

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

3·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Март, 2025

№ 3 (808)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02
Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>
E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Лозовой К.А., Дирко В.В., Коханенко А.П., Кукенов О.И., Плотников Н.В., Акименко Н.Ю., Войцеховский А.В.
Новые двумерные графеноподобные материалы и гетероструктуры.....5

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Валиулина Л.И., Валиев Р.Р., Насибуллин Р.Т., Мерзликин Б.С., Тугульдурова В.П., Черепанов В.Н.
Вычисление матричных элементов оператора неадиабатичности с учетом эффекта ангармоничности
молекулярных колебаний16
- Шолыгин И.О., Фомин Д.В., Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Чернев И.М., Поляков А.В. Формирование и свойства
фотодиодных структур Al/Mg₂Si/Si/Au-Sb22
- Пашаев А.М., Велиев Н.А., Мамедов И.Х., Аскеров К.А., Мусаев А.А., Аллахвердиев К.Р. Применение ИК-
абсорбционной фурье-спектроскопии для идентификации сырых нефтей Апшеронского полуострова
Азербайджана32

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Перевозников Е.Н. Критериальный анализ динамики процесса теплопроводности на примере модельной системы40
- Лобода Е.Л., Медведева Т.И., Касымов Д.П. Исследование динамики температурного поля на торцевой
поверхности строительных материалов на основе древесины при воздействии лучистого теплового потока.....47

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Магкоев Т.Т. Исследование валентной зоны легированного железом германия методами рентгеновской
фотоэлектронной спектроскопии и теории функционала плотности54
- Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В. Диэлектрические свойства композита на основе пористого
тефлона, заполненного сегнетоэлектриком SC(NH₂)₂60

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Вагнер Д.В., Карева К.В., Журавлев В.А., Минин Р.В., Доценко О.А., Баскакова К.И., Кеда И.С. Фазовый
состав, структура и магнитные свойства ферритов никеля, полученных методом золь-гель-горения66

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Абдулвагабова С.К., Эфендиева И.К. Исследование 0^+ -возбуждений в ядрах с учетом остаточных сил.....74
- Шатохин В.В., Авдюшев В.А. Исследование точности определения орбит космических аппаратов ГЛОНАСС при
различных обстоятельствах наземных наблюдений81
- Кулагин А.Е., Шаповалов А.В. Квазиклассический подход для обобщенного уравнения Хауса, описывающего
излучение в резонаторе лазера с импульсной накачкой.....90

CONTENTS

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Lozovoy K.A., Dirko V.V., Kokhanenko A.P., Kukenov O.I., Plotnikov N.V., Akimenko N.Y., Voitsekhovskii A.V.** Novel two-dimensional graphene-like materials and heterostructures 5

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Valiulina L.I., Valiev R.R., Nasibullin R.T., Merzlikin B.S., Tuguldurova V.P., Cherepanov V.N.** Calculation of nonadiabatic matrix elements considering the anharmonicity effects of molecular vibrations 16
- Sholygin I.O., Fomin D.V., Galkin N.G., Galkin K.N., Chernev I.M., Polyakov A.V.** Formation and properties of Al/Mg₂Si/Si/Au–Sb photodiode structures 22
- Pashayev A.M., Veliyev N.A., Mamedov I.Kh., Askerov K.A., Musayev A.A., Allahverdiyev K.R.** Application of IR absorption fourier spectroscopy for identification of crude oils of the Absheron peninsula of Azerbaijan 32

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Perevoznikov E.N.** Criterial analysis of the dynamics of the heat conduction process using a model system as an example 40
- Loboda E.L., Medvedeva T.I., Kasymov D.P.** Study of the physicochemical processes in wood-based building materials under exposure to radiant heat flux 47

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Magkoev T.T.** Investigation of the valence band of germanium doped with iron by means of X-ray photoelectron spectroscopy and density functional theory 54
- Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Stukova E.V.** Dielectric properties of a composite based on porous teflon filled with ferroelectric SC(NH₂)₂ 60

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Wagner D.V., Kareva K.V., Zhuravlev V.A., Minin R.V., Dotsenko O.A., Baskakova K.I., Keda I.S.** Phase composition, structure, and magnetic properties of nickel ferrites produced by sol-gel combustion 66

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Abdulvahabova S.G., Afandiyeva I.G.** Study of 0⁺-excitations in nuclei with residual forces included 74
- Shatokhin V.V., Avdyushev V.A.** Study of the accuracy of determining the orbits of GLONASS spacecraft under various circumstances of ground-based observations 81
- Kulagin A.E., Shapovalov A.V.** Semiclassical approach for the generalized Haus equation describing the radiation in a cavity of a laser with pulsed pumping 90

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/68/3/1

Новые двумерные графеноподобные материалы и гетероструктуры*

К.А. Лозовой¹, В.В. Дирко¹, А.П. Коханенко¹, О.И. Кукунов¹,
Н.В. Плотников¹, Н.Ю. Акименко², А.В. Войцеховский¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

Успехи в синтезе двумерных графеноподобных материалов – трансграфенов – стимулируют интерес ученых к поиску новых элементов периодической системы, имеющих двумерные аллотропные модификации. Это привело к успешному получению в последние годы таких новых одноэлементных 2D-материалов, как бериллен (Be), индий (In), молибден (Mo) и голден (Au). Помимо этого, активно развиваются методы создания различных производных трансграфенов – их соединений с другими элементами. Кроме того, в последнее время появляется все больше работ по созданию гетероструктур на основе двумерных материалов. Данный обзор посвящен новым двумерным аллотропным модификациям одиночных элементов, методам создания 2D-гетероструктур, а также их приборному применению.

Ключевые слова: двумерный кристалл, бериллий, индий, молибден, золото, бериллен, индий, молибден, голден, трансграфены, молекулярно-лучевая эпитаксия, гетероструктура.

Введение

С момента получения в 2012 г. силицена [1–3] – первого представителя семейства графеноподобных двумерных материалов [4–8], количество таких материалов чрезвычайно разросло [9–13]. Теперь в число трансграфенов входят элементы от II до VI группы в периодической таблице, включая и некоторые побочные подгруппы [14–17].

Существует два основных подхода к созданию 2D-материалов. С одной стороны, это подход «снизу вверх», означающий послойное эпитаксиальное выращивание на подходящей подложке, а с другой – «сверху вниз», объединяющий традиционные механические и недавно появившиеся химические методы отслаивания монослоев. Эпитаксиальные методы позволяют тщательно контролировать морфологию поверхности на атомарном уровне. Кроме того, эпитаксиальные методы эффективны для получения двумерных слоев большой площади. Тем не менее, с точки зрения массового производства, выход таких структур довольно ограничен, а стоимость их, как правило, высока из-за необходимости поддержания в установке сверхвысокого вакуума. Напротив, химические методы могут обеспечить экономически эффективное массовое производство двумерных структур в ущерб их качеству. Механическое же отслаивание позволяет получать дешевые структуры достаточно высокого качества, но с невысоким выходом. Недостатком этого подхода также является его применимость только к ограниченному числу материалов.

Развитие технологии получения двумерных материалов проложило путь к разработке новых приборов на основе двумерных слоев, имеющих фундаментальные отличия от объемных материалов по своим физическим свойствам [18–23]. Особую роль здесь приобретают производные трансграфенов – графеноподобные слои, функционализированные различными лигандами [24–28], а также 2D-гетероструктуры – контакты двух различных двумерных слоев [29–33].

Производные графена и трансграфенов создаются путем создания ковалентных π -связей атомов двумерного слоя с ионами водорода (например, графан $(\text{CH})_n$, силикан $(\text{SiH})_n$, германан $(\text{GeH})_n$ и другие трансграфаны с общей формулой $(\text{XH})_n$, где X – это один из элементов, образующих исходный двумерный материал: C, Si, Sn, Pb, B, P и т.д.) или другими лигандами (например, катионами металлов, гидроксильными группами, органическими радикалами) [5].

Другим трендом развития технологии 2D-материалов является в настоящий момент создание двумерных гетероструктур с вертикальной или латеральной геометрией. В первом случае слои

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.37

DOI: 10.17223/00213411/68/3/2

Вычисление матричных элементов оператора неадиабатичности с учетом эффекта ангармоничности молекулярных колебаний*

Л.И. Валиулина¹, Р.Р. Валиев¹, Р.Т. Насибуллин¹,
Б.С. Мерзликин¹, В.П. Тугульдурова¹, В.Н. Черепанов¹

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

Проведены оценки ангармонических поправок для акцептирующих и промотирующих мод в молекуле тетраокса[8]циркулена. Оценки проводились для характеристических мод, соответствующих валентному колебанию Х–Н-связей, деформационному колебанию и валентному колебанию С–С-связи. Определено, что вклад ангармонических поправок наиболее выражен для промотирующих мод. Установлено, что в молекуле тетраокса[8]циркулена только 2 моды относятся к акцептирующим модам и 8 мод являются промотирующими. Для данных мод вклад ангармонических поправок от смешанных производных потенциальной энергии по нормальным координатам незначителен, что позволяет использовать при расчетах константы скорости внутренней конверсии приближение невзаимодействующих мод. В рамках теории возмущений первого порядка получены выражения для расчета константы скорости внутренней конверсии с учетом ангармонизма.

Ключевые слова: тетраокса[8]циркулен, акцептирующая мода, промотирующая мода, фотофизические процессы, константа скорости внутренней конверсии, ангармонизм, теория возмущений.

Введение

Константы скоростей электронных переходов между электронными состояниями молекул играют ключевую роль в оценке квантового выхода фотофизических процессов [1–4]. В частности, знание констант скоростей флуоресценции и безызлучательных электронных переходов позволяет оценить квантовый выход флуоресценции, который является основным параметром, определяющим перспективность применения молекул в качестве источников излучения. Важно отметить, что константа скорости внутренней конверсии, определяющая безызлучательный перенос энергии из возбужденного электронного состояния в колебательные состояния среды или в колебания молекулы в конечном электронном состоянии без изменения спина, является наиболее сложной для вычисления [5].

Возбужденные моды, участвующие в процессе внутренней конверсии, делятся на два типа: акцептирующие и промотирующие [6]. Акцептирующие моды вносят значительный вклад во франк-кондоновский фактор, тогда как промотирующие моды влияют на матричные элементы оператора неадиабатичности между ядерными волновыми функциями начального и конечного электронных состояний. В ходе неоднократных исследований [6–9] установлено, что в процессе внутренней конверсии промотирующими являются моды с высокой частотой ($\omega \geq 3000 \text{ см}^{-1}$) и малым значением фактора Хуанга – Риса ($\gamma \approx 0$), в то время как акцептирующие моды характеризуются частотой в пределах от 400 до 1700 см^{-1} и имеют большие значения фактора Хуанга – Риса ($\gamma \approx 0.1\text{--}1$).

Для точного вычисления константы скорости внутренней конверсии необходимо учитывать ряд важных эффектов, включая ангармоничность колебаний, эффект Душинского и эффект Герцберга – Теллера [10, 11]. Среди перечисленных эффектов наиболее значимым является эффект ангармоничности. Одним из популярных способов учета эффекта ангармоничности является модель Морзе, которая хорошо подходит для учета ангармоничности колебаний двухатомных молекул [12]. В 2021 г. было продемонстрировано [13], что модель Морзе является также оптимальной для учета эффекта ангармоничности высокочастотных валентных колебаний ($\sim 3300 \text{ см}^{-1}$), связанных с Х–Н-связями (где Х = N, O или C), в многоатомных молекулах. Однако модель является уже менее эффективной для колебаний, связанных с изменением длин внутренних связей за счет растяжения

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-73-10081).

Формирование и свойства фотодиодных структур Al/Mg₂Si/Si/Au–Sb*

И.О. Шолыгин¹, Д.В. Фомин¹, Н.Г. Галкин²,
К.Н. Галкин², И.М. Чернев², А.В. Поляков¹

¹ Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

В условиях сверхвысокого вакуума на подложке Si (111) методом послойного соосаждения пар слоев Mg и Si при температуре 250 °С на предварительно сформированный аморфный буферный слой кремния выращены толстые поликристаллические пленки Mg₂Si с толщинами 496 и 692 нм. Формирование кристаллического Mg₂Si подтверждено данными спектроскопии комбинационного рассеяния света. По спектрам пропускания и отражения, полученным методом оптической спектроскопии, был рассчитан спектр коэффициента поглощения, что позволило установить ширину непрямого запрещенной зоны в пленках Mg₂Si (0.80–0.86 эВ) и определить первый прямой межзонный переход с энергией 1.09–1.10 эВ, согласующийся с литературными данными. На основе сформированных пленок были изготовлены фотодиодные структуры, для которых сняты темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и спектры фотоотклика при различных напряжениях на гетероструктуре Al/Mg₂Si/Si/Au–Sb. Анализ ВАХ и спектров фотоотклика показал, что характеристики сильно отличаются от таковых для стандартного кремниевого *p–n*-перехода. Установлена зависимость спектров фотоотклика от знака и величины приложенного к контактам потенциала. Основной особенностью является узкая спектральная характеристика фотоотклика при 1050 нм, отсутствующая у кремниевого фотодиода. Анализ данных показал, что при высокотемпературном отжиге кремния в нем формируется двойной *p–n*-переход с запорным слоем, который вместе с гетеропереходом Mg₂Si/Si-*p* и определяет уникальные свойства созданной гетероструктуры.

Ключевые слова: силицид магния, реактивная эпитаксия, фотодиодные гетероструктуры, двойной *p–n*-переход, локальный фотоотклик.

Введение

Mg₂Si – это непрямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0.74 эВ [1, 2], обладающий широким диапазоном фоточувствительности, в том числе и в ИК-области [1–4]. Данное соединение является перспективным для создания фотодиодов, работающих в диапазоне от 200 до 1400 нм [4, 5]. Нелегированный Mg₂Si обладает высокой концентрацией носителей 6.00·10¹⁵ см⁻³, но при этом их подвижность составляет 400–550 см²/(В·с) для электронов и 65–70 см²/(В·с) для дырок [5], что на порядок меньше, чем для уже используемых полупроводниковых соединений [3, 6, 7] (табл. 1).

Таблица 1

Электронные и оптические свойства полупроводников

Полупроводниковый материал	Подвижность дырок μ_p , см ² /(В·с)	Подвижность электронов μ_n , см ² /(В·с)	Ширина запрещенной зоны, эВ	Ссылки
Si	500	1200–1450	1.12	[6]
Ge	1800	3600	0.67	[6]
GaAs	300	8000	1.43	[3, 6]
BaSi ₂	350	1000	1.23	[7, 8]

При формировании тонких пленок Mg₂Si актуальны такие проблемы, как сложность эпитаксиального роста пленок на кремниевых подложках и высокий коэффициент десорбции атомов Mg с поверхности подложки [3, 4]. Скорость десорбции атомов Mg зависит от температуры прогрева подложки, решение данной проблемы может быть найдено в увеличении скоростей осаждения Mg. Можно также отметить, что на электронные свойства пленок оказывают влияние наличие посто-

* Работы по формированию пленок Mg₂Si на кремниевых подложках проведены в рамках внутреннего гранта АмГУ. Работы по исследованию оптических, фоновых и диодных характеристик гетероструктур выполнены в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (госбюджетная тема FFW-2021-0002).

Применение ИК-абсорбционной фурье-спектроскопии для идентификации сырых нефтей Апшеронского полуострова Азербайджана*

А.М. Пашаев¹, Н.А. Велиев², И.Х. Мамедов¹,
К.А. Аскеров¹, А.А. Мусаев¹, К.Р. Аллахвердиев¹

¹ Национальная академия авиации Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

² Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье позволяет получить полезную информацию о различных химических включениях в сырой нефти. В частности, можно качественно определить наличие или отсутствие функциональных групп карбогидрогенных углеводородов. Известно, что в Азербайджанской Республике действуют 12 нефтегазодобывающих учреждений, в том числе 8 принадлежат Азербайджану, 4 – совместным компаниям. В большинстве случаев, связанных с разливами нефти, целесообразно иметь более одного аналитического метода для определения предполагаемого источника разлива сырой нефти и его свойств. В ранее опубликованных статьях мы привели результаты спектров флуоресценции и рамановского рассеяния сырых нефтей, взятых из 12 нефтегазодобывающих компаний Азербайджана. В них также были проанализированы характеристические особенности наблюдаемых спектров. В настоящей работе мы представляем результаты впервые измеренных спектров инфракрасного поглощения сырых нефтей, полученных из 6 нефтегазодобывающих компаний Азербайджанской Республики.

Ключевые слова: инфракрасное преобразование Фурье, сырая нефть, пропускание сырой нефти, оптическая спектроскопия, Апшеронский полуостров, Каспийское море.

Введение

Сырая нефть представляет собой довольно интересный класс веществ, имеющих широкое практическое применение. Сложная природа сырой нефти обуславливает необходимость применения сложных химико-физических методов анализа [1–10]. В нашей ранее опубликованной статье мы описали отличительные особенности спектров комбинационного рассеяния (рамановское рассеяние) сырой нефти, полученных от 12 нефтегазодобывающих компаний Апшеронского полуострова [10]. Хорошо известно, что существует четыре различных метода, которые широко используются для определения характеристик разливов сырой нефти на водной и земной поверхностях (инфракрасная (ИК) спектроскопия, флуоресцентная (ФЛ) спектроскопия, газовая хроматография и низкотемпературная люминесценция). Эти методы используются не только для обнаружения разливов нефти, но и для определения источника разливов. Спектры ФЛ и идентификация источников разливов были успешно выполнены с помощью ЛИДАРа КА-14, разработанного в Национальной академии авиации Азербайджана (НАА), и результаты были представлены в [9]. ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR) также широко используется не только для обнаружения сырой нефти на водных и земных поверхностях, но также и для определения ее характеристик [1, 4–6, 8]. С помощью ИК-спектрометрии можно установить наличие отдельных структурных фрагментов (ареновых, нафтеновых алифатических) и функциональных групп.

Цель настоящей работы – измерение и представление результатов первых измерений ИК-спектров оптического пропускания сырых нефтей, полученных из шести Нефтегазодобывающих компаний (НГДК) Апшеронского полуострова Азербайджана: 1) Локбатанского месторождения; 2) имени Тагиева; 3) имени 28 Мая; 4) Сиязаньского; 5) Бибигейбатского; 6) имени Н. Нариманова. Полученные результаты будут использованы для дальнейшего создания банка данных по ИК-спектрам оптического пропускания сырых нефтей Азербайджана.

* Авторы благодарны руководству Государственной нефтяной компании Азербайджанской Республики за финансовую поддержку настоящего проекта.

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.2.01

DOI: 10.17223/00213411/68/3/5

Критериальный анализ динамики процесса теплопроводности на примере модельной системыЕ.Н. Перевозников¹¹ Военно-космическая академия им А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

На основе анализа свойств динамической модели процессов теплопроводности в твердых телах, рассмотренной в предыдущей работе, проводится критериальный анализ устойчивости процессов. Методами теории устойчивости НРИ и L-критерия исследована устойчивость решений уравнений модели. Получены условия возможных неустойчивостей, показано, что их причиной является нелинейность, неравновесность и неоднородность системы и что неустойчивости проявляются в виде возбуждения тепловых колебаний и волн.

Ключевые слова: моделирование процесса теплопроводности, неустойчивости процессов.

Введение

Настоящая статья основана на результатах работы [1] и является ее естественным продолжением. В работе [1] приведена модель процесса теплопроводности в твердых телах, представляющая последний как процесс распространения потока внутренней энергии по системе различных каналов, каждый из которых моделирует теплопроводность в различных компонентах вещества либо определенный физический процесс теплопередачи (фононный, электронный) и характеризуется своей скоростью распространения тепла, теплоемкостью и другими параметрами.

В рамках рассмотренной модели [1, 2] процесс теплопроводности описывается потоком (q) и плотностью внутренней энергии (u). Поток энергии в каждом канале n распространяется вдоль оси OX как по ее направлению, так и против. q_n и q_n^- – плотности потоков внутренней энергии, распространяющихся по q_n и против q_n^- заданной оси по N каналам распространения (всего $2N$ величин). Общий поток энергии равен

$$q(x, t) = \sum_{n=1}^N q_n(x, t) = \sum_{n=1}^N (q_n(x, t) - q_n^-(x, t)). \quad (1)$$

Результирующее значение переносимой части внутренней энергии $U(x, t)$ равно сумме энергий в каждом канале:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^N [u_n^-(x, t) + u_n^+(x, t)] = \sum_{n=1}^N \frac{1}{c_n} [q_n^-(x, t) + q_n^+(x, t)], \quad (2)$$

где c_n – скорость распространения внутренней энергии в n -м канале. Таким образом, можно говорить о том, что каждый канал обладает собственной частотой и, соответственно, локальной температурой.

Для простейшей двухканальной системы, моделирующей композит, состоящий из двух разнородных материалов (например, металл – диэлектрик), система динамических уравнений модели имеет вид (см. [1, 2])

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{dt} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + 2a_{12}c_1u_1 &= 2a_{21}c_2u_2, \\ \frac{1}{c_1} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_1u_1) + q_1(2a_{11} + 2a_{12}), \\ \frac{du_2}{dt} + \frac{\partial q_2}{\partial x} + 2a_{21}c_2u_2 &= 2a_{12}c_1u_1, \\ \frac{1}{c_2} \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_2u_2) + q_2(2a_{22} + 2a_{21}), \end{aligned} \quad (3)$$

Исследование динамики температурного поля на торцевой поверхности строительных материалов на основе древесины при воздействии лучистого теплового потока*

Е.Л. Лобода^{1,2}, Т.И. Медведева¹, Д.П. Касымов^{1,2}

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

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

Представлены результаты экспериментальных ИК-термографических исследований термического воздействия лучистым тепловым потоком на некоторые деревосодержащие строительные материалы (ДСП, ОСП, фанера), в том числе с применением огнезащитных составов. Приведены термограммы и температурные профили по толщине образцов на торцевой поверхности. Определены температуры начала эндотермических и экзотермических реакций внутри материала, глубина зоны экзотермических реакций и скорость ее движения. Представленные экспериментальные данные позволяют получить представление о протекающих физико-химических процессах на торцевой поверхности рассмотренных строительных материалов при воздействии лучистого теплового потока от фронта пожара и влиянии огнезащитных составов на огнестойкость конструкций.

Ключевые слова: радиационный нагрев, ИК-термография, воспламенение, пиролиз, пожарная безопасность.

Введение

На протяжении всей истории человечества в качестве строительных материалов используется древесина или материалы на ее основе. Несмотря на доступность и ряд превосходных конструктивных свойств древесины, одним из главных ее недостатков является пожароопасность. Следует отметить, что воспламенение конструкций из древесины возможно как в результате грубых нарушений пожарной безопасности внутри помещения, так и в результате внешних воздействий на строение природных или городских пожаров. В последние десятилетия проблема перехода природных пожаров в городские или поселковые присутствует не только на территории России, но и в ряде стран мира, где объекты хозяйственной деятельности человека и жилье находятся в непосредственной близости или даже внутри природной среды, где образовался природный пожар. Несмотря на разнообразие обстоятельств возникновения пожара, главной физической причиной воспламенения строений и сооружений является интенсивное тепловое воздействие фронта природного пожара.

Согласно [1], древесина является пористым материалом, обладающим реакционной способностью. Ее физико-химические характеристики претерпевают изменения в результате теплового воздействия. Как отмечается в [2], горение древесины возможно в двух видах: пламенное (газофазное) горение, когда в результате пиролиза происходит диффузионное горение летучих продуктов пиролиза, или беспламенное горение – тление (к-фазное горение).

Скорость распространения волны горения вглубь материала является ключевым фактором при определении ее огнестойкости. Данный параметр зависит от ряда факторов, таких как температура окружающей среды, продолжительность горения, влажность древесины, ее физико-химические свойства и др.

Факторы, оказывающие влияние на скорость обугливания древесины, достаточно подробно изучены и освещены в научной литературе [3–13]. На основании полученных данных возможно судить о показателях огнестойкости деревянных конструкций. Вместе с тем большинство существующих методов оценки пожарной опасности древесины относятся к категории контактных методов (микротермопарная техника, молекулярно-пучковая зондовая масс-спектрометрия, методы термического анализа и др.). Из теории горения известно, что на время воспламенения материалов влияет плотность воздействующего теплового потока, тем не менее очень мощные тепловые потоки могут вызывать ожог поверхности, что может в свою очередь увеличить время задержки загорания.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-71-10029, <https://rscf.ru/project/24-71-10029/>.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.233

DOI: 10.17223/00213411/68/3/7

Исследование валентной зоны легированного железом германия методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и теории функционала плотности*Т.Т. Магкоев¹¹ *Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Россия*

Электронная структура двойной пленочной системы Ge–Fe исследована сочетанием методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и теории функционала плотности (ТФП). Двойная пленочная система Ge–Fe толщиной порядка 7.5 нм с одинаковым содержанием атомов Ge и Fe формировалась в условиях сверхвысокого вакуума при отжиге последовательно сформированных на поверхности кристалла Mo(110) пленок Ge и Fe. По данным фотоэлектронных измерений, проведенных в области величин энергии связи в интервале 0–200 эВ, происходит смещение спектральных линий как Ge, так и Fe относительно значений, характерных для Ge и Fe в отдельности, что согласуется с результатами ТФП-расчетов. Наблюдаемое соответствие характера энергетического сдвига электронных орбиталей и качественного согласия абсолютных величин этих сдвигов, полученных обоими методами, указывает на перспективность такого подхода для детальной настройки структурных и электронных свойств легированного железом, а также другими металлами германия.

Ключевые слова: *поверхность, тонкие пленки, германий, железо, фотоэлектронная спектроскопия, теория функционала плотности.*

Легирование германия переходными металлами является эффективным способом настройки его электронных свойств [1–11]. В результате этого может быть реализована электронная структура легированного материала, обусловленная $d \leftrightarrow p$ -гибридизацией атомных орбиталей. Формируемая при этом электронная структура зависит от конкретного переходного металла и его относительной концентрации. Например, несмотря на то, что Ni и Fe являются $3d$ -переходными металлами, при легировании ими германия имеет место противоположное направление переноса электронного заряда: в случае Ni происходит перенос заряда от Ge к Ni, в то время как в случае Fe происходит перенос заряда от Fe к Ge [3, 7, 12]. Такое различие обусловлено деталями электронного строения атомов Ni и Fe, в частности, степенью заполненности d -орбиталей и различием в величине их электронного сродства и поляризуемости [7]. С учетом недавно продемонстрированной особенности Ge, модифицированного атомами Fe, заключающейся в переносе заряда от Fe к Ge, и зависимости величины этого заряда от относительной концентрации Fe [12] представлялось целесообразным продолжить эти исследования и установить характер изменения валентной зоны при переходе от Ge к Fe–Ge. Именно структура валентной зоны и ее контролируемые модификации определяют характер электронных свойств материала и возможность их настройки для широкого спектра практических применений.

Электронную структуру двойной системы Fe–Ge можно рассматривать как обусловленную перекрытием атомных орбиталей Fe и Ge. Следует ожидать, что электронные свойства, такие, например, как ширина зоны и плотность состояний, будут определяться относительным содержанием Fe и Ge и атомной структурой формируемой решетки. Именно эти характеристики определяют многие особенности легированного германия как материала, имеющего важное значение как для фундаментальной, так и прикладной науки и технологии. В связи с этим цель настоящей работы – установление электронной структуры двойной системы Fe–Ge на основе фотоэмиссионных измерений и теоретических расчетов. Для расчета электронной структуры системы Fe–Ge использован квантово-механический метод функционала плотности с улучшенными для этой цели пакетами [13]. Основное внимание направлено на определение плотности и частичной плотности электронных состояний (DOS, pDOS) различных атомов и характера распределения углового момента. Для по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Минобрнауки РФ (код научной темы FEFN-2024-0002) и в рамках коллаборации ARIADNA FEFN-2024-0006 (ОИЯИ, Дубна).

Диэлектрические свойства композита на основе пористого тефлона, заполненного сегнетоэлектриком $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$

А.Ю. Милинский¹, С.В. Барышников¹, Е.В. Стукова²

¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Изучены температурные зависимости линейной диэлектрической проницаемости ϵ' для нанопористых тефлоновых матриц (220 нм), заполненных молекулярным сегнетоэлектриком $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$, в сравнении с объемной тиомочевинной. Измерения проводились в режиме нагрева и охлаждения в интервале от 100 К до комнатной температуры. Обнаружено понижение сегнетоэлектрического фазового перехода I→II тиомочевинной в пористом тефлоне, по сравнению с объемной тиомочевинной.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, тиомочевина, нанопористый тефлон, композит, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход.

Введение

Исследования малых сегнетоэлектрических частиц показали значительные изменения их свойств по сравнению с объемными кристаллами, особенно вблизи фазовых переходов. Установлено, что температуры фазовых переходов смещаются по сравнению с таковыми для объемных образцов, сами переходы становятся менее четкими, а при определенных размерах частиц сегнетоэлектрические свойства полностью утрачиваются (см. [1–4] и ссылки в них).

Одним из подходов к созданию малых сегнетоэлектрических частиц является инкапсуляция сегнетоактивных материалов в нанопористые матрицы [2]. В этом случае размеры частиц определяются размерами пор, и сегнетоэлектрические частицы формируют сетевую структуру, геометрия которой соответствует топологии пор. Такие наночастицы в порах представляют собой модельные системы, позволяющие исследовать размерные эффекты в полярных диэлектриках. Исследованию свойств сегнетоэлектриков в нанопористых матрицах посвящен ряд работ: NaNO_2 [2], KNO_3 [5], TGS [6], $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{NBr}$ [7] $\text{K}_{1-x}\text{Ag}_x\text{NO}_3$ [8], $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [9] и т.д.

Было установлено, что размеры частиц существенно влияют на спонтанную поляризацию и диэлектрическую проницаемость. Эти размерные эффекты могут быть объяснены с помощью теоретических моделей, разработанных для полярных диэлектриков в рамках теорий Ландау – Гинзбурга, или Гинзбурга – Андерсона – Кокрена [10, 11]. Теоретические расчеты показывают, что уменьшение размеров частиц вызывает снижение спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости вследствие изменения энергии системы (см., например, [12–14]). Однако существуют и другие причины размерных эффектов, связанные с взаимодействием частиц со стенками пор для трехмерных матриц или с подложкой для пленок и т.д. [15].

В настоящей работе представлены результаты исследований температурных зависимостей диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ тиомочевинной, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$, внедренной в матрицу из нанопористого тефлона.

1. Образцы и методика эксперимента

Кристаллы тиомочевинной $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ обнаруживают сложную последовательность структурных фазовых переходов [16]. При комнатной температуре кристалл принадлежит к centrosymmetric группе $Pnma$ с параметрами ячейки $a = 7.65 \text{ \AA}$, $b = 8.53 \text{ \AA}$, $c = 5.52 \text{ \AA}$ (фаза V). При понижении температуры между 202 и 180 К появляется неполярная фаза (фаза IV). Между 180 и 176 К формируется полярная фаза (фаза III) со значением спонтанной поляризации $P_s = 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$. Между 176 и 169 К – неполярная фаза (фаза II) и ниже 169 К – полярная фаза (фаза I), со спонтанной поляризацией вдоль оси a равной $P_s = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ [16].

В эксперименте в качестве пористых матриц использовались тефлоновые пластины фирмы «Haining Yibo Filter Equipment Factory» с размерами $1 \times 1 \text{ см}$ и средним размером пор 220 нм. Для внедрения тиомочевинной $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ в нанопоры тефлоновой пластины были проведены следующие операции. Порошок $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ растворяли в дистиллированной воде до получения насыщенного

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 53.083.2

DOI: 10.17223/00213411/68/3/9

Фазовый состав, структура и магнитные свойства ферритов никеля, полученных методом золь-гель-горения*

Д.В. Вагнер¹, К.В. Карева¹, В.А. Журавлев¹, Р.В. Минин²,
О.А. Доценко^{1,3}, К.И. Баскакова⁴, И.С. Кеда¹

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

² *Томский научный центр СО РАН, г. Томск, Россия*

³ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

⁴ *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Синтезированы порошки ферритов NiFe_2O_4 методом золь-гель-горения. Образцы были получены при разных условиях ферритизации и с различным соотношением количества раствора солей к раствору лимонной кислоты. Проведен анализ фазового состава, кристаллической структуры и магнитных свойств ферритовых порошков. Установлено, что размер кристаллитов зависит от соотношения количества раствора солей к раствору лимонной кислоты. Выявлено, что дополнительная ферритизация при температуре 800 °С в течение 2 ч приводит к увеличению содержания целевой фазы синтезированных ферритов и увеличению размера кристаллитов. Определены значения удельной намагнитченности насыщения, коэрцитивной силы, полей магнитной анизотропии и температуры Кюри.

Ключевые слова: золь-гель-горение, ферритизация, нанопорошки шпинели, удельная намагнитченность насыщения, температура Кюри, поле магнитной анизотропии.

Введение

Феррит никеля (NiFe_2O_4) в настоящее время является востребованным материалом. Он находит применение в различных устройствах СВЧ-электроники и в качестве поглотителей электромагнитного излучения благодаря своим магнитным свойствам и низкой электропроводности [1–4]. Термодинамическая стабильность и высокая коррозионная стойкость NiFe_2O_4 позволяют использовать его в металлургии для борьбы с коррозией [5, 6]. Большой интерес представляют наноразмерные никелевые ферриты. Это связано с тем, что при переходе из макроразмерного состояния в наноразмерное в материалах проявляются неизвестные ранее физические эффекты и свойства, которые невозможно предсказать заранее из строения и свойств объемного вещества. Переход ферритов в наноразмерное состояние сопровождается изменением их магнитных свойств (намагнитченность насыщения, коэрцитивная сила, поле магнитной анизотропии, температура Кюри). Из наноразмерных порошков NiFe_2O_4 изготавливают биосовместимые материалы для магнитной гипертермии и доставки лекарств [7–9]. Композиты на основе нанопорошков никелевого феррита и углеродных структур находят применение в качестве адсорбентов для удаления ионов высокотоксичных металлов из водной среды [10–12]. Фазовый состав, структура и магнитные свойства ферритов зависят от способа их синтеза. Для получения наноразмерных ферритов наиболее часто используют методы химического осаждения [13] и золь-гель-технологии [14]. Преимуществами метода золь-гель-горения являются: гомогенизация и диспергирование прекурсоров при их растворении, при этом не требуется экологически опасных и энергоемких процессов измельчения прекурсоров; высокая степень чистоты продуктов на всех этапах процесса при минимальном количестве затрат [14]. Цель работы – установление влияния условий ферритизации и количества топлива (лимонной кислоты) на фазовый состав, структурные и магнитные свойства NiFe_2O_4 , синтезированных методом золь-гель-горения. Проведена оценка предложенного метода для синтеза наноразмерного порошка феррита никеля.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00048, <https://rscf.ru/project/24-79-00048/>.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 531.1

DOI: 10.17223/00213411/68/3/10

Исследование 0^+ -возбуждений в ядрах с учетом остаточных силС.К. Абдулвагабова¹, И.К. Эфендиева²¹Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Исследованы свойства 0^+ -возбужденных состояний, генерированных парными, квадрупольными, спин-орбитальными силами в изотопах самария. Вычислены энергии 0^+ -состояний, вероятности $E(0)$ - и $E(2)$ -переходов, параметр Расмуссена X и спектроскопические факторы реакций с передачей двух нуклонов. При соответствующем выборе параметра спин-орбитального взаимодействия второе возбужденное состояние появляется чуть ниже энергетической щели.

Ключевые слова: возбужденное 0^+ -состояние, монопольные и квадрупольные переходы, эффективное сечение.

В деформированных четно-четных ядрах известно большое число уровней с моментом и четностью 0^+ [1–5]. Во многих ядрах из области редких земель и актинидов найдено по два-три низлежащих 0^+ -состояний, иногда очень близких по энергии – «близнецов». Исследования этих состояний показывают, что они имеют сложную структуру и их теоретическое объяснение встречает ряд трудностей.

Оказалось, что спектр 0^+ -возбуждений можно разделить на ветви: на вращательную и парные вибрации. Парные вибрации появляются при энергии $\omega \geq 2\Delta$ (где 2Δ – энергетическая щель), т.е. они отделены щелью от основного состояния. Ветвь парных вращений в пространстве числа частиц представляет собой совокупность основных состояний четно-четных соседних ядер. Количественные предсказания теории для этих состояний заметно отличаются от эмпирических данных. Модель с парными и квадрупольными [6] силами предсказывает лишь одно возбужденное состояние ниже энергетической щели и позволяет качественно описать наблюдаемые в эксперименте сильные $E2$ -переходы. Появление вторых 0^+ -возбуждений ниже энергетической щели может быть связано с монопольными спин-орбитальными силами.

Цель настоящей работы – выяснение влияния остаточных парных, квадруполь-квадрупольных, спин-орбитальных сил на свойства нижайших 0^+ -состояний. Мы приводим гамильтониан, описывающий эти взаимодействия, к виду, удобному для проведения численных расчетов, и получаем соответствующие секулярные уравнения. В работе вычислены энергии и основные характеристики 0^+ -состояний: вероятности $E(2)$ -, $E(0)$ -переходов, параметр Расмуссена X и эффективные сечения (p,t) - и (t,p) -реакций. Расчеты проводились для изотопов ядра самария. Явный вид членов, входящих в полученные выражения, приведен в Приложении.

Гамильтониан взаимодействия

Рассмотрим систему нуклонов в среднем самосогласованном деформированном поле H_{av} с остаточными парными, квадрупольными и спин-орбитальными силами:

$$H = H_{av} + H_{pair} + H_{qq} + H_{sl}. \quad (1)$$

Остаточное парное взаимодействие монопольного типа является короткодействующим, и можно предположить, что это взаимодействие между двумя частицами имеет вид «нулевого радиуса»:

Исследование точности определения орбит космических аппаратов ГЛОНАСС при различных обстоятельствах наземных наблюдений*

В.В. Шатохин¹, В.А. Авдюшев¹

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

Исследовано влияние условий наземных наблюдений на точность определения орбит навигационного космического аппарата ГЛОНАСС. Вводится показатель позиционной точности. На основании результатов исследования показано, при каких условиях наблюдений, в том числе оптимальном размещении наземных станций слежения, плотности наблюдений и мерном интервале, может быть достигнута наилучшая точность определения местоположения космических аппаратов.

Ключевые слова: искусственные спутники Земли, ГЛОНАСС, определение орбиты, измерения дальностей, позиционная точность.

Введение

При эксплуатации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), к которым относятся и российская ГЛОНАСС, необходимо обеспечить непрерывное высокоточное определение фактического местоположения каждого навигационного космического аппарата (НКА) в любой момент времени. От точности определения положения каждого НКА напрямую зависит точность определения ГНСС-приемником местоположения пользователя, которое осуществляется по навигационным сообщениям, передаваемым с навигационных спутников.

Вычисление координат (эфемерид) каждого НКА осуществляется непрерывно на бортовом компьютере численной моделью движения с исходными параметрами, которые рассчитываются наземным комплексом управления (НКУ) и передаются по радиосвязи на борт НКА. В то же время расчет исходных параметров НКА в НКУ выполняется по траекторным измерениям НКА с наземных станций слежения.

Вместе с тем известно, что траекторные измерения содержат ошибки разнообразной природы, которые вызывают ошибки в параметрах НКА при обработке измерений. Однако параметрические ошибки могут быть уменьшены за счет увеличения общего количества проведенных измерений, что может быть достигнуто, в частности, расширением сети станций слежения, с тем чтобы обеспечить непрерывное наблюдение за НКА и, как следствие, высокоточное определение параметров его движения.

Цель настоящей работы – оценка влияния различных условий наземных наблюдений на точность определения орбит НКА ГЛОНАСС. В работе вводится показатель позиционной точности. Описываются численные эксперименты по исследованию позиционной точности в зависимости от обстоятельств измерений со станций слежения. Анализируются результаты численных экспериментов.

1. Показатель позиционной точности

При определении орбиты НКА из траекторных измерений необходимо учитывать неопределенность, которая вызывается случайными ошибками измерений. Для оценки этой неопределенности можно использовать ковариационную матрицу, которая описывает параметрическую неопределенность в рамках линеаризованной обратной задачи [1].

Для исследования точности определения положения НКА (позиционной точности) в зависимости от условий наблюдения в начальном приближении допустимо рассматривать орбитальное движение НКА в рамках задачи двух тел. Поскольку цель исследования заключалась в оценке изменения точности определения орбитальных параметров НКА при различных условиях наблюдений (различных вариантах размещения станций слежения, периоде наблюдений и др.), представляется, что характер изменения показателей позиционной точности в модели невозмущенного

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2024-0005).

Квазиклассический подход для обобщенного уравнения Хауса, описывающего излучение в резонаторе лазера с импульсной накачкой*

А.Е. Кулагин^{1,2}, А.В. Шаповалов^{3,4}

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

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

³ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

⁴ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

Рассматривается обобщенное уравнение Хауса, учитывающее нестационарность условий накачки активной среды. Предлагается подход к построению асимптотических решений такого уравнения, основанный на методе квазиклассически сосредоточенных состояний. Для этого модель представляется в нелокальной форме и рассматриваются различные варианты связи между параметрами модели и малым параметром квазиклассического приближения. В явном виде получены уравнения на члены асимптотического разложения огибающей моды лазерного излучения в резонаторе. Предложенный подход позволяет оценить форму, длительность и мощность импульса излучения.

Ключевые слова: квазиклассически сосредоточенные решения, квазиклассические асимптотики, резонатор, насыщение, дисперсия, метод Маслова, неэрмитов оператор.

Введение

Эффективным методом описания временной эволюции излучения в резонаторе лазера является мастер уравнение Хауса [1]. Одним из достижений такой модели является то, что даже в простейшем виде, когда считается, что коэффициент усиления среды постоянен, она позволяет описать эффекты, ответственные за формирование сверхкоротких импульсов излучения, которые удается получить в эксперименте [2]. Теория, развитая Хаусом, применима к куда более широкому пласту задач в разных активных средах, где требуется математическое описание временной формы импульса излучения. В частности, уравнение Хауса представляет интерес с точки зрения описания импульса излучения в рамках моделей импульсных лазеров, где параметры активной среды описываются кинетическими уравнениями [3], так как интенсивность излучения входит в кинетические уравнения баланса лазерных уровней.

С математической точки зрения уравнение Хауса представляет собой комплексное уравнение Гинзбурга – Ландау [4], которое эквивалентно нелинейному уравнению Шредингера с неэрмитовой частью оператора уравнения. Несмотря на то, что оно является уравнением в частных производных второго порядка так же, как и реакционно-диффузионные уравнения, которые используются для описания кинетики активных сред, задача построения его решений на порядок сложнее. Поэтому актуальна задача разработки подходов к построению его приближенных решений, позволяющих упростить модель для ее интеграции в кинетические модели. Одним из таких подходов может быть теория квазиклассического приближения, развитая для уравнений типа Шредингера в квантовой механике [5]. Так как нас интересуют локализованные во времени импульсы, то применим в данном случае метод квазиклассически сосредоточенных состояний. Этот метод был обобщен на случай нелинейного уравнения Шредингера с неэрмитовой частью в работе [6], что позволяет применить его к данной задаче.

В настоящей работе мы применяем метод квазиклассически сосредоточенных состояний к обобщенному уравнению Хауса. Для этого проводится адаптация модели под формальные требования математического формализма, а также устанавливается соответствие между малым параметром в теории квазиклассического приближения и параметрами модели Хауса.

1. Обобщенное уравнение Хауса

Мода излучения циркулирующего в резонаторе лазера может приближенно описываться плоской волной на одном проходе резонатора. В рамках такой модели излучение можно описать комплекснозначной огибающей $A(n, t)$, которая обычно нормируется таким образом, что $|A(n, t)|^2$

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

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 3

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 24.03.2025. Выпуск в свет 01.04.2025. Заказ № 6266.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.39. Уч.-изд. л. 12.76. Тираж 50 экз. Цена свободная.

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

