На уровне теории функционала плотности рассчитаны дипольные моменты и энергии перехода для 10 нижних синглетных возбужденных состояний рассмотренных молекул. Показано, что в исследованных конформациях расширенного порфирина имеются активные переходы как в электрическом дипольном, так и в магнитном дипольном приближениях с большими величинами дипольных моментов перехода. Вблизи частот, соответствующих данным переходам, электрическая и магнитная поляризуемости одновременно принимают отрицательные величины.

Ключевые слова: электрическая поляризуемость, магнитная поляризуемость, квантово-химический расчет, метаматериалы, расширенные порфирины.

Введение

Метаматериалы представляют собой искусственно модифицированные материалы с особой структурой, которые обладают специфическими свойствами, не встречающимися в природе. Метаматериалы состоят из большого числа периодически расположенных структурных единиц – «метаатомов», представляющих собой наноструктурные компоненты. Определенная таким образом структура метаматериалов позволяет получить отличительные свойства, несвойственные отдельным элементам, из которых они состоят. Одним из таких свойств является отрицательный показатель преломления, который был предсказан теоретически В.Г. Веселаго в 1968 г. [1]. Анализируя выражение для показателя преломления, В.Г. Веселаго пришел к выводу, что при одновременной реализации отрицательных величин диэлектрической проницаемости $\text{Re}(\epsilon)$ и магнитной проницаемости $\text{Re}(\mu)$ показатель преломления также должен быть отрицательным. В работе [1] он рассмотрел электродинамику материалов с $n < 0$ и показал, что для таких материалов характерна необычная реализация законов оптики, включая закон Снеллиуса, эффект Доплера и Черенкова. Кроме того, в материалах при $\text{Re}(\epsilon) < 0$ и $\text{Re}(\mu) < 0$ векторы $\mathbf{E}$ (электрическое поле), $\mathbf{H}$ (магнитное поле) и $\mathbf{k}$ (волновой вектор) образуют левую тройку векторов, поэтому часто в литературе материалы с отрицательным показателем преломления называют «Left-handed materials» (LHM) [1]. В частности, материалы с отрицательной величиной $\text{Re}(\epsilon)$ встречаются в природе в виде плазмы, в металлах на частотах ниже плазменной частоты [2].

Получить отрицательный электрический отклик $\text{Re}(\epsilon) < 0$ можно в широкой частотной области, от радио- до УФ-диапазона, в то время как магнитный отклик, как правило, ограничен частотами в микроволновом диапазоне [3]. Из-за отсутствия одновременной реализации $\text{Re}(\epsilon) < 0$ и $\text{Re}(\mu) < 0$ в материалах, встречающихся в природе, работа В.Г. Веселаго долгое время оставалась лишь теоретическим предсказанием, не имеющим экспериментального подтверждения. Однако в 2000 г. группа ученых из Сан-Диего экспериментально продемонстрировала необычные свойства композитных материалов, которые могли быть объяснены только, если предположить, что данные материалы имеют отрицательную величину показателя преломления [4]. Первый экспериментальный образец метаматериала с отрицательным показателем преломления представлял собой конструкцию, составленную из квадратных медных кольцевых резонаторов со щелью и полосок медных проводов, нанесенных на подложку из стекловолокна [5]. Медные провода подобно антеннам реагировали на действие электрического поля [6], а кольцевые резонаторы со щелью, действуя подобно LC-контуре, приводили к дисперсии магнитной проницаемости и резонансному отклику на

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00278).

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.31

DOI: 10.17223/00213411/67/8/6

Анализ особенностей энергетического спектра локализованных состояний композитного состава на основе тонких слоев тетраоксида свинца*Г.И. Грабко¹, А.Г. Батухтин¹¹ Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Приведены результаты анализа энергетического спектра ловушек в запрещенной зоне композитного состава – поликристаллических слоев Pb_3O_4 со связующим – кремнийорганическим лаком, осуществленного методом $It = f(lgt)$ характеристик. Плотность локализованных состояний уменьшается вглубь запрещенной зоны от дна валентной зоны, переходя от распределения с повышенной плотностью к дискретному характеру распределения энергетических уровней.

Ключевые слова: тетраоксид свинца, композитные составы, поляризационно-релаксационные процессы, метод $It = f(lgt)$ характеристик, локализованные центры, ловушечные состояния, ступенчатый сигнал.

Введение

Халькогениды и оксиды IV группы, в частности тетраоксид свинца Pb_3O_4 , представляющий собой модельный объект для изучения физических свойств металлооксидных соединений схожей структуры, являются предметом пристального внимания исследователей начиная со второй половины прошлого века и по сегодняшний день. Это обусловлено востребованностью данных материалов в различных областях электроники и других высокотехнологичных отраслях, в которых они либо уже используются, либо рассматриваются перспективы их применения [1–4]. Так, в [5, 6] изучаются термоэлектрические свойства теллурида свинца $PbTe$ с целью выяснения возможностей изготовления на его основе альтернативных источников, предназначенных для преобразования термической энергии в электрическую. Подобные работы в последние годы проводятся также на халькогенидах переходных металлов [7–12], в частности пирите FeS_2 [13, 14], так как данные исследования в настоящий момент особенно востребованы в области термоэлектрического материаловедения.

Не меньший интерес экспериментаторов вызывает изучение особенностей влияния кислорода на свойства соединений на основе поликристаллических слоев халькогенидов свинца [15–22]. Такое внимание обусловлено попытками расширения диапазона чувствительности ИК-фотоприемников в сторону длинноволновой области спектра, что является перспективным для развития оптоэлектронной техники, применяемой, в частности, при мониторинге земной поверхности [23, 24]. Для совершенствования излучающих и фотоприемных свойств поликристаллических слоев на основе халькогенидов свинца их подвергают термической активации в кислородсодержащей атмосфере. Этот процесс сопровождается образованием структуры, имеющей сложное фазное строение, одной из составляющих которой является свинецсодержащая оксидная фаза $Pb-O$. Что обуславливает необходимость комплексного анализа последней как с точки зрения уточнения ее физических свойств, так и выявления особенностей внутреннего строения.

Как было сказано выше, в качестве модельного объекта для изучения свойств обсуждаемых составов используются тонкослойные композитные пленки на основе поликристаллического ортоплатида свинца Pb_3O_4 . Несмотря на все усилия исследователей, до сих пор не выработан подход, позволяющий с единых позиций объяснять полученные к настоящему моменту экспериментальные результаты [1, 2, 25–28]. Так, в частности, в [25–27] была предложена модель, согласно которой энергетический спектр локализованных состояний в запрещенной зоне тетраоксида свинца имеет сложное строение и включает как распределенные, так и расположенные над ними дис-

* Исследование выполнено за счет государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

Влияние двойникования и γ - ϵ -мартенситного превращения на механические и функциональные свойства монокристаллов CrMnFeCoNi высокоэнтропийных сплавов*

А.В. Выродова¹, И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹

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

На $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ (ат.%) высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) исследованы влияние химического состава сплавов и температуры испытания на напряжения на пределе текучести $\sigma_{0.1}(T)$, механизм деформации (скольжение, двойникование и γ - ϵ -мартенситное превращение (МП)), коэффициент деформационного упрочнения $\theta = d\sigma/d\epsilon$, пластичность, разрушение и эффект памяти формы (ЭПФ) при растяжении. Показано, что при изменении концентрации Ni от 20 до 7 ат.% и Co от 20 до 33 ат.% в эквиатомном $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ ВЭС впервые был получен $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС с γ - ϵ МП при охлаждении и нагреве в свободном состоянии и под нагрузкой. γ - ϵ МП является обратимым и проявляет ЭПФ, максимальная величина которого $(7.4 \pm 0.02)\%$ получена в условиях изотермической деформации при 77 К с последующим нагревом в печи при 573 К в течение 15 мин. При 296 К в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС основным механизмом деформации являются скольжение и двойникование, которое развивается в одной системе. При 77 К в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС деформация с самого начала ($\epsilon = 5\%$) развивается, соответственно, двойникованием и ϵ -мартенситом в нескольких системах. Максимальный $\theta = 4576$ МПа и разрушение квазисколом наблюдали в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС при одновременном развитии нескольких вариантов ϵ -мартенсита при 77 К. Максимальная пластичность 57% достигалась при деформации двойникованием в нескольких системах в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{20}$ ВЭС при 77 К.

Ключевые слова: монокристаллы, высокоэнтропийные сплавы, скольжение, двойникование, γ - ϵ -мартенситное превращение, эффект памяти формы.

Введение

Величина энергии дефекта упаковки (ЭДУ) γ_0 является основным параметром в сплавах с графцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, определяющим механизм деформации: скольжение, двойникование и γ - ϵ МП (γ – ГЦК-решетка исходной фазы, ϵ – гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ) мартенситной фазы). Дислокационное скольжение наблюдается в ГЦК-сплавах с $\gamma_0 > 25$ мДж/м² при движении полных дислокаций $a/2\langle 110 \rangle$ по плотноупакованным плоскостям (111). В сплавах с более низкой $\gamma_0 = 10\text{--}20$ мДж/м² развивается двойникование и γ - ϵ МП за счет движения частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ [1]. Зарождение и рост двойников в ГЦК-сплавах может развиваться по типу дефекта упаковки (ДУ) вычитания при движении частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ в каждой плотноупакованной плоскости (111) (однослойный ДУ) или по типу ДУ внедрения при одновременном сдвиге двух частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ и $a/6\langle 121 \rangle$ в соседних плоскостях (111) (двухслойный ДУ). ϵ -Мартенсит образуется движением частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ по каждой второй из параллельных плоскостей (111) с образованием ДУ вычитания и является двухслойным ДУ, как и двойникование по механизму зарождения и роста ДУ внедрения. Так как двойникование и ϵ -мартенсит образуются движением частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$, то они являются конкурирующими механизмами деформации [1, 2]. Энергия двухслойного ДУ внедрения на 10–15% выше, чем однослойного ДУ вычитания. Следовательно, при одинаковых условиях деформации (температура и скорость деформации) γ_0 для развития γ - ϵ МП должна быть меньше, чем для двойникования по механизму зарождения и роста ДУ вычитания [2].

Двойникование и γ - ϵ МП оказывают разное влияние на механические свойства ГЦК-сплавов. γ - ϵ МП может быть обратимым и необратимым. На TWIP/TRIP сталях с необратимым γ - ϵ МП показано, что при одной температуре испытания развитие ϵ -мартенсита при деформации приводит к более сильному деформационному упрочнению, достижению более высокого уровня напряжений перед разрушением, чем при двойниковании, и к хрупкому или квазихрупкому разрушению [3, 4]. На $[\bar{1}11]$ -монокристаллах стабильной Fe – 18% Cr – 12% Ni – 2% Mo – 0.015% C и нестабильной

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00016.

Морфология деформационного рельефа в сплавах на основе железа и марганца при скретч-тестировании*

О.С. Новицкая¹, Д.В. Лычагин¹, А.В. Филиппов¹, Н.В. Семенчук¹, О.В. Сизова¹

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

Изучение морфологических особенностей рельефа, образованного при скретч-тестировании материала, может быть использовано в качестве оценки его пластичности и трещиностойкости. В данной работе рассматривается развитие деформационного рельефа на поверхности ГЦК-сплавов на основе Fe и Mn, а именно стали Гадфильда, TWIP-стали (TWIP – twinning-induced plasticity – пластичность, обусловленная двойникованием) Fe–22Mn–0.6C и высокоэнтропийного сплава Кантора. Царапание выполнялось на недеформированных материалах с линейно возрастающей нагрузкой от 0.5 до 100 Н. Анализ рельефа выполнялся с помощью лазерной конфокальной микроскопии. На основании полученных результатов для стали Гадфильда были диагностированы более низкие ресурс пластичности и трещиностойкости по сравнению с другими исследуемыми материалами.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, TWIP-сталь, сплав Кантора, скретч-тест.

Введение

Известно, что фундаментальные исследования природы деформационного поведения материалов резонно проводить на монокристаллах. Однако большинство конструкционных материалов производят и используют в виде поликристаллов. В большинстве случаев нарастающие напряжения и деформация вызывают повреждения, которые приводят к разрушению образца или необратимому изменению структуры.

ГЦК-сплавы на основе Fe и Mn благодаря сочетанию прочности и пластичности являются наиболее востребованными материалами, применяемыми в разных отраслях промышленности [1]. В настоящем исследовании рассматриваются яркие представители этого класса материалов: сталь Гадфильда, TWIP-сталь (Fe22Mn0.6C) и высокоэнтропийный сплав на примере сплава Кантора.

Сталь Гадфильда отличается высокой прочностью, пластичностью, износостойкостью и способностью к деформационному упрочнению. Последнее связывают с совокупностью ряда механизмов: мартенситное упрочнение [2], динамическое деформационное старение [3] и взаимодействие дислокаций с дефектами упаковки [4]. Кроме того, благодаря низкой энергии дефекта упаковки основным механизмом деформации может выступать как скольжение, так и/или двойникование [5, 6].

Fe22Mn0.6C также является аустенитной с ГЦК-структурой, благодаря двойникованию она характеризуется высоким деформационным упрочнением, большим равномерным удлинением и высоким пределом прочности на разрыв [7]. В основе оптимального сочетания механических свойств лежат склонность к двойникованию, эффект динамического деформационного старения, а также низкая ЭДУ [8, 9]. Специфический характер накопления плотности дислокаций в данных сталях и образование двойников деформации приводят к увеличению скорости деформационного упрочнения. К настоящему времени было проведено достаточно много исследований TWIP-сталей, связанных с вариацией их химического состава [10, 11], условиями нагружения [12, 13] и скоростью деформации [14].

Сплав Кантора является одним из первых однофазных ГЦК-сплавов с эквивалентным содержанием Fe, Cr, Co, Mn и Ni, который демонстрирует превосходное сочетание прочности и пластичности в диапазоне от комнатной температуры (298 К) до почти 80 К [15]. Такой комплекс механических свойств возможен благодаря реализации действия разных механизмов деформации на ранних стадиях деформации, а также хорошей трещиностойкости на поздних стадиях [16, 17].

Изучение деформационного рельефа дает важную информацию о закономерностях деформации и неоднородностях ее проявления. Характер деформационного рельефа зависит от материала и механизмов деформации. Метод лазерной конфокальной микроскопии позволяет получать количественные параметры, характеризующие деформационный рельеф. В частности, параметры рельефа могут быть изучены при механическом воздействии движущегося индентора (скретч-тести-

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

Физические особенности фильтрации двухфазной биологической жидкости* в цилиндрической поре

Н.Н. Назаренко¹, А.Г. Князева¹

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

Предложены два варианта модели фильтрации двухфазной биологической жидкости через двухслойную стенку капилляра. Проведено исследование влияния пористости и вязкости для двух моделей: Бакли – Леверетта и Рапопорта – Лиса. Результаты получились качественно одинаковыми. В случае учета капиллярных сил (модель Рапопорта – Лиса) или когда у жидкостей значительно отличаются вязкости, одна жидкость быстрее вытесняет другую. В модели Рапопорта – Лиса давление на выходе оказывается тем меньше, чем больше у несмешивающихся жидкостей отличаются вязкости. Показано, что пористость, структура слоев и вязкость оказывают влияние на распределение жидкости, что может быть важным при изучении течения биологических жидкостей в пористых биологических средах и тканях.

Ключевые слова: фильтрация, диффузия, пористость, капилляр, вязкость, двухфазная биологическая жидкость.

Введение

Многие процессы в живых системах, гидрологии и нефтяной инженерии приводят к задачам двухфазного течения [1]. Подобные задачи о фильтрации двухфазных жидкостей связаны с описанием эрозии почв и грунтов [2, 3], фильтрации загрязняющих веществ вблизи водохранилищ и других гидротехнических сооружений [4], процесса добычи нефти и газа [5] и моделированием извержения вулкана [6]. Двухфазная фильтрация имеет непосредственное отношение и к проблемам переноса субстанций в живых организмах. Например, в литературе кровь рассматривается либо как двухфазная жидкость, либо как двухслойная жидкость с несмешивающимися слоями. В случае мелких кровеносных сосудов кровь представляют как двухслойную жидкость. Например, в работах [7, 8] первый слой – это область ядра (неньютоновская жидкость или жидкость Карро); второй слой – область плазмы (Ньютоновская жидкость). В [9] кровь рассматривают как двухфазную жидкость: жидкая фаза представляет собой плазму, а твердая фаза – это блуждающие в ней эритроциты.

Кровеносная система человека состоит из крупных и мелких кровеносных сосудов. Мелкие – капилляры – состоят из эндотелиальных клеток, которые образуют барьер между кровью и внеклеточной жидкостью. Капилляры регулируют давление. При их расширении происходит снижение артериального давления, а при сужении, наоборот, повышение. Все физиологические процессы, протекающие в организме, связаны именно с изменением просвета капиллярных сосудов. Сужение и расширение капилляров играет роль во всех патологиях: травмы, воспаления, аллергии, инфекции и токсические процессы.

Наиболее часто используемой моделью в теории фильтрации двухфазных жидкостей в настоящее время является модель Бакли – Леверетта [10]. Систему уравнений в этой модели составляют обобщенный закон Дарси и законы сохранения масс обеих несмешивающихся фаз. Обобщенный закон Дарси подразумевает зависимость фазовых проницаемостей от объемных долей каждой из несмешивающихся жидкостей в поровом пространстве. Более полной моделью несмешивающейся фильтрации является модель Рапопорта – Лиса [10]. Система уравнений Рапопорта – Лиса включает в себя дополнительное уравнение, определяющее скачок давления на границе раздела фаз. Предполагается, что величина скачка давления является функцией насыщенности; вид этой функции определяется геометрией порового пространства. Среди моделей, учитывающих конечное время установления равновесия фаз в объеме пористой среды, наибольшую известность получила модель Баренблатта [10]. В ней вводится понятие эффективной насыщенности, отличающейся от реальной на величину, пропорциональную времени установления локального равновесия фаз. Влияние неравновесности приводит к возникновению зоны быстрого изменения насыщенности, представляющей собой тонкий пограничный слой. Толщина этого слоя прямо пропор-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0007.

Влияние контактного трения между торцевыми поверхностями образцов и опорами испытательной машины на деформационное поведение высокопористой диоксидциркониевой керамики* в условиях квазистатического одноосного сжатия

И.Н. Севостьянова¹, Н.Л. Савченко¹

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

Проведено исследование механических свойств и деформационного поведения керамики ZrO_2 –3 мол.% Y_2O_3 в диапазоне пористости $((40–60) \pm 2)\%$ в условиях квазистатического сжатия. Показано, что помимо пористости, на механические свойства пористой керамики, а также на процессы деформации и разрушения влияет контактное трение между торцевыми поверхностями образцов и опорными плитами испытательной машины. Повышение контактного трения между образцами и опорными плитами испытательной машины приводит к увеличению предела прочности при сжатии и эффективного модуля упругости образцов керамики с пористостью 40 и 50%. В образцах с пористостью 60% величина контактного трения не влияет на механические свойства. Уменьшение коэффициента контактного трения в керамиках с одинаковой пористостью приводит к изменению вида кривых «напряжение – деформация» от характерного для катастрофического хрупкого разрушения до квазивязкого за счет множественного микрорастрескивания. При этом вид обломков при разрушении образцов меняется от конусообразных фигур с основанием у торцевых поверхностей до ламелей, параллельных оси сжатия.

Ключевые слова: диоксид циркония, пористость, механические свойства, осевое сжатие, контактное трение, деформационные кривые.

Введение

Пористая керамика благодаря высокой химической и термической стойкости, износостойкости, биологической совместимости находит широкое применение в качестве функциональных, конструкционных, фильтрующих, теплоизоляционных материалов [1, 2]. При эксплуатации пористых керамических материалов важным обстоятельством является понимание особенностей их деформационного поведения в условиях механического воздействия, особенно в местах крепления или при соприкосновении керамики с другими частями конструкций. Известно, что функциональные высокопористые керамики (с пористостью выше 50%) обладают высокой толерантностью к возникающим дефектам [3–6]. При этом материал способен к дальнейшему деформированию, сохраняя остаточную прочность за счет множественного микрорастрескивания, что препятствует возникновению макротрещин, приводящих к катастрофическому разрушению [3, 7–10]. В том случае, когда образуются наклонные по направлению к оси сжатия зоны разрушения, причину их появления связывают с наличием контактного трения между торцевыми поверхностями образцов и опорными плитами испытательной машины [11–14]. Этот эффект связан с ограничением свободного расширения торцевых поверхностей образцов, в результате чего возникает неоднородное распределение напряжений по сечению образца при нагружении. Причем величина возникающих при нагружении напряжений радиально возрастает от центральной области образца к его краям [12].

Несмотря на обширные экспериментальные исследования деформации и разрушения пористых материалов, изучению влияния контактного трения между торцевыми поверхностями образцов и опорными плитами испытательной машины на деформационное поведение и особенностей формирования зон разрушения высокопористых керамик уделяется недостаточно внимания. Целенаправленное изучение деформационного поведения диоксидциркониевой керамики, частично стабилизированной оксидом иттрия $ZrO_2(Y_2O_3)$, в широком диапазоне изменения значений коэффициентов трения между опорными плитами испытательной машины и торцевыми поверхностями образцов поможет более детально и глубоко исследовать природу процессов деформации и разрушения высокопористых хрупких сред.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0005.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 8

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 19.08.2024. Выпуск в свет 27.08.2024. Заказ № 5996.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.86. Уч.-изд. л. 13.28. 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

