

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

9·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Сентябрь, 2025

№ 9 (814)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor,
Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Corr. Member RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, 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., Шаповалов А.В. Формирование структур в нелокальной одномерной модели Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с дробным лапласианом	5
Гасымов А.И., Джафаров Р.Г. К рассеянию векторных бозонов с обменом хиггсовской частицей в непертурбативном режиме	14
Титов Е.А., Жмудь В.А. Скорость счета парных совпадений для лазерного излучения при учете коллективных эффектов	21
Капшай В.Н., Павленко А.В., Гришечкин Ю.А. Двумерное двухчастичное квазипотенциальное уравнение в релятивистском конфигурационном представлении	29

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Оберемок А.А. Расчет режимов проветривания рудников глубокого залегания	43
---	----

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Николаев А.Г., Фролова В.П. Генерация многозарядных ионов в плазме субмикросекундного сильноточного вакуумного дугового разряда	53
Пинаев В.А., Константинов В.О., Щукин В.Г. Методика составления материального баланса при конверсии метана в электронно-пучковой плазме	61

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков Ан.А., Говорун И.В., Савин Д.Р., Шумилов Т.Ю. Коэффициенты связи дисковых диэлектрических резонаторов и полосно-пропускающий фильтр С-диапазона на их основе	66
--	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Данейко О.И., Матвиенко О.В. Влияние начальной плотности дислокаций на протекание процесса ползучести дисперсно-упрочненных материалов	75
Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Куксгаузен И.В., Федорова А.В., Куксгаузен Д.А. Эффект памяти формы при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситном превращении в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si	85
Шеховцов В.В., Улмасов А.Б. Формирование структуры и свойств композита $MgAl_2O_4:ZrO_2$, полученного методом плазменно-дугового синтеза	93
Осипов Д.А., Дитенберг И.А., Гриняев К.В. Особенности структурно-фазовой трансформации порошка Ti в условиях высокоэнергетической механической активации	102

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Иванова А.И., Корнева О.С., Дектярев С.В., Гурулев А.В. Формирование глубоколегированных слоев при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана высокой плотности мощности	108
--	-----

CONTENTS

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Siniukov S.A., Shapovalov A.V. Pattern formation in the nonlocal one-dimensional Fisher–Kolmogorov–Petrovskii–Piskunov model with fractional Laplacian.....	5
Gasymov A.I., Jafarov R.G. On the scattering of vector bosons with Higgs particle exchange in the non-perturbative regime.....	14
Titov E.A., Zhmud V.A. Pairwise coincidence count rate for laser radiation with collective effects taken into account.....	21
Kapshai V.N., Paulenka A.V., Grishechkin Yu.A. Two-dimensional two-particle quasipotential equation in a relativistic configuration representation.....	29

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Moiseev K.M., Krainov A.Yu., Lukashov O.Yu., Oberemok A.A. Calculation of the ventilation modes of deep-lying mines.....	43
---	----

PLASMA PHYSICS

Nikolaev A.G., Frolova V.P. Generation of multi-charged ions in plasma of submicrosecond high-current vacuum arc discharge.....	53
Pinaev V.A., Konstantinov V.O., Shchukin V.G. Technique for compiling a material balance during the conversion of methane in an electron-beam plasma.....	61

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Ya.F., Leksikov A.A., Govorun I.V., Savin D.R., Shumilov T.Y. Coupling coefficients of disk dielectric resonators and a C-band bandpass filter based on them.....	66
--	----

CONDENSED-STATE PHYSICS

Daneyko O.I., Matvienko O.V. Influence of initial dislocation density on the creep process of dispersion-hardened materials.....	75
Kireeva I.V., Chumlyakov Y.I., Kuksgauzen I.V., Fedorova A.V., Kuksgauzen D.A. Shape memory effect in reversible $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ martensitic transformation of the Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si alloy single crystals.....	85
Shekhovtsov V.V., Ulmasov A.B. Formation of the structure and properties of the $\text{MgAl}_2\text{O}_4\text{:ZrO}_2$ composite by plasma-arc synthesis.....	93
Osipov D.A., Ditenberg I.A., Grinyaev K.V. Features of the structural-phase transformation of Ti powder under high-energy mechanical activation conditions.....	102

BRIEF COMMUNICATIONS

Ivanova A.I., Korneva O.S., Dektyarev S.V., Gurulev A.V. Formation of deeply doped layers by repetitively-pulsed implantation of aluminum by high-power density titanium ion beams.....	108
--	-----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.182

DOI: 10.17223/00213411/68/9/1

Формирование структур в нелокальной одномерной модели Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с дробным лапласианом

С.А. Синюков¹, А.В. Шаповалов¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследуется динамика популяционной плотности в обобщенной одномерной модели Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с нелокальными конкурентными потерями и оператором Лапласа дробного порядка, описывающим аномальную диффузию. Построены численные решения при определенном выборе параметров уравнения для случая так называемого регионального дробного оператора Лапласа и для дробного оператора Лапласа в виде Капуто – Фабрицио. Построенные численные решения показывают, что в процессе эволюции локализованного в пространстве начального распределения популяционной плотности происходит формирование пространственно неоднородных распределений плотности в виде локальных максимумов, которые могут рассматриваться как примеры диссипативных структур. Исследовано влияние параметра дробного лапласиана на формирование структур.

Ключевые слова: популяционная динамика, аномальная диффузия, дробный лапласиан, уравнение Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова, формирование структур.

Введение

В теории реакционно-диффузионных (РД) систем (например, [1–3]) фундаментальной проблемой является изучение процессов формирования пространственно-временных диссипативных структур (ДС), отражающих процессы самоорганизации в нелинейных распределенных системах.

Наиболее изучены модели РД-систем, описываемые системой дифференциальных уравнений с двумя и более взаимодействующими компонентами и диффузией, описываемой законом Фика. Взаимодействие в таких системах имеет локальный характер, т.е. описывается функциями, значения которых берутся в одной точке пространства. Для однокомпонентных систем с локальным взаимодействием (самодействием) ДС не наблюдаются. Однако для систем с нелокальным взаимодействием, которые описываются интегродифференциальными уравнениями, сценарии формирования ДС более разнообразны, в том числе структуры могут возникать и в однокомпонентных нелокальных системах.

В [4–6] на примере нелокальной обобщенной модели Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова (ФКПП), описывающей эволюцию популяционной плотности, состоящей из особей одного вида, было продемонстрировано формирование пространственно неоднородных распределений популяционной плотности, которые можно рассматривать как примеры ДС. Диффузия Фика, которую называют нормальной, входит в уравнение ФКПП в виде обычного оператора Лапласа. Однако в средах со сложной, в том числе фрактальной, структурой, эффектами памяти, где также наряду с хаотическими столкновениями частиц происходят скачкообразные изменения значений динамических переменных системы под воздействием хаотически изменяющихся внешних факторов, наблюдаются отклонения от закона Фика. В таком случае диффузию называют аномальной. Одним из общепринятых подходов к математическому моделированию аномальной диффузии является модификация обычного оператора Лапласа в модельном уравнении оператором Лапласа дробного порядка, причем параметр дробного порядка характеризует структурные свойства среды [7, 8].

В [9] к нелокальному уравнению ФКПП с дробной производной по времени и нормальной диффузией применялся метод построения асимптотических решений в приближении слабой диффузии.

В настоящей работе исследуется динамика популяционной плотности в одномерной обобщенной нелокальной модели ФКПП с аномальной диффузией. Нелокальные взаимодействия в по-

К рассеянию векторных бозонов с обменом хиггсовской частицей в непертурбативном режиме

А.И. Гасымов¹, Р.Г. Джафаров^{1,2}

¹ Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

² Институт физических проблем Бакинского государственного университета, г. Баку, Азербайджанская Республика

В стандартной $SU(2) \times U(1)$ -теории электрослабого взаимодействия изучается рассеяние W^\pm - и Z -бозонов с обменом хиггсовскими бозонами в непертурбативном режиме. С использованием приближений лестничных диаграмм для амплитуд рассеяния в одночастичном и двухчастичном обменах формулируется универсальное уравнение типа Бете – Солпитера с минимально пертурбативным ядром. В случае одночастичного обмена в реджевской области изменения энергии найдено асимптотическое решение соответствующего уравнения для мнимой части амплитуды рассеяния вперед векторных бозонов в виде степенной функции полной энергии налетающих частиц.

Ключевые слова: спонтанное нарушение симметрии, бозоны Хиггса, непертурбативные приближения, уравнение Бете – Солпитера.

Введение и мотивация

Открытие в большом адронном коллайдере (БАК) коллаборацией ATLAS [1] и CMS [2] бозона Хиггса стандартной модели (СМ) с массой $M_H \approx 125$ ГэВ имеет далеко идущие последствия. Этот факт требует обратить особенное внимание на стабильность потенциала Хиггса. В частности, точное значение M_H определяет порядок величины константы самодействия λ на электрослабом (ЭС) уровне и позволяет изучать его поведение вплоть до высоких энергетических масштабов. Большее значение M_H означало бы, что константа самодействия λ станет непертурбативной на каком-то масштабе. Последствия нестабильности ЭС вакуума больших масштабов обсуждались, например, в работе [3] (см. также цитируемую в ней литературу). В работе [4] в непертурбативном режиме посредством лестничного уравнения Бете – Солпитера (БС) для амплитуды рассеяния бозонов Хиггса с обменом хиггсовским бозоном при трехлинейном и четырехлинейном взаимодействии сделана попытка теоретического описания константы самодействия λ .

Также известно, что связь бозона Хиггса с фундаментальными частицами определяется их массами [3]. Этот новый тип взаимодействия очень слаб для легких частиц, таких как u - и d -кварки и электроны, но является сильным для тяжелых частиц, таких как W - и Z -бозоны и t -кварк. Точнее, связи частицы Хиггса СМ с фундаментальными фермионами линейно пропорциональны массам фермионов, тогда как константа связи хиггсовских скаляров с векторными бозонами пропорциональна квадрату масс бозонов. Взаимодействия бозона Хиггса СМ с калибровочными бозонами и фермионами, а также с самими собой суммированы в лагранжиане [5]:

$$L = -g_{H\bar{f}f} \bar{f}fH + \frac{g_{HHH}}{6} H^3 + \frac{g_{HHHH}}{24} H^4 + \delta_G V_\mu V^\mu \left(g_{HGG} H + \frac{g_{HHGG}}{2} H^2 \right),$$

где $g_{H\bar{f}f} \equiv y_f = M_f/v$, $g_{HGG} = 2M_G^2/v$, $g_{HHGG} = 2M_G^2/v^2$, $g_{HHH} = 3M_H^2/v$, $g_{HHHH} = 3M_H^2/v^2$, $G = W^\pm$ или Z , $\delta_W = 1$, $\delta_Z = 1/2$ [5], $v = 246$ ГэВ. В результате доминирующие механизмы рождения и распада бозона Хиггса включают взаимодействие бозона Хиггса с W^\pm -, Z -бозонами, кварками и лептонами третьего поколения. Взаимодействие бозона Хиггса с глюонами [5–7] индуцируется в главном порядке однопетлевого процесса, в котором, в незначительном вкладе других более легких кварков, хиггсовский бозон участвует во взаимодействии с виртуальной $t\bar{t}$ -парой. Аналогично взаимодействие бозона Хиггса с фотонами также генерируется посредством петель, хотя в этом случае однопетлевая диаграмма с виртуальной парой W^+W^- обеспечивает доминирующий вклад [8] и деструктивно мешает меньшему вкладу, связанному с виртуальной $t\bar{t}$ -парой.

Скорость счета парных совпадений для лазерного излучения при учете коллективных эффектов*

Е.А. Титов¹, В.А. Жмудь¹

¹ *Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследуются корреляционные свойства флуктуаций числа фотонов в лазерном излучении для случая, когда полуширина линии пропускания резонатора много меньше поперечной ширины релаксации двухуровневого атома и много больше продольной ширины. Найдена зависимость коррелятора от времени. Показано, что имеется область параметров, где он испытывает осцилляции, вычислена частота этих осцилляций.

Ключевые слова: лазер, фотон, излучение, спектр, атомарный спектр, релаксация, резонатор.

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования флуктуаций числа фотонов в лазерном излучении остаются одной из актуальных задач лазерной физики. В частности, это важно для исследования и разработки радиационно-сбалансированных лазеров [1–12]. Математическая модель флуктуаций фотона, как и фотонный баланс, остаются в центре внимания теоретиков и составляют важную компоненту знаний для практического использования [13–19]. При отсутствии надежной теории подобные задачи некоторые авторы пытаются решать методами численного моделирования, в том числе методом Монте-Карло [20].

Настоящая работа посвящена исследованию корреляционных свойств флуктуаций числа фотонов в лазерном излучении для случая, когда полуширина линии пропускания резонатора много меньше поперечной ширины релаксации двухуровневого атома и много больше продольной ширины. Отыскивается зависимость коррелятора от времени. Показано, что имеется область параметров, где он испытывает осцилляции, вычислена частота этих осцилляций.

В работах [21, 22] приведено вычисление дополнительного вклада в ширину линии излучения полупроводникового лазера, который ранее не учитывался. Этот вклад увеличивает ширину линии по меньшей мере на порядок по сравнению с вкладом из-за спонтанного излучения. Появляется также дополнительный вклад в амплитудные флуктуации полупроводникового лазера. Речь идет о применении квантовой теории лазера [23–25] к вычислению флуктуаций излучения полупроводникового лазера. Необходимость этих вычислений была связана с тем, что прямой расчет ширины линии из-за спонтанного излучения дает результат в 20–25 раз меньше экспериментального [26, 27].

Задача исследования

В настоящей работе исследуются квантовые амплитудные флуктуации излучения лазера с учетом влияния коллективных эффектов для нестационарного случая. Квантовые флуктуации излучения лазера определяются флуктуациями числа фотонов в резонаторе и флуктуациями из-за спонтанного излучения и статистически независимы от флуктуаций, возникающих вследствие дискретного характера возбуждения атомов – типа дробового шума. Дисперсии квантовых и дробовых шумов складываются. Нас интересуют только квантовые флуктуации.

Методы решения задачи

Поставленная задача решается математическими методами, применяемыми к соотношениям, полученным в ряде публикаций [21, 22] с учетом результатов, полученных в работах [23–29], и применены некоторые математические соотношения из публикации [30]. Также к методам исследований относятся учет ограничений в виде неравенств, рассмотрение предельных случаев при

* Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, грант «Разработка научных методов прецизионных оптических измерений сейсмических, акустических и оптических полей и методов построения атмосферной ультрафиолетовой оптической связи с люминесцентными антеннами для мониторинга объектов с природной и антропогенной опасностью», регистрационный номер 121033100068-7 (2025 год).

Двумерное двухчастичное квазипотенциальное уравнение в релятивистском конфигурационном представлении*

В.Н. Капшай¹, А.В. Павленко¹, Ю.А. Гришечкин¹

¹ Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь

Сформулированы парциальные интегральные квазипотенциальные уравнения в двумерном релятивистском конфигурационном представлении. Определен явный вид парциальных функций Грина двумерного квазипотенциального уравнения Логунова – Тавхелидзе при произвольном значении орбитального квантового числа. Полученные уравнения применимы для описания в двумерном релятивистском конфигурационном представлении связанных состояний и состояний рассеяния систем двух скалярных частиц одинаковой массы. Предложена новая формулировка двумерных релятивистских скалярных парциальных волн, математически выраженных через функции Лежандра первого и второго рода с полуцелым нижним индексом и комплексным верхним индексом. Получено асимптотическое поведение и нерелятивистский предел релятивистских парциальных волн и парциальных функций Грина.

Ключевые слова: двухчастичная система, парциальная волновая функция, двумерное релятивистское конфигурационное представление, двумерное импульсное представление, двумерное уравнение Логунова – Тавхелидзе, двумерная функция Грина, связанные состояния, состояния рассеяния, квазипотенциальный подход.

Введение

Со времени первого экспериментального получения графена интерес к двумерным материалам заметно повысился, что обусловило необходимость разработки модельных описаний взаимодействия частиц в двумерных структурах. В настоящее время для моделирования взаимодействия частиц на плоскости наиболее часто используется двумерное уравнение Шредингера [1, 2] и двумерное уравнение Дирака [3]. Квазипотенциальные интегральные уравнения в импульсном (ИП) и в релятивистском конфигурационном представлении (РКП) в основном применялись для описания взаимодействия частиц в одномерном и трехмерном случаях.

Двумерные интегральные уравнения в РКП к настоящему времени фактически не были сформулированы. По этой причине для описания взаимодействий релятивистских частиц в планарных структурах применяются, кроме двумерного уравнения Дирака, двумерные квазипотенциальные интегральные уравнения в ИП и конечно-разностные квазипотенциальные уравнения в РКП [4]. В работе [5] получены точные решения двумерного интегрального уравнения Логунова – Тавхелидзе в импульсном представлении для четырех релятивистских аналогов потенциала гармонического осциллятора. В работе [4] найдены точные решения конечно-разностного уравнения в двумерном РКП с использованием потенциала гармонического осциллятора. Однако, как хорошо известно, конечно-разностные уравнения обладают тем недостатком, что их решения определяются с точностью до i -периодических функций (множителей). Это существенное неудобство отсутствует в другом подходе формулировки уравнений в РКП, основанном на использовании в этом представлении интегральных уравнений. Для того чтобы сформулировать такие парциальные уравнения, необходимо определить явный вид парциальных функций Грина в РКП [6].

Цель настоящей работы – определить явный вид двумерных парциальных функций Грина в двумерном РКП для квазипотенциального уравнения Логунова – Тавхелидзе, которое применяется для описания связанных состояний и состояний рассеяния систем, состоящих из двух скалярных частиц. С достижением этой цели будет обеспечена возможность формулировки и решения уравнений в РКП в интегральной форме. Это альтернативный, во многих случаях более удобный и, как показывает опыт работы с трехмерными интегральными уравнениями, всегда полезный, дополнительный метод исследования энергетического спектра и волновых функций, а на их основе различных физических характеристик двухчастичных систем.

* Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант по проекту Ф25М–004).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 533

DOI: 10.17223/00213411/68/9/5

Расчет режимов проветривания рудников глубокого залегания*К.М. Моисеева¹, А.Ю. Крайнов¹, О.Ю. Лукашов², А.А. Оберемок¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *ООО «Шахтэксперт-Системы», г. Кемерово, Россия*

Представлены результаты численного моделирования режимов вентиляции рудника глубокого залегания. Исследование выполнено с использованием прикладного коммерческого пакета Ansys Fluent. Проведены параметрические расчеты, позволившие определить оптимальные режимы подачи холодного воздуха в разветвленную выработку с нагретыми стенками. Определена теоретическая мощность воздухоохладителя для разных температур вмещающих пород.

Ключевые слова: численное моделирование, вентиляция, рудники, теплообмен, мощность охлаждения.

Введение

Вентиляция рудников является важным аспектом обеспечения безопасности и эффективности работы в подземных условиях. Она обеспечивает удаление вредных газов, пыли и других загрязнений из рабочей зоны, а также поддерживает оптимальный микроклимат для рабочих. Для моделирования вентиляции рудников используются различные методы и подходы. Они позволяют оценить эффективность существующих систем вентиляции, определить оптимальные параметры работы вентиляторов и разработать новые решения для улучшения условий труда. Одним из основных методов моделирования вентиляции является использование компьютерных программ и моделей [1]. Эти программы позволяют учесть большую часть факторов, влияющих на вентиляцию, таких как геометрия выработок, расположение источников загрязнения, характеристики вентиляторов и многих других. При моделировании вентиляции необходимо учитывать не только технические аспекты, но и экономические и экологические факторы. Например, выбор оптимального режима работы вентиляторов может снизить энергопотребление и выбросы вредных веществ в атмосферу.

В условиях глубокого залегания рудников, где температура пород может достигать высоких значений, обеспечение комфортных и безопасных условий труда становится сложной задачей. Для ее решения необходимо учитывать тепловые режимы подземных выработок, которые могут существенно влиять на условия работы персонала и эффективность производственных процессов. Тепловой режим рудника определяется совокупностью факторов, таких как температура горных пород, влажность воздуха, скорость движения воздушного потока и другие параметры. Эти факторы влияют на теплообмен между горными породами, воздухом и оборудованием, а также на тепловое состояние людей, работающих в руднике [2].

Охлаждение рудников представляет собой комплекс мер, направленных на поддержание оптимальной температуры внутри рудника и предотвращение перегрева оборудования и персонала. Это особенно важно для глубоких рудников, где температура породы может быть высокой, а также для рудников с высокой концентрацией людей и техники.

Проблема вентилирования глубоких рудников сводится к вопросам моделирования воздухо-распределения в разветвленных выработках с одновременной оценкой тепловых состояний рудника и оценкой мощности и себестоимости холодильных установок и прочего охладительного оборудования.

В [1] описываются методы моделирования вентиляции подземных рудников и выработок. В частности, работы по моделированию с использованием собственных кодов, в том числе, высо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2025-0012).

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 621.384

DOI: 10.17223/00213411/68/9/6

**Генерация многозарядных ионов в плазме
субмикросекундного сильноточного вакуумного дугового разряда***А.Г. Николаев¹, В.П. Фролова¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Многозарядные пучки ионов металлов находят применение как в фундаментальных исследованиях в области ядерной и атомной физики, так и в решении прикладных задач, таких как ионная модификация поверхности. Эффективным и простым в реализации методом получения ионов высоких зарядовых состояний является использование сильноточного вакуумного дугового разряда с длительностью импульса в единицы микросекунд и менее. В работе представлены экспериментальные результаты по генерации многозарядных ионов проводящих материалов в плазме вакуумной дуги с амплитудой тока около 3.5 кА и длительностью импульса 0.9 мкс. Исследован широкий спектр различных материалов катодов: свинец, гадолиний, лантан, олово, серебро, молибден, ниобий, цирконий, медь, титан, магний и углерод, обладающих различными физическими свойствами. Обсуждается зарядовый состав ионов в плазме дуги для различных материалов и факторы, влияющие на генерацию многозарядных ионов.

Ключевые слова: вакуумная дуга, многозарядные ионы, ионный пучок, средняя зарядность ионов.

Введение

Импульсные вакуумные дуговые ионные источники обеспечивают генерацию пучков твердотельных проводящих материалов [1], которые находят применение как в фундаментальных исследованиях, например, в качестве инжекторов ускорителей тяжелых ионов [2, 3], так и при решении прикладных задач, таких как модификация поверхности различных материалов [4–6]. При типичных для таких ионных источников параметрах вакуумного дугового разряда, т.е. при амплитуде импульса тока дуги в сотни ампер и длительности импульса в сотни микросекунд [7, 8], плазма дуги, а следовательно, и генерируемый ею пучок содержат ионы материала катода с максимальными зарядовыми состояниями от 1+ для углерода до 5+ для вольфрама [8–10], а среднее зарядовое состояние ионов не превышает 3+ [10]. Увеличение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги в таких источниках является актуальной задачей, поскольку расширяет их технологические возможности. С одной стороны, увеличение зарядовых состояний ионов позволяет увеличить энергию ионов в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения, а с другой, делает возможным получение пучков ионов с требуемой энергией при существенно меньшей величине ускоряющего напряжения, что положительно влияет на массогабаритные характеристики устройства, снижает затраты на его изготовление и уменьшает поток неиспользуемого рентгеновского излучения.

Для повышения зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги использовались различные подходы, такие как создание в катодной области дугового разряда сильного магнитного поля, принудительная импульсная модуляция тока дуги, инжекция в плазму дуги дополнительного пучка электронов, дополнительный нагрев электронов плазмы микроволновым излучением гиротрона в условиях электронного-циклотронного резонанса. Однако наиболее простой и эффективной из этих методик на данный момент является реализация сильноточной дуги с амплитудой тока несколько килоампер и с короткой длительностью импульса микросекундного уровня [11–13]. При этом к разрядному промежутку прикладывается напряжение уровня 10–15 кВ и на дистанции около 1 см от поверхности катода происходит пинчевание плазмы дуги под действием собственного магнитного поля [13], что приводит к росту температуры электронов плазмы и многократному увеличению зарядовых состояний ионов.

В данной работе представлены результаты исследования особенностей генерации многозарядных ионов широкого спектра материалов катодов, представляющих практически все периоды и

* Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 24-29-00249 (<https://rscf.ru/project/24-29-00249/>).

УДК 533.9.07+543.51

DOI: 10.17223/00213411/68/9/7

Методика составления материального баланса при конверсии метана в электронно-пучковой плазме*

В.А. Пинаев¹, В.О. Константинов¹, В.Г. Щукин¹¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Проведена конверсия метана в электронно-пучковой плазме с наложением дополнительного электромагнитного поля. С помощью *in situ* масс-спектрометрии зарегистрированы продукты, такие как ацетилен, этилен, этан, полученные в плазмохимических реакциях. Составлен материальный баланс процесса по углероду и водороду.

Ключевые слова: плазмохимическая конверсия метана, электронно-пучковая плазма, холодный плазмотрон, сверхзвуковая струя, масс-спектрометрия, внутренний стандарт.

Введение

Повышение эффективности конверсии метана в водород и углеводороды группы C_{2+} является актуальной задачей для современной химической промышленности. Одним из способов повышения скорости протекания реакций и, как следствие, высоких выходов продуктов является использование неравновесной низкотемпературной плазмы. Ввиду нетипичных для равновесных условий значений температур, концентраций заряженных частиц и радикалов, плотностей светового излучения низкотемпературная плазма позволяет достичь значительных величин удельной энергии и ускорить протекание химических реакций [1]. Однако чрезмерный нагрев исходного сырья и длительное время нахождения в зоне повышенных температур способны в итоге привести к снижению выхода синтезируемого продукта (углеводороды группы C_{2+}) и нежелательному отложению углерода в объеме реактора [1, 2]. Поэтому вопросы оптимального нагрева и своевременного охлаждения (закалки) зоны реакции являются первостепенными для оптимизации процессов синтеза в низкотемпературной плазме и повышения выхода продуктов.

Известны различные способы создания низкотемпературной плазмы. Большое внимание уделено исследованию процессов синтеза в дуговом, тлеющем, искровом и микроволновом разрядах [3–9]. Перспективными являются активно развивающиеся в настоящее время исследования диэлектрического барьерного разряда, позволяющего осуществлять конверсию метана в высшие углеводороды, преимущественно в ненасыщенные, такие как ацетилен и этилен, при достаточно мягких условиях [10, 11]. В данной работе конверсия метана осуществляется с помощью электронного пучка и индуктивно связанной плазмы [12]. Такой комбинированный способ активации исходного сырья позволяет получать плотную низкотемпературную плазму с регулируемым подогревом зоны реакции, а высокоскоростное расширение струи активированного газа – производить закалку синтезированного продукта, избегая его дальнейшей деструкции.

Основным недостатком плазмохимических методов является их низкая селективность по сравнению с термокаталитическими способами превращения углеводородов. Поэтому задача выбора оптимального режима конверсии для конкретного способа активации стоит особо остро и требует точного определения синтезируемых продуктов. В этой связи в данной работе приводятся результаты построения массового баланса продуктов синтеза в электронно-пучковой плазме с помощью *in situ* масс-спектрометрии с использованием газа внутреннего стандарта (гелия), который подается в зону реакции и заведомо не участвует в реакциях. Показано, что данный подход является действительным решением проблемы диагностики продуктов синтеза углеводородов и может быть использован на практике.

Экспериментальная установка и методика

Эксперименты проводились на газодинамической установке низкой плотности Института теплофизики СО РАН. Схема установки приведена на рис. 1. Источником плазмы служил холодный плазмотрон, состоящий из электронной пушки 1 с полым катодом и блока кольцевых сопел Лаваля 2. Электронная пушка генерировала электронный пучок 3 с энергией 7 кэВ и током 250 мА, ко-

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 122022800487-2.

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 535.39

DOI: 10.17223/00213411/68/9/8

Коэффициенты связи дисковых диэлектрических резонаторов и полосно-пропускающий фильтр С-диапазона на их основе*

Б.А. Беляев^{1,2}, А.М. Сержантов^{1,2}, Я.Ф. Бальва³, Ан.А. Лексиков³,
И.В. Говорун^{1,3}, Д.Р. Савин², Т.Ю. Шумилов³

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

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия,

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

Исследованы коэффициенты связи дисковых диэлектрических резонаторов, взаимодействующих через двухпроводниковый полосковый резонатор, расположенный в прямоугольной диафрагме металлического корпуса. Показано, что емкостное взаимодействие резонаторов меняется на индуктивное при собственной частоте полоскового резонатора ниже частот диэлектрических резонаторов. Обнаруженная особенность позволяет создавать миниатюрные многорезонаторные полосно-пропускающие фильтры с дополнительными емкостными и индуктивными связями, которые обладают не только высокой избирательностью, но и малой неравномерностью группового времени запаздывания в полосе пропускания. С использованием электродинамического анализа 3D-модели синтезирован миниатюрный фильтр 12 порядка с центральной частотой полосы пропускания $f_0 = 3.925$ ГГц и ее шириной 45 МГц по уровню 1 дБ от уровня минимальных потерь. В разработанном фильтре двухпроводниковый полосковый резонатор использован не только для реализации разных по знаку дополнительных связей между дисковыми резонаторами, но и для связи питающих линий на входе и выходе, что улучшает технологичность изготовления и повышает механическую прочность устройства. Характеристики фильтра подтверждают перспективность предложенной конструкции в создании миниатюрных частотно-селективных устройств систем космической связи.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, коэффициенты связи, полосно-пропускающий фильтр, дополнительная индуктивная и емкостная связь.

Введение

Уменьшение размеров и массы радиоаппаратуры, как известно, является особенно важной задачей при создании спутниковых систем связи. Значительную часть в общем объеме и массе радиоэлектронных устройств космических аппаратов занимают частотно-селективные устройства. Среди таких устройств выделяются многоканальные входные и выходные мультиплексоры, осуществляющие функцию частотного разделения (при приеме) и суммирования (при передаче) нескольких частотных каналов. В основе многоканальных мультиплексоров лежат высокоизбирательные фильтры с узкими полосами пропускания и высокой крутизной склонов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [1, 2]. В Ку-диапазоне для построения таких фильтров используют резонаторы на отрезках полых волноводов прямоугольного [3] или круглого сечения [4], которые на частотах выше 10 ГГц имеют сравнительно небольшие габариты при собственной добротности, достигающей величины $Q_0 = 7 \cdot 10^3$ для моды H_{10} [5] и $Q_0 = 2 \cdot 10^4$ для моды H_{11} [6]. Однако в С-диапазоне (3.4–8.0 ГГц) такие резонаторы имеют слишком большие размеры, поэтому не подходят для создания бортовых частотно-селективных устройств с удовлетворительными массогабаритными характеристиками. Для решения данной проблемы можно использовать резонаторы на основе отрезков коаксиальной линии передачи [1], однако они имеют сравнительно невысокие собственные добротности, поэтому часто не обеспечивают выполнение требований к крутизне склонов АЧХ в случае узких полос пропускания фильтров. Недостатком упомянутых выше волноводных конструкций фильтров, в связи с высокими требованиями к температурной стабильности их электрических характеристик, является необходимость изготовления полых металлических резонаторов из материала с малым температурным коэффициентом линейного расширения, напри-

* Работа выполнена в рамках целевого финансирования (гранта) № 308 от 18.12.24 г. между ФИЦ КНЦ СО РАН, Краевым фондом науки и АО «РЕШЕТНЁВ».

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.37

DOI: 10.17223/00213411/68/9/9

Влияние начальной плотности дислокаций на протекание процесса ползучести дисперсно-упрочненных материаловО.И. Данейко^{1,2}, О.В. Матвиенко^{1,2}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*

С использованием математического моделирования проведено исследование влияния начальной плотности дислокаций на процесс ползучести дисперсно-упрочненных материалов с алюминиевой матрицей и некогерентной недеформируемой упрочняющей фазой. Установлено, что на начальной стадии скорость деформации ползучести высока, затем по мере накопления дислокаций и уменьшения их подвижности следует быстрое снижение скорости деформации. При увеличении начальной плотности дислокаций величина мгновенной деформации уменьшается. Темп уменьшения мгновенной деформации увеличивается с ростом начальной плотности дислокаций.

Ключевые слова: математическое моделирование, пластическая деформация, дисперсно-упрочненные материалы, наноразмерные частицы, ползучесть.

Введение

Дисперсно-упрочненные алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности и машиностроения, особенно в компонентах авиационных двигателей, где они подвергаются воздействию повышенных температур во время работы. Длительное воздействие повышенных температур на эти компоненты постепенно приводит к явлениям ползучести и релаксации [1]. Под явлением ползучести понимается процесс нарастания во времени деформации тела, нагруженного постоянно действующим напряжением. Такая деформация чаще всего мала, в зависимости от величины нагрузки и температуры она может с течением времени постепенно прекращаться или, наоборот, продолжаться до разрушения [2]. Поэтому при математическом описании ползучести необходимо учитывать, что характеристики материала, в первую очередь зависимость между напряжениями и деформациями, содержат время явно или посредством некоторых операторов [3].

За последние десятилетия были проведены многочисленные исследования деформации ползучести и факторов, которые влияют на срок службы материала при ползучести. Например, модель Ларсона – Миллера [4] используется для прогнозирования срока службы материалов при высоких температурах и постоянных уровнях напряжения. Она учитывает влияние времени, температуры и напряжения на деформацию ползучести. Однако модель имеет ограничение в своей способности точно прогнозировать условия ползучести, поскольку такие факторы, как состав материала, переменные нагрузки и переменная температура, которые влияют на срок службы материала при ползучести, не были учтены. В работе [5] предложена модель повреждения материала при ползучести, которая учитывает историю повреждения и эффект нагрузки для описания поведения деформации ползучести металлических материалов при переменных напряжениях и температурах. Однако эта модель неточно предсказывает деформацию ползучести в условиях высокой переменной температуры.

Основными факторами, влияющими на ползучесть алюминиевых сплавов, являются нагрузка и температура. Два важных параметра ползучести – деформация ползучести и скорость деформации ползучести – имеют тенденцию увеличиваться с температурой, как сообщалось в исследованиях [6–9]. В [10] проведено исследование ползучести дисперсно-упрочненных алюминиевых материалов с матрицей из чистого алюминия и наночастицами оксида алюминия при сжимающих нагрузках и высокой температуре. Установлено, что увеличение массовой доли частиц приводит к увеличению сопротивления ползучести. Механические свойства дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов с различными типами упрочняющих частиц и их объемными долями были исследованы в [11]. Для анализа ползучести были использованы теоретические концепции, основанные

УДК 539.371: 548.55

DOI: 10.17223/00213411/68/9/10

Эффект памяти формы при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситном превращении в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si*

И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹, И.В. Куксгаузен¹, А.В. Федорова¹, Д.А. Куксгаузен¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На [001]- и $\bar{1}17$ -монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si (мас.%) при растяжении исследовано развитие обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситного превращения (МП) под нагрузкой и величина обратимой деформации $\epsilon_{обр}$ при температуре 77 К при последовательном увеличении деформации в цикле «нагрузка – разгрузка» и нагреве в свободном состоянии. Показано, что при развитии обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП в [001]-кристаллах на температурной зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ наблюдается вырождение стадии, связанной с образованием ϵ -мартенсита под нагрузкой. Величина обратимой деформации или эффекта памяти формы составила $\epsilon_{обр} = 2.2\text{--}2.3\%$ в [001]-кристаллах и $\epsilon_{обр} = 5\%$ в $\bar{1}17$ -кристаллах, которая оказалась значительно меньше, чем теоретическая величина деформации превращения при $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП для соответствующей ориентации при растяжении. Обсуждаются физические факторы, ограничивающие величину обратимой деформации в [001]- и $\bar{1}17$ -монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si.

Ключевые слова: монокристаллы, $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситное превращение, эффект памяти формы, растяжение.

Введение

Известно, что сплавы на основе железа Fe–Mn–Si с низкой величиной энергии дефекта упаковки (ДУ) $\gamma_0 \leq 19$ мДж/м² проявляют обратимое мартенситное превращение из γ -фазы (γ – гранцентрированная кубическая решетка) в ϵ -мартенсит (ϵ – гексагональная плотноупакованная решетка). ϵ -Мартенсит образуется при движении частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ через одну плотноупакованную плоскость $\{111\}_\gamma$ [1–3]. При развитии обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситного превращения (МП) в этих сплавах наблюдается эффект памяти формы (ЭПФ), который реализуется в результате образования ϵ -мартенсита под нагрузкой при движении частичной дислокации Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ и ее обратным движением при нагреве после снятия нагрузки [1, 4–7].

Обратимое $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП при растяжении во всех ориентациях развивается с самого начала деформации, но при этом величина ЭПФ зависит от ориентации кристалла [4, 8–10]. Максимальный ЭПФ при растяжении при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП наблюдали в ориентации $\bar{1}44$ с максимальным фактором Шмида $m_\epsilon = 0.5$ для образования ДУ вычитания, который имел значение 8–9.2% в монокристаллах сплава Fe–30Mn–1Si (мас.%) [8] и 15.7% в монокристаллах высокоэнтропийного сплава Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co_{34.5}Ni_{5.5} (ат.%) [9]. В ориентации [001] с $m_\epsilon = 0.23$ ЭПФ при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП имел минимальное значение при растяжении: 0.5–1.2% в монокристаллах Fe–30Mn–1Si (мас.%) [8] и 3.6% в монокристаллах высокоэнтропийного сплава Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₃₅Ni₅ (ат.%) [10]. Ориентационная зависимость величины ЭПФ определялась числом развивающихся под нагрузкой вариантов ϵ -мартенсита: одним вариантом в ориентации $\bar{1}44$ и несколькими в ориентации [001] [8–10]. Кроме того, ранее на монокристаллах аустенитной нержавеющей стали Fe–17%Cr–12%Ni–2%Mn–0.75%Si с низкой $\gamma_0 \leq 22$ мДж/м² было показано, что кристаллы с осью растяжения [001] являются неблагоприятными для развития $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП [11]. В [001]-кристаллах при растяжении, во-первых, фактор Шмида для скольжения $m_{ск} = 0.41$ больше, чем фактор Шмида $m_\epsilon = 0.23$ для образования ДУ вычитания зародыша ϵ -мартенсита, и, во-вторых, величина расщепления полной винтовой дислокации $a/2\langle 110 \rangle$ на частичные дислокации Шокли $a/6\langle 211 \rangle$ для зарождения ДУ вычитания в этой ориентации уменьшается в поле внешних напряжений [11]. В результате макроскопически $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП в [001]-кристаллах при растяжении не развивалось, в отличие от других ориентаций, для которых $m_\epsilon \geq m_{ск}$ [11].

В настоящей работе ставилась задача исследовать ЭПФ в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si (мас.%) с $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП, ориентированных для растяжения вдоль направления [001] и $\bar{1}17$. Выбор сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si обусловлен следующим обстоятельством. Во-первых, в выбранном сплаве замена атомов Mn атомами Cr и Ni может приводить к увеличению уровня напряжений на пределе текучести $\sigma_{0,1}$ исходной γ -фазы по сравнению со сплавом Fe–30Mn–1Si

* Результаты были получены за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00023, <https://rscf.ru/project/25-19-00023/>.

УДК 666.3-183.4

DOI: 10.17223/00213411/68/9/11

Формирование структуры и свойств композита $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{ZrO}_2$, полученного методом плазменно-дугового синтеза*

В.В. Шеховцов¹, А.Б. Улмасов¹¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Исследован процесс синтеза и фазообразования композита на основе алюмомагнезиальной шпинели (MgAl_2O_4) с введением диоксида циркония (ZrO_2) в среде плазмы дугового разряда. Такие композиты представляют значительный интерес благодаря своей высокой термостойкости, химической устойчивости и отличным механическим свойствам, что открывает широкие перспективы их применения в современной технике. Исследование направлено на выявление влияния ZrO_2 (от 5 до 20 мас.%) на структуру и физические свойства композита $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{ZrO}_2$. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что присутствие катионов Mg^{2+} в расплаве стимулирует стабилизацию ZrO_2 в кубическую модификацию. Методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа доказано, что введение ZrO_2 приводит к формированию особых межфазных структур, включая локализацию фазы эвтектического состава ($\text{Mg}:\text{Al}:\text{Zr} - 11.40:26.47:27.67$ мас.%) преимущественно по границам зерен с двумя морфологическими признаками: непрерывные дендритные включения и локализованные линейно-столбчатые структурные колонии. Определены особенности спекания керамических изделий на основе продуктов плазменного синтеза в диапазоне температур 1400–1600 °С.

Ключевые слова: шпинель, диоксид циркония, плазменное плавление, синтез, композиты, микроструктура.

Введение

Развитие современных материалов требует постоянного совершенствования технологий синтеза функциональных композитных продуктов с уникальными физико-химическими свойствами [1–3]. Одним из перспективных направлений является получение композиций на основе шпинели (MgAl_2O_4), допированных диоксидом циркония (ZrO_2) [4–6]. Эти материалы характеризуются высокой термостойкостью, химической устойчивостью и механической прочностью, что обуславливает их широкое применение в различных отраслях промышленности – от электроники до авиационной техники. Многочисленные исследования, посвященные синтезу и изучению свойств композитов на основе ZrO_2 и алюмомагнезиальной шпинели MgAl_2O_4 , демонстрируют широкий спектр методов и достигнутых результатов в области материаловедения. Так, согласно данным работы [7], введение добавки в количестве 20 мас.% стабилизированного иттрием диоксида циркония (YPSZ) позволяет существенно повысить твердость материала и вязкость разрушения. Твердость увеличивается с 406 HV до 1314 HV, а вязкость (трещиностойкость) возрастает с диапазона 2.5–3.45 МПа·м^{1/2} до значения 6.1 МПа·м^{1/2}. Оптимальные условия синтеза достигаются при температуре 1600 °С и выдержке продолжительностью два часа. В работах [8, 9] продемонстрировано, что добавление ZrO_2 интенсифицирует процесс образования шпинели и способствует уплотнению ее структуры. Образуется непрерывная сетчатая микроструктура, в которой частицы ZrO_2 формируют взаимосвязанную сетку с частицами MgO и MgAl_2O_4 . Это обеспечивает равномерное распределение фаз и улучшение механических характеристик материала.

Методы синтеза оказывают решающее влияние на формирование структурных особенностей композитов. Сегодня при создании материалов с участием тугоплавких фаз широко применяется метод искрово-плазменного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS), позволяющий формировать высокоплотные композиции с мелкодисперсной структурой, что значительно улучшает их функциональные характеристики. Например, в исследовании [10] было установлено, что использование метода SPS позволяет создавать материалы с размером зерна от 0.5 до 10 мкм, характеризующиеся повышенной стойкостью к деформации и уплотнению. Другим эффективным методом является горячее прессование (Hot Pressing, HP-sintering). Так, при обработке композита путем горячего прессования при температуре 1600 °С и осевом давлении 50 МПа, со скоростями нагрева 100 °С/мин в интервале температур 30–1500 °С и 20 °С/мин в диапазоне 1500–1600 °С, удалось достичь относительной плотности материала 99.61%, твердости 18.29 ГПа и вязкости разрушения при вдавливании 9.15 МПа·м^{1/2} [11].

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

Особенности структурно-фазовой трансформации порошка Ti в условиях высокоэнергетической механической активации*

Д.А. Осипов¹, И.А. Дитенберг¹, К.В. Гриняев¹

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

Методом рентгеноструктурного анализа выявлены особенности фазовой трансформации порошка титана в условиях высокоэнергетической механической активации. Установлено, что на фоне наноструктурирования в условиях высокоэнергетической механической активации исходного α -Ti происходит формирование наноразмерных фаз β -Ti и ω -Ti. В результате полнопрофильного анализа выявлено, что после обработки продолжительностью 1 мин формируется до 13% β -Ti и около 2% ω -Ti. Обработка продолжительностью 5 мин характеризуется увеличением объемных долей β -Ti и ω -Ti до 17 и 7% соответственно. Высказано предположение о том, что возможность стабилизации наноразмерной фазы β -Ti является следствием увеличения относительного вклада поверхностной энергии в свободную энергию.

Ключевые слова: титановый порошок, высокоэнергетическая механическая активация, рентгеноструктурный анализ, фазовая трансформация.

Введение

Сложившаяся к настоящему времени классификация сплавов на основе титана базируется на его фазовом составе, определяемом спецификой полиморфных превращений [1–4]. При этом хорошо известно, что помимо температурного воздействия фазовая трансформация титана может быть реализована в условиях больших пластических деформаций [1–7]. В частности, в условиях кручения под давлением обнаружено формирование ω -фазы [5–7], которая является метастабильной в рамках равновесной диаграммы состояний. Синхротронные исследования фазовой трансформации титана в условиях высоких давлений позволили обнаружить формирование фаз с искаженными ОЦК- и ГПУ-решетками [3, 8, 9]. Более того, на основе данных синхротронного исследования и теоретического анализа показана возможность перехода титана под высоким давлением в β -фазу (ОЦК) [3].

В настоящей работе методом рентгеноструктурного анализа проведено исследование фазовых трансформаций в порошке титана в условиях высокоэнергетической механической активации.

Материалы и методика исследования

Порошок Ti (99.9%, марки ПТОМ-2) был подвергнут высокоэнергетической механической активации (МА) продолжительностью 1 и 5 мин в планетарных шаровых мельницах АГО-2 с водяным охлаждением. Аналогично работе [10], в качестве мелющих тел использованы стальные шары диаметром 8 мм. Масса шаров в каждом из двух барабанов составляла 200 г. Масса обрабатываемого порошка в каждом барабане составляла 10 г. Центробежное ускорение шаров – 400 м/с² (40g). Для предотвращения окисления обработку и выгрузку образцов осуществляли в атмосфере аргона.

Исследование методом рентгеноструктурного анализа (РСА) проведено на дифрактометре «Shimadzu XRD 6000» с использованием CuK_α -излучения. В результате полнопрофильного анализа на основе метода Ритвельда с использованием программных продуктов Powder Cell 2.4 и «Match!», а также баз данных PDF-4 (The Powder Diffraction File 4) определены фазы, их параметры решеток, размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) и уровень микроискажений (ϵ). Достоверность рентгенопрофильного анализа определяли путем расчета R_p -фактора [11]. Разделение вклада в уширение дифракционных максимумов при определении размеров ОКР и уровня микроискажений ($\epsilon = \Delta d/d$) проведено путем построения графических зависимостей Вильямсона – Холла [12]. Объемные доли фаз Ti оценены с учетом их кристаллографического строения.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.93:537.525

DOI: 10.17223/00213411/68/9/13

Формирование глубоколегированных слоев при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана высокой плотности мощности*А.И. Иванова¹, О.С. Корнева¹, С.В. Дектярев¹, А.В. Гурулев¹¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследований формирования глубоколегированных слоев при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана высокой плотности мощности. Приведены результаты исследования закономерностей накопления примеси в условиях изменения тепловых полей приповерхностного слоя за счет увеличения объема образца и применения дополнительного теплоотвода. Показано, что синергия высокоинтенсивной имплантации и энергетического воздействия пучка ионов титана высокой плотности мощности 70 кВт/см² на поверхность алюминия обеспечивает формирование ионно-легированного слоя глубиной около 5 мкм, что на два порядка больше длины проективного пробега. Исследованы распределение температурных полей в приповерхностном слое при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана и фазовый состав.

Ключевые слова: синергия, имплантация ионов, энергетическое воздействие, титан, алюминий.

Ионная имплантация как метод модификации приповерхностных слоев изделий различного назначения широко известна уже не одно десятилетие [1–8]. Несмотря на большое количество исследований в данной области, классическая ионная имплантация при плотностях токов 1–100 мА/см² [9–11] ограничивается небольшой глубиной ионно-модифицированного слоя на уровне длины проективного пробега ионов в веществе. Для формирования ионно-модифицированных слоев больших глубин необходимо увеличивать плотность ионного тока, а соответственно, и флюенсы облучения. Новый метод высокоинтенсивной ионной имплантации обеспечивает плотность импульсного тока до 5 А/см² и флюенсы облучения до 10²² ион/см² [12].

Экспериментальные исследования проводились на комплексной установке, описанной в работе [13]. Формирование легированных слоев при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана высокой плотности мощности 70 кВт/см² проводилось при частоте импульсов 8 имп./с и времени облучения 60 мин. Ток дугового разряда составлял 160 А. Доза облучения – 2.4·10¹⁸ ион/см². Образцы из алюминия были расположены на вращающемся вокруг своей оси подложкодержателе при частоте вращения 8.8 оборотов в минуту. Для исследования зависимости накопления примеси по глубине от температурных полей были подготовлены два образца с разными размерами и их размещением. В первом случае квадратный образец со стороной 20 мм располагался на подложкодержателе, закрепленном с двух сторон с помощью шпилек М4 на расстоянии 65 мм от оси вращения вала. Во втором случае с целью улучшения теплоотвода образец прямоугольной формы 40×20 мм располагался на цилиндрической дюралюминиевой вставке диаметром 18 мм и длиной 42 мм. Для исследования накопления примеси по глубине модифицированного слоя были изготовлены поперечные шлифы образцов. Толщины модифицированного слоя и распределение примеси по глубине определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400 N, оснащенного энергодисперсионной приставкой Bruker XFlash 4010. Изучение фазового состава исследуемых образцов выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА) на основании дифрактограмм, полученных с помощью дифрактометра XRD-7000 фирмы «Shimadzu». Для измерения температуры поверхности образцов применялся высокоскоростной инфракрасный пирометр KLEIBER KGA 740-LO.

Численным моделированием были проведены расчеты температурных полей по глубине приповерхностного слоя образца из алюминия, модифицированного ионами титана (рис. 1). Температура плавления алюминия составляет 660 °С. Результаты математического моделирования показывают, что в первом случае имеет место подплавление приповерхностного слоя к концу действия каждого импульсного воздействия на глубину около 3 мкм. Во втором случае температура не превышает температуру плавления.

Экспериментальные исследования показали следующие результаты. Средняя температура поверхности алюминия к концу действия каждого импульса при облучении пучком ионов титана на основании данных пирометра в первом случае достигала ~ 700 °С. Во втором случае была на уровне 650 °С.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10061, <https://rscf.ru/project/22-79-10061/>.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 9

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

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

Подписано к печати 18.09.2025. Выпуск в свет 25.09.2025. Заказ № 6455.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 13.02. Уч.-изд. л. 14.58. 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

