

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

7·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Июль, 2024

№ 7 (800)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Мурадян А.Ж., Бадалян Д.А.** Спин-зависимое многоканальное туннелирование электрона в квантовой проволоке в продольном магнитном поле.....5

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П., Кутырев Г.Ю.** Влияние эффектов размерного квантования на эффективную массу основных носителей заряда в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 15

- Сидоров Ю.Г., Якушев М.В., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Васильев В.В., Зверев А.В., Макаров Ю.С., Бударных В.И., Марчишин И.В., Марин Д.В., Семенов М.П., Предени А.В., Вишняков А.В., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Смолянин А.В., Сизиков П.В., Давыдова Е.О.** Средневолновые ФПУ форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе слоев HgCdTe , выращенных методом МЛЭ на кремниевых подложках.....26

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Кроткевич Д.Г., Кашкаров Е.Б., Лидер А.М.** Влияние длительности искрового плазменного спекания на структурно-фазовое состояние и механические свойства ламинированных композитов на основе $\text{Ti}_3\text{Al}(\text{Si})\text{C}_2/\text{Nb}$36
- Иржевский К.А., Клепиков И.В., Лебедев В.Ф., Колядин А.В.** Морфология кратеров, образованных на поверхности алмазных пластин при воздействии сфокусированного лазерного излучения44
- Кудряшова О.Б., Соколов С.Д., Ворожцов А.Б.** Эволюция адсорбирующего аэрозоля, генерированного импульсным способом50
- Хидиров И., Парпиев А.С.** Нейтронографическое исследование образования дальнего порядка в карбиде титана $\text{TiC}_{0.60}$ 61
- Богданов А.А., Панин С.В., Любутин П.С., Остапенко М.Г.** Развитие циклической ползучести при блочном нагружении полукристаллического ПЭЭК.....68
- Каспарян С.О., Бакулин А.В., Кулькова С.Е.** Механические свойства тройных сплавов состава $\text{XU}_3\text{Ti}_{11}$77

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Жуковский К.В.** Аналитическое исследование влияния характеристик пучка и поля ондулятора на излучение лазера на свободных электронах.....86
- Савинов К.Н., Столярова Л.Р., Котина Д.М., Дмитриев А.К.** Влияние параметров модуляции излучения диодного лазера на характеристики резонансов КПП при многочастотном возбуждении97

CONTENTS

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Muradyan A.Zh., Badalyan D.A.** Spin-dependent multichannel tunneling of electron in a quantum wire in a longitudinal magnetic field..... 5

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Burmistrov E.R., Avakyants L.P., Kutyrev G.Yu.** Influence of the dimensional quantization effects on the effective mass of majority charge carriers in LED heterostructures with $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum wells 15
- Sidorov Yu.G., Yakushev M.V., Sabinina I.V., Sidorov G.Yu., Vasiliev V.V., Zverev A.V., Makarov Yu.S., Budarnykh V.I., Marchishin I.V., Marin D.V., Semenov M.P., Predein A.V., Vishnyakov A.V., Varavin V.S., Remesnik V.G., Smolyanin A.V., Sizikov P.V., Davydova E.O.** 640×512 MWIR FPA detectors with 15- μm pixel pitch based on MCT layers grown by molecular-beam epitaxy on Si substrates 26

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Krotkevich D.G., Kashkarov E.B., Lider A.M.** Influence of spark plasma sintering dwell time on structural-phase state and mechanical properties of laminated composites based on $\text{Ti}_3\text{Al}(\text{Si})\text{C}_2/\text{Nb}$ 36
- Irzhovsky K.A., Klepikov I.V., Lebedev V.F., Koliadin A.V.** Morphology of craters formed on the surface of diamond plates when exposed to focused laser radiation 44
- Kudryashova O.B., Sokolov S.D., Vorozhtsov A.B.** Evolution of aerosol absorbent created by impulse dispersion 50
- Khidirov I., Parpiev A.S.** Neutron diffraction study of formation of long-range order in titanium carbide $\text{TiC}_{0.60}$ 61
- Bogdanov A.A., Panin S.V., Lyubutin P.S., Ostapenko M.G.** Development of cyclic creep under block loading of semi-crystalline peek 68
- Kasparyan S.O., Bakulin A.V., Kulkova S.E.** Mechanical properties of ternary $\text{XY}_3\text{Ti}_{11}$ alloys..... 77

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Zhukovsky K.V.** Analytical study of the influence of characteristics of the beam and undulator field on the free electron laser radiation..... 86
- Savinov K.N., Stolyarova L.R., Kotina D.M., Dmitriev A.K.** Influence of the diode laser radiation modulation parameters on characteristics of CPT resonances under multi-frequency excitation 97

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 53.098

DOI: 10.17223/00213411/67/7/1

**Спин-зависимое многоканальное туннелирование электрона
в квантовой проволоке в продольном магнитном поле***А.Ж. Мурадян¹, Д.А. Бадалян¹¹ *Ереванский государственный университет, г. Ереван, Республика Армения*

Исследовано многоканальное квантовое туннелирование электронного потока через потенциальный барьер тонкой примеси, внедренной в квантовую проволоку, в продольном магнитном поле. Получены аналитические выражения для коэффициента туннелирования и коэффициента спиновой поляризации. Показано, что каналы, отличные от входных, формируются только при поперечно-неоднородном примесном потенциале. Эффективность их генерации возрастает с увеличением сосредоточенности туннельного потенциала в центре нанопроволоки и не зависит от знака потенциала. Каналы имеют разную степень поляризации, и в определенной энергетической области каждого канала туннельный ток полностью поляризован. Характерные результаты работы также проиллюстрированы графически.

Ключевые слова: квантовая проволока, многоканальное туннелирование, магнитное поле, потенциальный барьер дефекта.

Введение

Квантовые закономерности состояния электрона в мезоскопической полупроводниковой проволоке доминируют, когда размер по поперечным координатам сравним с длиной волны де Бройля и в то же время длина свободного пробега много больше размеров системы (баллистический режим низких температур) [1, 2]. Отсюда и высокие требования к гладкости границы проволоки, чтобы при отражении квантовое состояние электрона сохранилось.

Ограниченные поперечные размеры проволоки в первую очередь квантуют поперечное движение электрона и тем самым существенно изменяют продольные транспортные свойства системы. Когда поперечный размер проволоки становится порядка фермиевской длины волны электрона, проводимость приобретает гистограммную структуру с приращениями $e^2/2\pi\hbar$ [3]. Низкие поперечные размеры существенно меняют также действие точечных дефектов (примесей, вакансий) на ход транспорта электронов. Установлено, например, что проводимость нанотрубки может быть регулирована в широком диапазоне даже единственной примесью, на базе явления квантового туннелирования [4–9]. Новые важные для приложений возможности управления проводимостью формируются и за счет приложения внешних электрических и магнитных полей [10–15]. Здесь наиболее заметным является туннельный перенос спин-поляризованных носителей в спинтронных устройствах, таких как спин-квантовые компьютеры, спин-транзисторы, спиновые фильтры, анализаторы спиновой поляризации и т.д. [16].

Аналитический подход к этим задачам связан с серьезными математическими трудностями и, помимо численных методов, часто используются одномерные модели по координате распространения. Более точные результаты можно получить в квазиодномерных моделях [17–19], в которых в соответствии с реалиями поперечное движение не исключено, а ограничено. В этих условиях при упругом рассеянии на примесном потенциале частица может перейти на другой квантовый уровень поперечного движения, образуя новый канал рассеяния со своим импульсом или волновым вектором. То есть рассеяние в квазиодномерной системе, в отличие от одномерной, является многоканальным.

В данной работе дается теоретическое описание квазиодномерного спин-зависимого рассеяния электрона тонким дефектом, расположенным в нанопроволоке, в присутствии продольного магнитного поля. Определены особенности дисперсионного соотношения, коэффициенты прохо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке Республики Армения в рамках Лаборатории исследования и моделирования квантовых явлений ЕГУ.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.915

DOI: 10.17223/00213411/67/7/2

Влияние эффектов размерного квантования на эффективную массу основных носителей заряда в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ *Е.Р. Бурмистров¹, Л.П. Авакянц¹, Г.Ю. Кутырев¹¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Путем численного самосогласованного решения системы уравнений Шредингера и электронейтральности Пуассона рассчитаны зонные диаграммы светодиодных гетероструктур с множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Изучено влияние электрон-фононного взаимодействия, непараболичности закона дисперсии и гибридизации волновой функции на значения эффективной массы основных носителей заряда в квантовых ямах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Красное смещение 2Д-плазмонных резонансов связывается с температурной перенормировкой эффективной массы двумерных носителей. Для описания температурной зависимости эффективной массы использована функция смещения 2Д-плазмонной резонансной частоты.

Ключевые слова: гетероструктуры, эффективная масса, закон дисперсии, температурная перенормировка, красное смещение.

Введение

В последнее время интенсивно изучается плазмонное детектирование терагерцевого излучения ($\sim 10^{12}$ Гц) в низкоразмерных электронных системах [1, 2]. Поскольку длина волны двумерного (2Д)-плазмона на три порядка меньше, чем длина волны терагерцевого излучения, необходимо использовать структуру, связывающую электрическое поле терагерцевого излучения с электрическим полем 2Д-плазмона. В работе [3] в качестве такой структуры используется решетчатый затвор, выращенный на поверхности гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ методом электронно-лучевой литографии. Генерация плазмонных осцилляций осуществляется под действием падающего на гетероструктуру $\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ терагерцевого излучения. Электрическое поле плазмона локализуется под металлическими полосами решетчатого затвора, а сам плазмон возбуждается в режиме «сильной связи» [3].

Гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ с решетчатым затвором продемонстрировали резонансное поведение под действием падающего терагерцевого излучения, связанное с возбуждением в активной области поверхностных плазмонных волн. Авторами работы [4] установлено, что с ростом температуры эффективная масса основных носителей заряда в квантовой яме (КЯ) $\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ увеличивается от значения $0.22 m_0$ при $T = 80$ К до $0.34 m_0$ при $T = 280$ К.

В работе [4] гетероструктуры с множественными квантовыми ямами (МКЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaInN}$ используются в качестве источников терагерцевого излучения. Показано, что гетероструктуры с МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaInN}$ преобразуют фемтосекундные лазерные ИК-импульсы в терагерцевые электромагнитные волны.

Циклотронный резонанс является одним из немногих прямых методов определения эффективной массы носителей зарядов в твердых телах [5, 6]. В гетероструктурах с МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaInN}$ ее значение зависит от мольной доли In (x_{In}) в материале $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Параметр x_{In} неодинаков для разных производителей образцов, а между тем именно мольная доля In определяет как ширину запрещенной зоны КЯ, так и эффективную массу носителей заряда в ней. При мольной доле In, равной 10%, эффективная масса носителей заряда в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaInN}$ составляет $0.22 m_0$ [7, 8].

При взаимодействии ближнего ИК-излучения (800 нм) с гетероструктурами $\text{InGaIn}/\text{AlGaIn}/\text{GaInN}$ движение носителей заряда в КЯ характеризуется большой эффективной мас-

* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Средневолновые ФПУ форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе слоев HgCdTe, выращенных методом МЛЭ на кремниевых подложках

Ю.Г. Сидоров¹, М.В. Якушев¹, И.В. Сабинаина¹, Г.Ю. Сидоров¹, В.В. Васильев¹,
А.В. Зверев¹, Ю.С. Макаров¹, В.И. Бударных¹, И.В. Марчишин¹, Д.В. Марин¹,
М.П. Семенов¹, А.В. Предеин¹, А.В. Вишняков¹, В.С. Варавин¹, В.Г. Ремесник¹,
А.В. Смолянин¹, П.В. Сизиков¹, Е.О. Давыдова¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Разработана конструкция и изготовлены матричные фотоприемники форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм с длинноволновой границей чувствительности 5.1 мкм на основе слоев теллурида кадмия и ртути, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из кремния. Разработаны схема и топология, по которым изготовлены матричные мультиплексоры форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм, обеспечивающие рабочие режимы на тактовой частоте до 20 МГц. Методом гибридной сборки на индиевых столбах изготовлено матричное фотоприемное устройство форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм. Лучшие образцы характеризуются следующими параметрами: средняя величина разности температур, эквивалентной шуму < 18 мК, количество работоспособных элементов > 99.8%.

Ключевые слова: кадмий – ртуть – теллур, молекулярно-лучевая эпитаксия, мультиплексор, фокальная плоскость, NETD, SWaP.

Введение

Современное направление развития инфракрасных (ИК) тепловизионных систем связано с разработкой матричных фотоприемных устройств (ФПУ) для различных спектральных диапазонов. В последние два десятилетия появилось несколько новых концепций для повышения параметров инфракрасных детекторов. Эти новые концепции направлены на создание ИК ФП и ИК ФПУ, работающих при повышенной рабочей температуре, обеспечивающей уменьшение размеров, веса и потребляемой мощности (SWaP-технологии). Это позволит снизить стоимость, повысить время функционирования, а также расширит область применения, в принципе охватывая область гражданского применения [1–3].

Несомненно, развитие SWaP-технологий в первую очередь рассматривается ведущими зарубежными фирмами в направлении использования КРТ (кадмий – ртуть – теллур), который занимает ведущее место по сравнению с другими материалами, благодаря своим уникальным свойствам. И в первую очередь это касается систем, для которых необходима высокая чувствительность, близкая к теоретическому пределу. Сейчас это достигается с помощью охлаждаемых до криогенных температур ИК ФПУ. В настоящее время значительные усилия сосредоточены в направлении перспективных исследований и разработок технологии в части повышения рабочей температуры ИК ФПУ на основе материала КРТ [4–8]. В большинстве случаев в качестве охлаждающего устройства используется холодильная система Стирлинга, которая вносит существенную часть в стоимость, массу и габариты всего прибора. Важное преимущество ФПУ с такой системой охлаждения, работающей при более высокой температуре, заключается в существенном снижении потребляемой мощности охлаждающего устройства. Как следствие, размеры и массу такого устройства возможно уменьшить, а срок надежной работы увеличить. Все это приведет к снижению цены и расширит возможности использования ФПУ в автономных системах.

Использование подложек из Si для выращивания слоев КРТ очень привлекательно для изготовления ИК-матриц фокальной плоскости (FPA), потому что они дешевле, чем подложки из CdZnTe [9, 10]. По сравнению с детекторами на основе InSb длинноволновая граница чувствительности детекторов на основе HgCdTe может быть подстроена под заданный спектральный отклик с помощью изменения состава твердого раствора [11]. Кроме того, благодаря положительному коэффициенту изменения ширины запрещенной зоны от температуры в области длин волн 3–5 мкм они могут быть использованы при повышенных температурах, вплоть до 180 К [12], по

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.422.52

DOI: 10.17223/00213411/67/7/4

Влияние длительности искрового плазменного спекания на структурно-фазовое состояние и механические свойства ламинированных композитов на основе $Ti_3Al(Si)C_2/Nb^*$ Д.Г. Кроткевич¹, Е.Б. Кашкаров¹, А.М. Лидер¹¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Получены ламинированные металл-керамические композиты на основе $Ti_3Al(Si)C_2/Nb$ путем искрового плазменного спекания листов прекерамической бумаги с наполнителем из МАХ-фазы $Ti_3Al(Si)C_2$ и фольг Nb при температуре 1250 °С и давлении 50 МПа в течение 3, 5, 10 и 20 мин. Проанализировано влияние длительности спекания на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства ламинированных композитов. Установлено, что длительность спекания не влияет на фазовый состав композитов, хотя и приводит к незначительным изменениям в реакционном слое. Реакционный слой полученных композитов представляет собой сложную многофазную систему, представленную алюминидами и силицидами. Прочность на изгиб для всех композитов составила около 315 МПа, что ниже на 37%, чем для монолитного образца $Ti_3Al(Si)C_2$. Однако полученный композит имеет гораздо большую пластичность, обусловленную комплексным хрупко-пластичным механизмом разрушения и реализацией механизмов отклонения, разветвления трещин и деламинацией композита.

Ключевые слова: прекерамические бумаги, МАХ-фазы, искровое плазменное спекание, ламинированные композиты, механические свойства.

Введение

Керамические материалы обладают высокой твердостью, высокими модулями упругости и сдвига, а также хорошими коррозионными и термическими свойствами. Однако их хрупкость ограничивает возможности использования в качестве конструкционных материалов. Для увеличения пластичности керамических материалов, сохраняя при этом их преимущества, был предложен подход внедрения более пластичной металлической фазы. В настоящее время уже достигнуты успехи в создании различных металл-керамических слоистых композитов на основе оксидных керамик, таких как Al/Al_2O_3 [1], Ni/Al_2O_3 [2], Ti/Al_2O_3 [3], на основе карбидных керамик Ti/B_4C [4], Al/TiC [5] и других слоистых металл-керамических систем [6–9]. Существенное улучшение механических характеристик в ламинированных металл-керамических системах обусловлено механизмами, способствующими повышению устойчивости к разрушению и поглощению энергии разрушения. Эти механизмы включают отклонение, разветвление и перекрытие трещин на межфазных границах, а также механизмы пластической деформации металлической фазы [10–12].

Перспективными являются керамические материалы на основе МАХ-фаз. МАХ-фазы представляют собой соединения, которые описываются общей формулой $M_{n+1}AX_n$, где n может варьироваться от 1 до 3. В этой формуле M представляет переходный металл, A – элемент группы А, а X – углерод, азот или бор [13, 14]. Материалы, основанные на МАХ-фазах, объединяют свойства как металлов, так и керамики. Они обладают электро- и теплопроводностью [15], поддаются обработке резанием, обладают высокой трещиностойкостью [16] и высокими модулями упругости [17]. Эти материалы характеризуются низкой плотностью, демонстрируют жаростойкость, жаропрочность и устойчивость к коррозии [18, 19]. Перспективным сырьевым материалом для создания слоистых структур на основе МАХ-фаз с возможностью контроля структуры и химического состава на различных уровнях являются прекерамические бумаги [20]. Они являются композиционным материалом, состоящим преимущественно из органических волокон целлюлозы и порошкового наполнителя с долей до 90 мас.% [21]. В ряде предыдущих исследований были успешно продемонстрированы различные типы композитов, включая монолитные [22, 23], упрочненные волокнами [24], и функционально-градиентные [25], полученные искровым плазменным спеканием

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ 23-19-00109.

Морфология кратеров, образованных на поверхности алмазных пластин при воздействии сфокусированного лазерного излучения*

К.А. Иржевский^{1,3}, И.В. Клепиков^{1,2,3}, В.Ф. Лебедев⁴, А.В. Колядин²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

² ООО «НПК «Алмаз», г. Санкт-Петербург, Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование морфологии кратеров, образованных на поверхности НРНТ синтетических алмазных пластин при воздействии мощного лазерного излучения в процессе их исследований методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. Образцы алмазных пластин облучались как отдельными лазерными импульсами, так и сериями до 30-ти импульсов в одну точку. Анализ полученных результатов показывает, что форма кратера зависит от нескольких факторов: энергии лазерного импульса, количества импульсов в серии и кристаллографической ориентации пластины. Влияние величины энергии лазерного импульса проявляется в переходе от овальной к полигональной форме кратера. Кристаллографическая ориентация пластины влияет на форму полигонального кратера: в направлении куба <100> образуются прямоугольные пирамидальные углубления с линейным или точечным дном, а в направлении октаэдра <111> – треугольные плоскостные углубления.

Ключевые слова: кристаллографическая ориентация, лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, лазерное излучение, сколы, штриховка, плоскости спайности.

Введение

При изучении синтетических алмазов на их поверхность часто воздействуют лазерным излучением. В частности, в последнее время набирает популярность метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС), что связано с его универсальностью, возможностью исследования материала без пробоподготовки, скоростью, высокой чувствительностью и возможностью одновременного многоэлементного анализа [1]. Данные особенности метода спровоцировали его широкое применение при анализе сплавов в металлургии и ювелирном деле, археологических объектов, почв и многого другого [2]. Особенно интересным является использование ЛИЭС в области геммологии для определения географического происхождения драгоценных камней. Так, в исследовании [3] успешно идентифицируются сапфиры и рубины из различных месторождений. В другой работе этих же авторов [4] аналогичный метод применяется к природным алмазам, однако данная работа критично воспринята авторами работы [5] в части возможного присутствия в спектрах плазмы спектров примесных элементов окружающей образцы атмосферы. Основным ограничением при использовании метода ЛИЭС в геммологии является тот факт, что он является частично разрушающим в результате микроабляции вещества сфокусированным лазерным излучением. В работе [6] продемонстрирована возможность исследования самоцветов без видимого разрушения поверхности с помощью модифицированного ЛИЭС-метода, в котором усиление излучения спектра плазмы исследуемого образца осуществляется за счет взаимодействия лазерного излучения с напыленной на исследуемую поверхность образца пленки, содержащей наночастицы золота.

Лазерное излучение может использоваться в различных аспектах работы с алмазами: 1) создание различных микроскульптур на поверхности, часто используемых в микроэлектронике [7–9]; 2) формирование объемных структур в алмазе с целью маркировки [10]; 3) лазерная полировка поверхности [11].

Воздействие лазерного излучения малой мощности на алмазы изучалось многими исследователями [12, 13], тогда как влияние мощного излучения на поверхность алмазов практически не упоминалось. Взаимосвязь различной кристаллографической ориентации, дефектно-примесного состава, исходной шероховатости поверхности с морфологией новообразованных поверхностных структур преимущественно остается без внимания ученых.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFZ-2022-0006).

Эволюция адсорбирующего аэрозоля, генерированного импульсным способом*

О.Б. Кудряшова¹, С.Д. Соколов¹, А.Б. Ворожцов¹

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

Одним из решений проблемы аварийной очистки является импульсное распыление частиц адсорбентов в загрязненном воздухе. Для проектирования систем импульсной аэрозольной адсорбционной очистки требуется знание процессов эволюции частиц аэрозолей. В предложенной математической модели учитываются процессы распространения частиц в пространстве, осаждения, коагуляции. Эффективность адсорбции зависит от площади поверхности аэрозольных частиц, проведены оценки этой величины на примере аэрозоля TiO_2 .

Ключевые слова: аэрозоль, эволюция, распространение, осаждение, коагуляция, площадь поверхности.

Введение

Существует ряд ситуаций, требующих быстрой очистки воздуха помещений от вредных и токсичных газов [1]. Например, утечка газа или химического вещества в промышленном предприятии или жилом здании может вызвать опасность для здоровья и жизни людей. Проблема загрязнений воздуха внутри жилых помещений, медицинских учреждений, школ, лабораторий и других становится все более актуальной [2]. Существует множество летучих соединений, выделяемых современными бытовыми продуктами (например, красками, лаками, чистящими жидкостями, мебелью, копировальными аппаратами, принтерами, клеями). Очистка воздуха в помещениях направлена на защиту людей от негативного воздействия этих газов [3]. В каждом из перечисленных случаев важно оперативно и эффективно провести очистку воздуха для минимизации рисков для здоровья и безопасности людей.

С появлением COVID-19 качеству воздуха в помещениях уделяется повышенное внимание. Становится понятно, что опасность биологического загрязнения требует зачастую быстрого реагирования, подобного тому, какое необходимо обеспечить при ликвидации последствий производственных аварий [4]. ВОЗ признала загрязнение воздуха одной из величайших экологических угроз здоровью человека, поэтому совершенствование существующих и разработка новых методов очистки воздуха является актуальной задачей.

Существуют различные технологии очистки воздуха, используемые для борьбы с различными типами загрязняющих веществ, в том числе твердыми частицами, газообразными соединениями, или биологическими образованиями (бактерии, вирусы, грибки и т.д.). В работе [5] приводится обзор современных методов очистки воздуха в помещениях, где находятся люди. В том числе рассмотрены технологии фильтрации, адсорбции, ультрафиолетового каталитического окисления, биологические технологии.

УФ-фотокаталитическое окисление является перспективной технологией очистки воздуха. На поверхности твердого полупроводникового материала (например, диоксид титана, оксид цинка) газы или биологические частицы сначала адсорбируются, а затем подвергаются разложению под действием ультрафиолета [6]. Наноразмерные оксидные материалы с высокой площадью удельной поверхности и низкой токсичностью, такие как диоксид титана, обеспечивают возможность удаления токсичных газов путем адсорбции, последующей химической реакции и фотокаталитического окисления [7].

В работе [8] представлены обзор современных разработок в области использования и практические кейсы применения наноматериалов для очистки воздуха от вредных газов и частиц во внутренних, полужакрытых и открытых помещениях. Как видно из проведенного обзора, применяемые современные и перспективные материалы и технологии очистки воздуха нацелены на длительную (постоянную) очистку от вредных веществ в незначительном количестве.

Большинство традиционных или инновационных методов очистки воздуха имеют ряд ограничений. Например, они требуют много времени для обеззараживания, не могут удалить достаточное

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>.

Нейтроннографическое исследование образования дальнего порядка в карбиде титана $TiC_{0.60}$ *

И. Хидиров¹, А.С. Парпиев¹

¹ Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Проведено нейтроннографическое исследование кубического карбида титана $TiC_{0.6}$ при фазовом переходе беспорядок – порядок $\delta \rightarrow \delta'$. Показано, что при фазовом переходе типа беспорядок – порядок в карбиде титана $TiC_{0.60}$ при температуре 900 К степень дальнего порядка в течение первых 38 ч быстрыми темпами приближается к значению $\eta = 0.62$. При дальнейшем увеличении времени отжига до 240 ч она стремится к значению $\eta = 0.65$, не доходя к теоретическому максимальному значению $\eta_{теор}^{макс} = 0.80$. При этом размер антифазных доменов, нелинейно увеличиваясь в зависимости от времени отжига в течение 240 ч, становится равным ~ 29 нм.

Ключевые слова: карбид титана $TiC_{0.60}$, нестехиометрия, нейтронограмма, изотермический отжиг, антифазные домены, степень дальнего порядка.

Введение

Гранецентрированный кубический (ГЦК) карбид титана TiC_x переменного состава ($x = 0.50-1.00$) обладает большой твердостью и высокой температурой плавления, коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Благодаря этим свойствам, наряду с другими тугоплавкими сплавами [1, 2], его применяют в современной технике, промышленности и медицине [3–6]. Карбид титана, являясь тугоплавким материалом, обычно синтезируется при более высоких температурах, $T \geq 1800$ °С [5]. Нестехиометрический карбид титана TiC_x в неметаллической подрешетке содержит многочисленные вакансии. При высокотемпературном синтезе в нем многочисленные вакансии статически распределены в октаэдрических междоузлиях решетки атомов титана. При понижении температуры для получения равновесного состояния TiC_x ($x = 0.40-0.90$) наблюдаются многочисленные упорядоченные фазы, связанные с перераспределением атомов углерода и вакансий [7]. В области гомогенности ГЦК-карбида титана TiC_x особый интерес представляет состав $TiC_{0.60}$, которому посвящено довольно много работ, наиболее важными из которых являются работы [7–10]. Нестехиометрический карбид титана представляет интерес для использования в изготовлении имплантатов в лечении травм и увечий различных частей человеческих органов [6]. Поскольку карбид титана $TiC_{0.60}$ может находиться в упорядоченном состоянии, то представляет интерес изучение кинетики фазового перехода порядок – беспорядок, так как ряд свойств материала зависит от состояния упорядочения [11–13]. В этом составе и около этого состава обнаружены фазовые превращения ГЦК-неупорядоченной δ -фазы, описываемой в рамках пространственной группы (пр. гр. $Fm \bar{3} m$), в кубическую упорядоченную δ' -фазу (пр. гр. $Fd \bar{3} m$) в интервале температуры 993–873 К. Однако ни в одной работе не изучена кинетика изменения параметров, характеризующихся данным фазовым переходом. Тем не менее именно кинетика изменения этих параметров представляет практический и научный интерес. Цель данной работы – изучение кинетики образования дальнего порядка и размера антифазных доменов в карбиде титана $TiC_{0.60}$ при фазовом переходе беспорядок – порядок $\delta \rightarrow \delta'$.

Материалы и методика эксперимента

Образец $TiC_{0.60}$ приготовили методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из порошка Ti марки ПТЭМ с чистотой 99.76 мас.% и сажи марки «очень чистый». Для гомогенизации образец отжигали в вакуумированной и запаянной кварцевой ампуле при температуре 1370 К в течение 24 ч с последующей закалкой в воде. Термообработку образца проводили в печи типа SNOL. Содержание углерода в конечном продукте определяли методом химического анализа, а также контролировали по минимизации факторов недовольности определения структуры по нейтронограмме. Нейтронограммы образцов снимали при комнатной температуре на нейтронном

* Работа выполнена при поддержке ФИ АН РУз фундаментальных исследований (проект № Ф2-ФА-Ф119).

Развитие циклической ползучести при блочном нагружении полукристаллического ПЭЭК*

А.А. Богданов¹, С.В. Панин¹, П.С. Любутин¹, М.Г. Остапенко¹

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

Исследован эффект развития ползучести, возникающий при циклическом нагружении полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), где параметр циклическая ползучесть использован для количественной характеристики перестройки структуры. Величину циклической ползучести рассчитывали по петлям механического гистерезиса. Для получения зависимости величины циклической ползучести от амплитуды внешнего циклического напряжения проведено блочное нагружение со ступенчатым повышением амплитуды. Показано, что механизм развития циклической ползучести при блочном нагружении носит двухстадийный характер. Первая стадия отвечает за адаптацию полимера к увеличению прикладываемой нагрузки, вторая стадия соответствует стабилизации, когда скорость развития ползучести замедляется, а ее дальнейшее развитие прекращается. Обнаружено, что, несмотря на перестройку структуры и вызванное ею упрочнение, степень кристалличности при циклическом нагружении не изменилась и составила 59%. В то же время величина микронапряжений снизилась с 6 до 0.9 МПа. Показано, что циклическое деформационное упрочнение при блочном повышении нагрузки может приводить к повышению усталостной долговечности ПЭЭК (которая может достигать 90% от предела прочности материала).

Ключевые слова: *циклическая ползучесть, полиэфирэфиркетон, усталость, остаточная деформация, степень кристалличности, блочное нагружение.*

Введение

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) представляет собой полукристаллический термопластический материал с температурой стеклования 143 °С и температурой плавления 343 °С. Он нашел широкое применение в различных высокотехнологических отраслях промышленности, прежде всего за счет высокой температурной и химической стойкости и сопротивления изнашиванию, а также в качестве связующего/матрицы для изготовления композитов. Наибольшее распространение в качестве армирующих включений получили углеродные и стеклянные волокна. Использование ненаполненного ПЭЭК и композитов на его основе в качестве конструкционного материала обусловило интерес к изучению его деформационного поведения при циклическом нагружении, включая роль его полукристаллического строения, и степени кристалличности в частности, на сопротивление усталостному разрушению [1].

Известно, что повышение степени кристалличности, как правило, сопровождается повышением физико-механических свойств полимеров. В случае циклического нагружения, традиционно реализуемого при уровне нагрузок ниже предела текучести, степень кристалличности может играть решающую роль. Это обусловлено тем, что под действием циклической нагрузки различным образом ориентированные полимерные цепи испытывают конформации. Способность к развитию обратимой деформации в пределах кристаллической фазы полимера позволяет легче адаптироваться к условиям нагружения без быстро протекающего накопления рассеянных повреждений. В результате полимеры с полукристаллическим строением могут многократно превосходить по уровню усталостной долговечности таковые с аморфным строением [2].

Yuan и др. [3] изучали влияние молекулярной массы на степень кристалличности ПЭЭК. Исследование кинетики кристаллизации показало, что ПЭЭК имеет тенденцию к образованию сферических кристаллических структур. Степень кристалличности ПЭЭК, определяемая по данным ДСК-анализа, варьировалась от 27.1 до 39.5% в зависимости от молекулярной массы. Показано, что кристалличность ПЭЭК снижается с увеличением молекулярной массы. Причиной является то, что чем выше молекулярная масса или длиннее полимерная цепь, тем труднее реорганизация молекул в кристаллические структуры во время охлаждения.

Наиболее распространенными методами определения степени кристалличности термопластических полимеров являются ДСК и метод рентгеновской дифракции. M. Talbot, G. Springer и L. Berglund [4] продемонстрировали согласованность результатов определения степени кристал-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0010.

УДК 538.91

DOI: 10.17223/00213411/67/7/9

Механические свойства тройных сплавов состава $X\text{Y}_3\text{Ti}_{11}$ *

С.О. Каспарян^{1,2}, А.В. Бакулин¹, С.Е. Кулькова¹¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Проведено изучение электронной структуры и упругих свойств ряда титановых сплавов состава $X\text{Y}_3\text{Ti}_{11}$ с использованием модели «кластер плюс атом клея» методом проекционных присоединенных волн в рамках теории функционала электронной плотности. Определены особенности электронной структуры, обусловленные химическим составом сплавов. Впервые изучен эффект разупорядочения для данных структур. Показано, что у пяти из восьми изученных упорядоченных структур модуль Юнга меньше 45 ГПа, тогда как его значения увеличиваются для разупорядоченных сплавов, хотя остаются меньше, чем у чистого титана.

Ключевые слова: сплавы титана, упругие свойства, разупорядоченные сплавы, электронная структура.

Введение

Титан имеет хорошую биосовместимость, высокую удельную прочность и коррозионную стойкость, а также другие хорошие механические характеристики. Сплавы титана считаются перспективными для использования в медицине из-за комбинации их уникальных механических свойств и возможности достижения низких значений модуля Юнга (E) [1–3]. В настоящее время наиболее часто используемым материалом для ортопедических и стоматологических имплантатов является технически чистый титан (CP) или сплав состава Ti–6Al–4V [3–5]. Поскольку ванадий является токсичным элементом для человеческого организма, то при разработке новых низкомолекулярных титановых сплавов его стараются заменить другими элементами [6]. Считается, что кумулятивный эффект алюминия может также приводить к негативным реакциям, например, к развитию нейродегенеративных заболеваний [7]. Кроме того, модуль упругости технически чистого α -Ti и сплава Ti–6Al–4V с ГПУ-структурой остаются существенно выше [2, 5], чем для человеческих костей ($E < 35$ ГПа [8]). Высокое значение данного модуля ограничивает эффективность титана и его сплавов для имплантации, особенно в случае искусственных суставов. Имплантаты с более высокой жесткостью по сравнению с прилегающей костью приводят к деградации костной ткани, расшатыванию имплантата, гибели клеток остеобластов и другим негативным последствиям [9 и ссылки в ней]. Поэтому важно, чтобы сплав, используемый для имплантата, имел модуль Юнга как можно более близкий к модулю сопряженной кости, что позволяет эффективно передавать костям необходимое механическое напряжение [4, 9]. В последние несколько десятилетий интерес ученых как экспериментаторов, так и теоретиков связан с поиском легирующих добавок, которые могли бы понизить модуль Юнга, при этом в основном рассматриваются сплавы на основе β -Ti с ОЦК-решеткой [10, 11]. Известно, что добавление биоинертных β -стабилизирующих элементов, таких как Mo, Nb, Ta, расширяет температурный диапазон стабильности β -Ti [12], а добавление Zr и s,p -элементов (например, Sn) приводит к понижению модуля Юнга [11].

В последние несколько десятилетий квантово-механические методы интенсивно используются не только для интерпретации экспериментальных данных, но и для прогнозирования физико-механических свойств новых материалов [13–16]. В работе [13] рассчитывались модули упругости β -Ti-фазы, легированной Nb, Zr и/или Sn, с использованием метода точных MT-орбиталей и приближения когерентного потенциала (EMTO–CPA). Авторы продемонстрировали расчетами упругих свойств, что подбором концентраций легирующих добавок в сплаве Ti–Nb–Zr–Sn могут быть достигнуты низкие значения модулей упругости. Недавно так называемая модель «кластер плюс атом клея» [17] была применена для разработки новых титановых сплавов с низким модулем Юнга. В данной модели в центре титанового кластера находится растворенный атом (A), который сильно взаимодействует с атомами титана (B), находящимися от него на первой (8 атомов) и второй (6 атомов) координационной сфере. Кроме того, имеются атомы C, которые слабо взаимодействуют с атомами матрицы. Их в модели [17] называют атомами клея. В результате состав класте-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2022-0001.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 681.7

DOI: 10.17223/00213411/67/7/10

Аналитическое исследование влияния характеристик пучка и поля ондулятора на излучение лазера на свободных электронахК.В. Жуковский¹¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

На основе аналитического описания излучения лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) исследуется влияние параметров электронного пучка на характеристики излучения ЛСЭ. Анализируются влияние сечения пучка, его эмиттанса, параметров Твисса и разброса энергии на длину усиления ЛСЭ и на мощности излучения гармоник. Выясняется также влияние второй гармоники поля ондулятора на излучение гармоник ЛСЭ, в частности второй. В качестве примера рассматривается ЛСЭ LEUTL как источник света в видимом диапазоне с хорошо документированными характеристиками. В исследованиях свойств материалов и поверхностей ЛСЭ применяется в качестве источника света, при этом анализируется нелинейная генерация второй гармоники (SHG) в веществе. С целью выделить анализируемый отклик SHG на фоне излучения второй гармоники источника, изучаются возможности подавления второй гармоники ЛСЭ. Проводится аналитическое исследование влияния параметров пучка и поля ондулятора на излучение второй гармоники ЛСЭ. Предлагается использовать увеличенный разброс энергий электронов и вторую гармонику поля ондулятора в противофазе основному полю для уменьшения мощности второй гармоники излучения. Эффект может достигать несколько порядков величины мощности гармоники.

Ключевые слова: ондуляторное излучение, лазер на свободных электронах, гармоники, релятивистские заряды.

Введение

Ондуляторное излучение (ОИ) происходит от банчей релятивистских электронов в пространственно-периодическом магнитном поле ондулятора. ОИ может быть когерентным, если размер банча электронов меньше длины волны излучения. Сама идея излучения релятивистских электронов в магнитном поле с пространственной периодичностью была предложена в середине XX века В.Л. Гинзбургом [1]; им же было высказано соображение о возможности когерентного ОИ. Когерентное ОИ впервые было получено Мотцом [2]. Когерентное излучение в лазере на свободных электронах (ЛСЭ) было получено Мадэйем в миллиметровом диапазоне [3]. В XXI веке технологии продвинулись далеко вперед; синхротронное и ондуляторное излучения в диапазоне от видимого света до рентгеновского используют при исследованиях во многих областях [4–8]. При этом по возможности стараются уменьшить размеры и увеличить частоту излучения ЛСЭ [9, 10]. Теория ЛСЭ широко представлена в литературе (см., например, [11–17]). Основой ЛСЭ является ондулятор, в котором происходит группировка электронов и излучение от них. Электроны в ондуляторе ЛСЭ группируются на длине волны ОИ под действием силы Лоренца при взаимодействии с волной излучения; группировка на длинах волн гармоник идет слабее. Для гармоник кроме независимого роста мощности по длине ондуляторов излучение индуцируется основным тоном; это особенно заметно в конце ЛСЭ ближе к насыщению. В ондуляторе на оси излучение с соседних периодов приходит в противофазе для четных гармоник, поэтому в идеале они не излучаются. В длинном плоском ондуляторе на оси в идеале излучаются только нечетные гармоники, а в спиральном ондуляторе – только основной тон. В реальном устройстве пучок электронов имеет конечное сечение и в поле ондулятора присутствуют гармоники. Было показано [18–23], что даже слабая, ~10% амплитуды поля, гармоника поля ондулятора позволяет в определенных пределах эффективно регулировать излучение гармоник ОИ.

Присутствие второй гармоники в спектре источника излучения затрудняет исследование [24] нелинейной генерации второй гармоники (SHG) при исследовании свойств материалов [25–28] и поверхностей [29] в физике [30], химии [31], биохимии [32, 33] и в других областях. Генерация четных второй гармоники в ультрафиолетовом диапазоне при облучении $\text{TiM}_{2,3}$ ЛСЭ наблюдалась в [34]; присутствие второй гармоники в видимом диапазоне исследовалось в [35, 36] и может указывать на нарушение внутренней симметрии материалов [31, 33]. В этом контексте ниже мы про-

Влияние параметров модуляции излучения диодного лазера на характеристики резонансов КПН при многочастотном возбуждении*

К.Н. Савинов¹, Л.Р. Столярова¹, Д.М. Котина¹, А.К. Дмитриев¹

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Экспериментально продемонстрировано, что амплитуда ОВЧ-модуляции оказывает влияние на амплитуды серии резонансов когерентного пленения населенности (КПН), зарегистрированной при многочастотном возбуждении излучением диодного лазера с внешним резонатором. Также установлено, что ширина наблюдаемых резонансов не зависит от параметров ОВЧ-модуляции и ее наличия в целом. Обнаружены условия, при которых форма резонанса КПН оказывается близкой к симметричной, что в последствии может быть использовано для улучшения стабильности стандарта частоты.

Ключевые слова: диодный лазер, резонанс когерентного пленения населенности, частотная модуляция.

Введение

Квантовые стандарты частоты нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1, 2]. Сегодня большое распространение получили рубидиевые часы, основанные на явлении резонанса когерентного пленения населенности (КПН), который был открыт в 1970-е годы [3, 4]. В экспериментах широко используется сверхтонкий переход $5S_{1/2}(F=1) \leftrightarrow 5S_{1/2}(F=2)$ основного состояния изотопа Rb-87 на частоте ≈ 6.83 ГГц. Ранее было показано, что переходы на линии D_1 обладают наименьшими сдвигами и обеспечивают в 10 раз большую интенсивность по сравнению с линией D_2 [5].

В настоящее время в малогабаритных атомных часах на основе эффекта КПН широко применяются лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL) [6, 7]. Они отличаются миниатюрными размерами, что позволяет снизить уровень энергопотребления и обеспечивает эффективную СВЧ-модуляцию тока инжекции в широком диапазоне частот, включая частоту часового перехода $f_0 = 6\,834\,682\,611$ Гц.

Однако значительная ширина спектра VCSEL (порядка 50 МГц [8]) не позволяет создать на их основе оптический стандарт частоты. Переход к созданию комбинированного стандарта частоты оптического и СВЧ-диапазонов возможен при возбуждении резонансов с помощью диодных лазеров с внешним резонатором (ДЛВР), ширина линии которых существенно меньше (порядка 60 кГц [9]). Создание оптического стандарта частоты также возможно с использованием привязки дополнительного одночастотного лазера к одной из компонент спектра [10].

На стабильность квантовых стандартов частоты оказывают влияние множество факторов, основным из которых является световой сдвиг. Уменьшение светового сдвига возможно при использовании «многочастотного возбуждения», например, излучением фемтосекундного лазера [11]. В этом случае вклад в резонанс дают одновременно несколько пар спектральных компонент. Однако использование фемтосекундного лазера с его существенно широким спектром излучения, превышающим величину интервала между оптическими переходами, используемыми для возбуждения резонансов КПН, приводит к тому, что только небольшая часть спектра (менее 1%) вносит вклад в возбуждение, в то время как остальные компоненты, в том числе другие оптические линии, только увеличивают шум. Предположительно это объясняет отсутствие данных об успешных экспериментах в этой области.

Согласование ширины спектра с используемыми оптическими переходами может быть реализовано в ДЛВР. Ранее были зарегистрированы серии резонансов КПН при ОВЧ-модуляции частотой 17 МГц [12] и 34 МГц [13]. Регистрация боковых резонансов КПН указывает на справедливость механизма многочастотной накачки, однако в вышеупомянутых работах приведены результаты при определенных значениях параметров ОВЧ-модуляции и не исследованы характеристики резонансов при изменении параметров модуляции.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2022-0007.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 7

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 22.07.2024. Выпуск в свет 30.07.2024. Заказ № 5984.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 12.09. Уч.-изд. л. 13.54. 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

