

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Пермский инновационный территориальный кластер
волоконно-оптических технологий «ФОТОНИКА»

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 11, № 3

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2024

Публикуются статьи, содержащие фундаментальные и прикладные результаты исследований в области лазерной оптики, в том числе связанные с исследованиями в области технологии и свойств оптических компонентов, источников, приемников и преобразователей оптического излучения, оптических коммуникаций, оптических датчиков и информационных систем, лазерных технологий обработки материалов, фотоники в биологии и медицине, радиопоники.

Предназначено для научных сотрудников, специализирующихся в области фотоники и оптоэлектронного приборостроения, студентов старших курсов направлений «Фотоника и оптоэлектроника», «Приборостроение», «Лазерная техника», «Волоконная оптика».

Главный редактор: *С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

Заместитель главного редактора: *В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

Ответственный за выпуск: *А.В. Перминов*, д.ф.-м.н., профессор кафедры «Общая физика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь, Россия)

Ответственный секретарь: *Д.Б. Владимирова*, канд. физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

Редакционная коллегия:

Ю.Н. Кульчин, акад. РАН (Владивосток, Россия)

В.П. Матвеев, акад. РАН (Пермь, Россия)

М.П. Федорук, акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск, Россия)

С.А. Бабин, чл.-корр. РАН (Новосибирск, Россия)

В.В. Шпак, заместитель Министра промышленности и торговли РФ (Москва, Россия)

А.А. Аполонский, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

Н.А. Гиппиус, д-р физ.-мат. наук, профессор (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

В.П. Драчев, канд. физ.-мат. наук (территория Инновационного центра «Сколково», Россия)

В.В. Криштон, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

И.А. Лобач, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, Россия)

О. Г. Морозов, д-р техн. наук, профессор (Казань, Россия)

О.Е. Наний, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

В.П. Первадчук, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

А.В. Перминов, д-р физ.-мат. наук, доцент (Пермь, Россия)

Д.И. Семенов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Ульяновск, Россия)

С.Л. Семенов, д-р физ.-мат. наук, руководитель НЦВО РАН (Москва, Россия)

А.В. Сюй, д-р физ.-мат. наук, профессор (Долгопрудный, Россия)

А.Л. Толстик, д-р физ.-мат. наук, профессор (Минск, Республика Беларусь)

С.К. Турицын, канд. физ.-мат. наук, профессор (Бирмингем, Англия)

А.А. Фотиади, канд. физ.-мат. наук (Ульяновск, Россия)

В.Б. Цветков, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

В.Я. Шур, д-р физ.-мат. наук, профессор (Екатеринбург, Россия)

Ю.В. Чеботаревский, д-р физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Zinan Wang (王子南), Professor (Chengdu, China)

Zhiyong Zhao (赵志勇), Associate Professor (Wuhan, China)

Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС 77 – 59184 от 3 сентября 2014 г.

Периодическое печатное издание (выходит 4 раза в год).

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя, редакции и типографии:

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29.

Тел. +7 (342) 2-198-340, e-mail: photonics.appl.jrn@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Б.Г. Вайнер</i>	
Современная тепловизионная фотоника в биомедицине.....	5
<i>Д.А. Кислов, А.С. Шалин</i>	
Управление эффективностью генерации второй гармоники метаповерхностью за счет ее механического растяжения	22
<i>А.Г. Маликов, А.А. Глышев</i>	
Лазерное аддитивное выращивание металлокерамических материалов.....	30
<i>В.С. Айрапетян, А.В. Макеев</i>	
Исследование генерационных характеристик параметрического лазера на кристалле AgGaS_2 в диапазоне 1,41–9,01 мкм.....	50
<i>А.В. Немыкин, Д.А. Шапиро</i>	
Фазовая оптимизация пиковой амплитуды суммы гармоник	62
<i>Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро</i>	
Спектральный дизайн сигнала с кратным нецентральной чирпированием.....	75
Условия публикации статей в журнале «ПРИКЛАДНАЯ фотоника (APPLIED photonics)».....	85

CONTENTS

<i>B.G. Vainer</i>	
Modern infrared thermography photonics in biomedicine	5
<i>D.A. Kislov, A.S. Shalin</i>	
Controlling the efficiency of second harmonic generation from a metasurface due to its mechanical stretching	22
<i>A.G. Malikov, A.A. Golyshev</i>	
Laser Additive Manufacturing of Metal-Ceramic Materials	30
<i>V.S. Airapetyan, A.V. Makeev</i>	
Study of generation characteristics of parametric laser on AgGaS ₂ crystal in the range of 1.41-9.01 μm	50
<i>A.V. Nemykin, D.A. Shapiro</i>	
Crest factor minimization of the multitone complex signal	62
<i>E.G. Shapiro, D.A. Shapiro</i>	
Spectral design of the signal with multiple non-central chirping	75
Условия публикации статей в журнале «ПРИКЛАДНАЯ фотоника (APPLIED photonics)»	85

УДК 57.621.383

Б.Г. Вайнер

Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Российская Федерация
Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Российская Федерация

СОВРЕМЕННАЯ ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ФОТОНИКА В БИОМЕДИЦИНЕ

В статье показано, что современная фотоника, реализованная в виде матричной инфракрасной термографии (матричного тепловидения), обладает высоким потенциалом для высокоинформативного извлечения новых знаний об организме млекопитающих, в том числе человека.

Ключевые слова: тепловидение, динамическая инфракрасная термография, физиология человека и животных, метод сорбционно-усиленной инфракрасной термографии, интервентный принцип обследования, автоматизированные синхронные многоканальные измерения.

B.G. Vainer

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

MODERN INFRARED THERMOGRAPHY PHOTONICS IN BIOMEDICINE

It is shown in the paper that modern photonics, implemented in the form of the focal plane array (FPA)-based infrared thermography (FPA-based thermal imaging), has high potential for highly informative extraction of new knowledge about the mammal's organism, including humans.

Keywords: thermal imaging, dynamic infrared thermography, human and animal physiology, Sorption-Enhanced Infrared Thermography (SEIRT) method, interventional principle of examination, automated synchronous multichannel measurements.

Введение

В медицине к тепловидению сегодня часто относятся как к одному из спорных и не до конца однозначных методов диагностики. С момента зарождения в середине 50-х годов прошлого столетия, когда канадский хирург Лоусон своими статьями [1, 2] произвел, как тогда казалось, революцию в маммологии, этот метод за короткий период сумел пережить

и молниеносный взлет (к середине 70-х), и падение (конец 80-х), и новый выраженный подъем (со середины 90-х гг. XX века).

Последний из вышеупомянутых успешных этапов развития обязан двум решающим обстоятельствам: стремительному прогрессу в области микроэлектроники, позволившему сделать широкодоступными матричные детекторы инфракрасного (ИК) излучения, и столь же бурному развитию компьютерных и цифровых технологий, сумевших превратить «любительские» тепловизионные фотографии в многопиксельные оцифрованные тепловые поля, измеренные с температурным разрешением в сотые и даже тысячные доли градуса за времена порядка сотых и тысячных долей секунды [3]. Столь революционные изменения позволили теперь не только «видеть» тепло, но также получать из тепловых изображений двумерные и трехмерные графики [4, 5], наблюдать эволюцию последних с течением времени [6, 7] и даже выражать на количественном уровне степень гетерогенности двумерных термограмм [8, 9]. Тепловидение нового поколения, реализующее возможность количественного анализа изображений, принято называть ИК-термографией, а когда с ее помощью производят запись термофильмов с регистрацией быстропротекающих тепловых процессов – динамической ИК-термографией.

Тепловизоры применяют во многих научно-технических и народно-хозяйственных областях, но часто на примитивном уровне, ограничиваясь лишь распознаванием двумерного теплового профиля объекта. В редчайших случаях используют скоростные свойства современных тепловизионных камер с их способностью регистрировать сотни и тысячи последовательных термограмм в секунду. Еще реже полноценно реализуют высокую температурную чувствительность (сотые и тысячные доли градуса) приборов [10]. И совсем уж невероятно увидеть, когда динамическая ИК-термография высокого разрешения применяется синхронно с записью результатов измерений того же объекта другими, независимыми от тепловидения, методами, не говоря уже о сопровождающей эту процедуру математической обработке потоков данных, одновременно приходящих по всем вышеупомянутым измерительным каналам.

В ранних тепловизионных камерах использовали в качестве детектора излучения одноэлементные или линейчатые фотоприемники. Для получения полноформатной двумерной картины при этом требовалось пользоваться «услугами» оптико-механического сканера, который

встраивался в прибор и осуществлял развертку изображения. При замене ИК-детекторов на матричные были существенно улучшены технические характеристики тепловизионных камер по совокупности их основных параметров – температурной чувствительности, быстродействию, пространственному разрешению. Матричные тепловизоры дали старт развитию современной тепловизионной фотоники, которой посвящена настоящая статья.

Здесь следует оговорить одну немаловажную деталь. Многие связывают термин «фотоника» исключительно с технической стороной вопроса и интерпретируют это понятие сообразно термину «авионика». При таком понимании можно было бы считать, что с появлением матричных детекторов излучения тепловизионная фотоника достигла своего совершенства и тем самым себя исчерпала. Однако подобный ограниченный взгляд является заблуждением. Фотоника определяется не только уровнем техники, параметрами и потребительскими качествами фотоприемных устройств, но она включает в себя также широкую область исследований, приносящих, благодаря использованию свойств фотонов, новые знания. На тепловидение при этом «работают» фотоны инфракрасного спектрального диапазона. Однако чтобы такая работа приносила пользу, наличие одних лишь тепловизионных камер, пусть даже высочайшего технического уровня, вовсе не является достаточным.

Действительно, попробуем ответить на вопрос: какой из дорогостоящих приборов при ограниченном финансировании приобретет сегодня клиника – совершенный тепловизор с рекордными техническими характеристиками или, например, за те же деньги магниторезонансный томограф?

Ответ очевиден. В современном мире сложилась парадоксальная ситуация. На рынке можно приобрести тепловизионные камеры высочайшего класса, заведомо удовлетворяющие нужды сколь угодно требовательной диагностической медицины, но, несмотря на солидный возраст медицинского тепловидения и соответствующий накопленный врачебный опыт, тепловизионная техника остается, тем не менее, весьма маловостребованной. Стоит хотя бы сравнить оснащенность медицинских учреждений тепловизорами и аппаратами ультразвуковой или рентген-диагностики.

С чем связан этот парадокс? Может быть, температурные портреты человеческого тела не содержат полезной информации, способной заинтересовать «видавших виды» медиков?

Вовсе не так. Протекающие внутри человека биологические процессы сопровождаются, как известно, непрерывным выделением и поглощением теплоты [11]. И распознавание особенностей этих процессов несет для квалифицированного и думающего врача не просто полезную, а бесценную информацию о состоянии организма. Поверхность тела (у человека – кожа) служит выразительным органом, демонстрирующим скрытую внутреннюю жизнь живого объекта с ее разнообразными и, как правило, нестационарными энергетическими превращениями. Температурная картина передней, задней или боковых поверхностей тела, которую тепловизор «запросто» способен предоставить физиологу или врачу всю целиком за доли секунды, а при желании также и записать в реальном масштабе времени любой по длительности эпизод, отражающий изменение этой картины, – подобные «подарки» не в силах делать ни одна медицинская технология, кроме тепловизионной.

Но именно в этом месте и возникает загвоздка: как прочитать этот высокоинформативный температурный «язык тела»? Даже в таких давно уже ставших классическими диагностиках, как рентгенография, магниторезонансная томография, УЗИ, и то встречается масса нюансов, корректная интерпретация которых требует высокой квалификации врача. В тепловидении всё «еще хуже». Поверхностная температурная картина, регистрируемая прибором, определяется, главным образом, тремя биофизическими факторами: поверхностным кровотоком, теплопритоками от заглубленных органов и тканей и потоотделением. Понимая это, становится ясным любому, кто хоть однажды был свидетелем, как человек почти мгновенно розовел, бледнел или покрывался потом, что термограмма поверхности тела чрезвычайно чувствительна к физическому, физиологическому, эмоциональному и иным состояниям пациента. И в ходе тепловизионного обследования надо принять массу предосторожностей, чтобы достоверная диагностическая картина не утонула в коварной и многоликой коллекции артефактов. К слову, осознавая затронутую проблему, следует всегда стремиться к тому, чтобы для исключения возможного психофизического воздействия диагностической процедуры на испытуемого используемые методы были бы, сообразно тепловидению, не только неинвазивными, но и дистанционными.

Что из этого следует? А то, что обеспечение корректной медицинской интерпретации внешних температурных полей человеческого тела становится, по сути, задачей, решаемой применительно к каждому конкретному больному персонально. Такой персонализированный подход

требует от врача не только исключительной внимательности, но также высочайшего уровня знаний в области анатомии, физиологии и функциональной диагностики. Тепловизионный метод обследования при этом превращается из строго детерминированной технологии, характерной для медицинской специализации, в тонкое искусство, которому весьма трудно, а то и невозможно обучить студента за годы его пребывания в медицинском университете.

Таким образом, современный мир нуждается уже не в создании совершенных тепловизоров, коих на рынке стало вполне достаточно, а в надежной тепловизионной методологии, позволяющей выявлять из измеренных данных патогномичные признаки заболеваний и патологических отклонений организма от нормы. Лишь разработка таких методов, ориентированных на использование высоких параметров современной матричной техники, позволит разрешить упомянутый выше парадокс и сделать тепловизоры неотъемлемым атрибутом любой клиники. Тепловизионная фотоника призвана решить эту задачу.

Несмотря на все сложности, с которыми встретилась тепловизионная диагностика на пути своего становления и развития, не стоит терять оптимизма. Ниже представлены иллюстрирующие примеры, которые показывают, что даже такая «противоречивая» и, казалось бы, неоднозначная технология, как биомедицинское тепловидение, позволяет успешно разрабатывать новые высокоинформативные подходы, приносящие с помощью тепловизионной камеры уникальные знания, не доступные другим методам исследования. Действуя, в свою очередь, совместно с другими независимыми диагностическими методами и реализуя обследование в условиях интервентных нагрузок на испытуемого, у тепловизионной фотоники открываются многообещающие перспективы, которые могут привести к лучшему пониманию текущего и даже прогнозируемого физиологического и функционального статуса организма людей и животных.

Принцип синхронных многоканальных измерений с интервентным воздействием на объект исследования

Широко практикуемый в медицине принцип назначения серии диагностических обследований, предполагающий последовательное (друг за другом) применение аппаратных средств, причем, как правило, без сопровождающих такие процедуры функциональных проб (нагрузок),

рискует завершиться получением некорректных сведений о состоянии организма пациента, поскольку в естественных перерывах между обследованиями статус организма способен меняться. Гораздо более достоверной диагностики и избавления от вышеописанной ошибки можно достичь, если все измерения проводить синхронно, в едином цикле, получая информацию об организме по множеству его биофизических каналов одновременно. Таких каналов может быть порядка 10 и больше.

Поскольку жизнеобеспечивающие системы в организме взаимосвязаны, в мультиканальном режиме можно учесть и, при необходимости, определить степень их влияния друг на друга, что имеет самостоятельное диагностическое значение. Более того, после интервентного воздействия на испытуемого (проведения диагностической функциональной пробы) траектория возврата из возбужденного к исходному состоянию несет важную информацию о резервах организма, в том числе о его потенциальной способности сопротивляться патологиям. Измерительный синхронизм силён тем, что в период, когда все основные жизнеобеспечивающие системы дружно взаимодействуют, будучи связанными между собой, можно искать признаки согласованности или же рассогласованности в их функционировании. И диагностически значимыми являются результаты этого поиска. Ведь естественно предположить, что в пораженном организме уже на начальных стадиях заболевания возврат к исходному состоянию после оказанного интервентного воздействия будет отличаться от того, как это происходит в здоровом. И целью является выявить такие отличия в траекториях возврата.

С учетом изложенного принцип интервентности, реализуемый через проведение комплекса мягких функциональных проб, может рассматриваться как высокоперспективная тактика в синхронной мультиканальной диагностике физиологического и функционального состояния живого объекта как целого. Полностью пассивный, и потому щадящий, тепловизионный метод исследования позволяет реализовать необременительность технологии диагностического тестирования для испытуемого. Как правило, испытуемый в ходе обследования находится в комфортном положении, не претерпевая каких-либо паразитных (недокументированных) воздействий, кроме заданной протоколом интервенции (рис. 1). Такие условия позволяют целенаправленно изучать отклик его организма на вариацию параметров используемых функциональных проб (длительность, интенсивность и пр.) и делать достоверные выводы из результатов таких обследований.



Рис. 1. Вид испытуемого в процессе автоматизированного многоканального интервентного обследования

Пример одного из часто реализуемых интервентных воздействий – кратковременная задержка дыхания – приведен на рис. 2. Здесь в качестве биофизического отклика на такое вмешательство в гомеостаз было обнаружено изменение температуры пальцев рук, свидетельствующее об изменении характера периферического кровообращения.

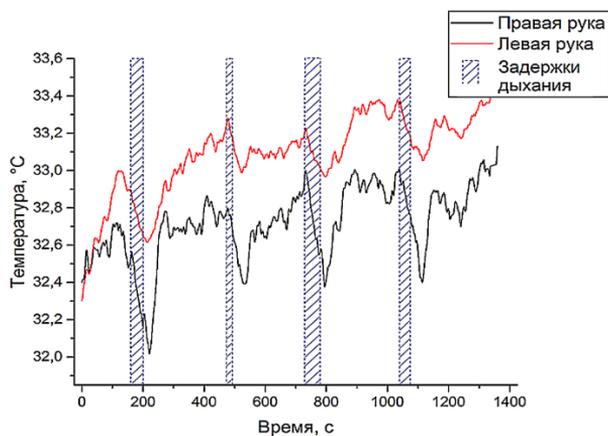


Рис. 2. Изменение температуры пальцев рук испытуемого в ответ на кратковременные задержки дыхания; температура измерялась матричным тепловизором ТКВр-ИФП/СВИТ

Температура измерялась дистанционно тепловизионной камерой. Из рисунка видно, что каждый раз после неоднократно повторяющейся задержки дыхания интенсивность кровообращения в дистальных отделах

верхних конечностей претерпевала спад. Влияние динамики дыхания, контролируемой тепловизионным методом, на скорость пульсовой волны в лучевой артерии, в том числе при задержке дыхания на продолжительное время (несколько минут), подробно описано в нашей работе [12].

Когда число каналов, по которым синхронно приходят информационные сигналы, исчисляется двумя или тремя (например, информация о частоте сердечных сокращений и частоте дыхания), способностей человеческого мозга может оказаться вполне достаточно чтобы сделать вывод о степени корреляции или антикорреляции этих данных (хотя и такое не всегда получается). Если же количество каналов, включая тепловизионный, уже порядка пяти или больше, найти корреляцию и согласованность в непрерывных рядах (потоках) экспериментально полученных данных, обнаружить их взаимозависимость и подчиненность одного от другого становится практически невозможно. Особенно, когда такие ряды зашумлены случайными процессами (например, естественной вариабельностью сердечного или дыхательного ритмов). Для изучения подобных мультимодальных систем требуются разработка, исследование и развитие принципиально новой методологии, позволяющей из совокупности коррелированных рядов извлекать новую информацию о свойствах системы, которую невозможно обнаружить путем анализа отдельных составляющих (к примеру, путем рассмотрения по отдельности результатов ЭКГ, спирометрии, тепловидения и пр.). В науке подход, идущий ещё от Аристотеля («Целое больше, чем сумма его частей»), приводящий к выявлению нового качества исследуемой системы, не сводимого к сумме качеств ее элементов, вызывает последнее время всё больший интерес у исследователей и имеет все основания считаться высокоперспективным.

Разработка современной методологии определения индивидуального функционально-физиологического статуса организма людей на основе проведения синхронных многоканальных динамических измерений разными физическими неинвазивными методами с применением непродолжительных мягких функциональных проб и с последующей совместной математической обработкой полученных биоданных представляет собой актуальную и пока еще не решенную задачу современной биомедицины. Ее решение позволит сформировать новое направление в персонализированной диагностике, поскольку даст возможность внесения коррекций в системный гомеостатический портрет пациента на основе выявленных индивидуальных особенностей его организма.

Практическим итогом применения описанного выше подхода является разработка методов принятия решения автоматизированной системой, которое не способен выработать человек в силу ограниченности его когнитивных возможностей и отсутствия прямого доступа к корреляционным взаимосвязям между отдельными проявлениями свойств сложного многопараметрического объекта. Успешное принятие таких решений можно ожидать лишь от автоматизированных аппаратно-программных комплексов, анализирующих многопараметрическую задачу. В контексте обсуждаемой проблемы в качестве оригинального и высокоинформативного атрибута такого комплекса выступает тепловизионная фотоника.

В конечном итоге мы непременно приходим к необходимости привлечения искусственного интеллекта (ИИ), способного стать венцом работ в вышеописанном направлении исследований. Однако еще до воплощения результатов в форме ИИ необходимо разработать, исследовать, развить и опробовать методы, позволяющие этот ИИ в дальнейшем реализовать.

В общем виде целью, стоящей сегодня перед исследователями, использующими такой инструмент, как тепловизионная фотоника, является разработка инновационного высокоперспективного методологического подхода, включающего в себя применение одновременно нескольких оригинальных технических инструментов исследования (инженерных, физических, математических), в том числе ИК-термографии нового поколения, и математических средств интеллектуального анализа данных, в совокупности приводящих к появлению новых знаний об изучаемой сложной системе, не доступных для извлечения с применением иных методов научного исследования. Решение данной научно-технической проблемы направлено на более ясное понимание фундаментальных механизмов биологических процессов, протекающих в организме человека и млекопитающих в целом.

По ходу можно отметить, что у нашего научного коллектива уже накоплен значительный опыт проведения многоканальных биофизических исследований с использованием в качестве испытуемых не только человека [13], но также мелких и крупных лабораторных животных (крысы, минисвиньи и др.) [14–16]. При поиске у млекопитающих корреляции и согласованности трендов их сердечного и дыхательного ритмов был разработан и реализован модифицированный метод Блэнда–

Алтмана [17], исходная версия которого [18] широко применяется сегодня в мире в разнообразных биомедицинских исследованиях. В модифицированной форме у метода появилась возможность определять корреляцию и согласованность не только у однотипных в отношении единиц измерения величин (например, при сопоставлении двух ритмов дыхания или двух сердечных ритмов), но также у величин разной природы (например, сравнение ритма дыхания с частотой сердечных сокращений).

Метод сорбционно усиленной инфракрасной термографии

В настоящее время в мире характеристики дыхания у млекопитающих традиционно определяют, вводя трубки (канюли) в носовые отверстия, или у человека с применением прижатых к лицу масок. Такой подход уже сам по себе нарушает аэродинамику в верхних дыхательных путях и является раздражающим для реципиента. С использованием базовых принципов тепловизионной фотоники нами были открыты беспрецедентные возможности современного высокоскоростного и высокочувствительного тепловизионного метода для изучения динамики легочного дыхания у людей и животных, что позволило создать измерительную технологию, свободную от указанных недостатков.

В работе [19] подробно описан вышеупомянутый оригинальный подход, названный методом сорбционно-усиленной инфракрасной термографии (Sorption-Enhanced Infrared Thermography – SEIRT). Использование эффекта выделения (и поглощения) теплоты фазового перехода первого рода при адсорбции/конденсации (и испарении) молекул воды, взаимодействующих с твердой поверхностью сорбционного индикатора, привело к появлению тепловизионного метода, оказавшегося в десятки раз чувствительнее других известных из литературы способов исследования дыхания, реализуемых с помощью тепловидения.

Примеры применения метода SEIRT представлены на рис. 3 (для дыхания человека) и рис. 4 (для лабораторной крысы).

О высоком динамическом диапазоне SEIRT можно судить, к примеру, из того, что измеренный с его помощью перепад температуры сорбционного индикатора при наблюдении естественного спонтанного дыхания в случаях, приведенных на рис. 3 и 4, составляет даже у столь малого животного, как лабораторная крыса, около 10 °С (!) при рабочей чувствительности использованного матричного тепловизора 0,03 °С.

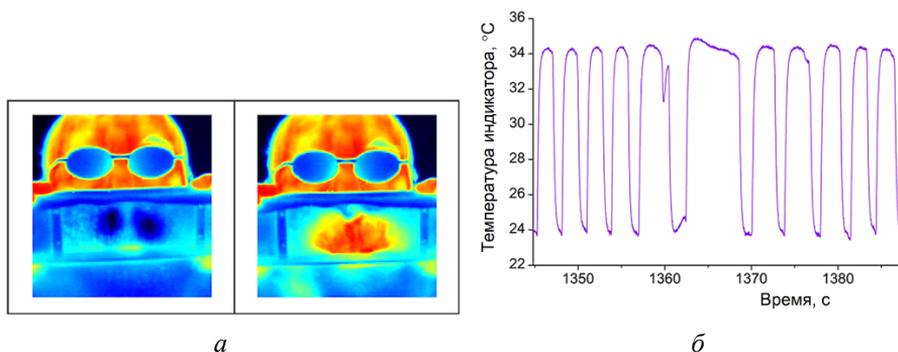


Рис. 3. Пара термограмм (а), отражающих тепловой след на сорбционном индикаторе при дыхании человека (слева – фаза вдоха, справа – выдоха); фрагмент, демонстрирующий вариацию температуры сорбционного индикатора при спокойном спонтанном дыхании человека с попавшим в этот период продолжительным выдохом (б) (широкий «холм» в средней части графика); более высокие значения температуры на характеристике соответствуют фазе выдоха (адсорбция/конденсация на поверхности индикатора молекул воды, содержащихся в выдыхаемом воздухе), и более низкие значения соответствуют фазе вдоха (охлаждение индикатора при испарении с его поверхности сконденсированной влаги)

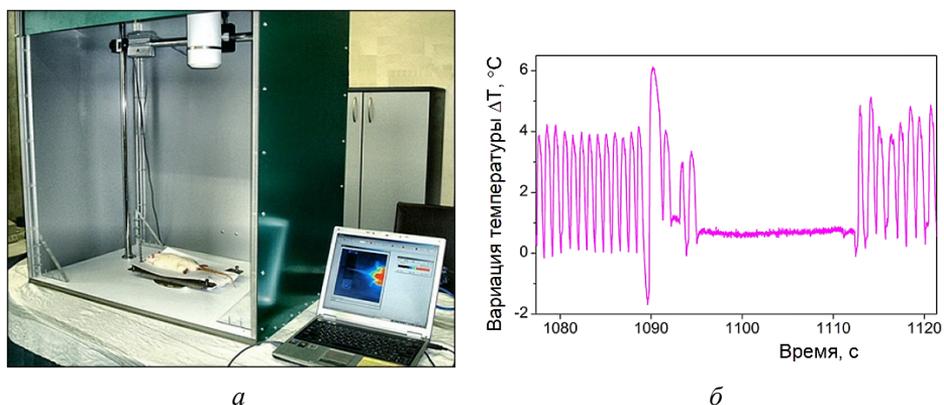


Рис. 4. Лабораторная крыса в специальном боксе, экранирующем внутреннее пространство от внешнего теплового излучения (а), сверху на штативе закреплена тепловизионная камера ТКВр-ИФП/СВИТ; вариация температуры сорбционного индикатора, расположенного вблизи внешних дыхательных отверстий крысы (б); отсутствие модуляции сигнала в средней части графика демонстрирует продолжительное апноэ у спящего (наркотизированного) животного; измерения сделаны вышеупомянутым матричным тепловизором с применением метода SEIRT

Отметим, что метод SEIRT упомянут как один из заслуживающих внимания в контексте решения проблем, связанных с пандемией COVID-19, что было отражено в обзоре [20], опубликованном в 2021 г. в высокорейтинговом журнале IEEE Reviews in Biomedical Engineering.

Заключение

Современная тепловизионная фотоника, построенная на использовании матричных детекторов ИК-излучения, будучи примененной совместно с другими инструментами биомедицинской диагностики, усиленная компьютерной обработкой и интеллектуальным анализом данных, синхронно измеренных на том же живом объекте другими устройствами с применением интервентного воздействия на объект исследования, наделена надёжными перспективами для своего успешного развития и получения качественно новых высокоинформативных результатов. Имеются все основания ожидать, что в ближайшем будущем временные ряды данных, полученные в разных экспериментальных условиях с участием не только испытуемых волонтеров, но и реальных пациентов, будут обрабатываться с использованием разнообразных математических методов, в том числе с помощью нейросети, которая сможет учиться предсказывать (прогнозировать) последующее поведение и физические состояния живой системы.

С применением тепловизионной фотоники в качестве основного атрибута новой технологии будет разработан инновационный методологический подход, принципиально отличающийся от того, что до сих пор применялся в медико-биологической сфере при изучении человека. Образно выражаясь, он «держится на трех китах»:

1) синхронное (!) измерение неинвазивными и необременительными для испытуемого биофизическими методами сразу многих (порядка десяти) физиологических показателей с автоматизированным получением цифровой информации о характеристиках организма с частотой непрерывной записи сигналов не менее 100 Гц;

2) применение интервентного (преимущественно, неоднократного) воздействия на организм в ходе диагностического обследования с целью провоцирования сдвигов гомеостаза и получения ответного биофизического отклика;

3) математическая и компьютерная совместная обработка непрерывных временных рядов биоданных, полученных разными измерительными методами, в том числе тепловизионным, с применением многомерного статистического анализа и других адекватных для достоверной диагностики аналитических методов и подходов. По результатам такой обработки будет осуществлен алгоритмический поиск

с выявлением принципиально новых признаков отклонения организма от нормы на основании критериев, найденных исключительно путем математического анализа данных и в принципе не видимых «невооруженным глазом».

Предполагается, что на основе такой инновационной технологии впервые возникнут реальные перспективы прогнозирования и контроля состояния изучаемой системы с неизвестными (скрытыми) свойствами, на основе чего, в частности, появится возможность проведения научно обоснованной оптимизации лечения, осуществления донозологической диагностики и в итоге успешной борьбы с широким спектром разнообразных патологий у людей. Результаты этой работы существенно расширят современные представления о взаимосвязи ведущих жизнеобеспечивающих систем организма, характере согласованности их совместного функционирования при внешних физических атаках (вмешательствах) и стрессах. Развитые подходы будут востребованы практической медициной и найдут также место при решении актуальных задач физиологии человека и животных.

Список литературы

1. Lawson, R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer / R. Lawson // *Can. Med. Assoc. J.* – 1956. – Vol. 75. – P. 309–311.
2. Lawson, R. Thermography; a new tool in the investigation of breast lesions / R. Lawson // *Can. Serv. Med. J.* – 1957. – Vol. 8. – P. 517–524.
3. Vainer, B.G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment / B.G. Vainer // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41. – P. 065102.
4. Vainer, B.G. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength / B.G. Vainer // *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000; Reims, France, July 18–21, 2000 / Proceedings.* ed. by D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, G.M. Carlomagno. UTAP URCA. – 2000. – P. 84–91.
5. Vainer, B.G. Treated skin temperature regularities revealed by IR thermography / B.G. Vainer // *Proc. SPIE.* – 2001. – Vol. 4360. – P. 470–481.
6. Вайнер, Б.Г. Матричное тепловидение в физиологии: Исследование сосудистых реакций, перспирации и терморегуляции у человека / Б.Г. Вайнер. – Новосибирск: Изд-во Сибир. отдел. РАН, 2004. – 96 с.
7. Vainer, B.G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans / B.G. Vainer // *Phys. Med. Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. R63–R94.

8. Tarkov, M.S. Evaluation of a thermogram heterogeneity based on the wavelet Haar transform / M.S. Tarkov, B.G. Vainer // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, April 20-21, 2007. – P. 145–152.

9. Vainer, B. Heterogeneous thermograms: the methods of attack / B. Vainer, A. Moskalev // QIRT2008, 9-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Proceedings; July 2-5, 2008, Krakow-Poland. – Edited by Boguslaw Wiecek. – Poland, Technical University of Lodz, Institute of Electronics. – 2008. – P. 157–164.

10. Vainer, B.G. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption / B.G. Vainer // ChemPlusChem. – 2020. – Vol. 85. – P. 1438–1454.

11. Иванов, К.П. Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты / К.П. Иванов // Т. 1: Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. – Л.: Наука, 1990. – 307 с.

12. Vainer, B.G. Radial artery pulse wave velocity: a new characterization technique and the instabilities associated with the respiratory phase and breath-holding / B.G. Vainer // *Physiol. Meas.* – 2023 – Vol. 44. – P. 015004.

13. Vainer, B.G. Up-to-date thermal imaging systems in the multichannel automated measurements / B.G. Vainer // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 44894 Proceedings, APEIE-2018; Novosibirsk, October 2-6, 2018: in 8 Volumes. Papers in English. – Novosibirsk: NSTU, IEEE. – 2018. – Vol. 1, Part 2. – 389 p. – P. 334–338.

14. Вайнер, Б.Г. Синхронизм, выявленный при одновременном измерении сердечного ритма, динамики дыхания и поверхностной температуры тела у лабораторных крыс в состоянии сна / Б.Г. Вайнер, Е.Г. Вергунов, В.И. Баранов // Наука и образование: проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф.; 30 августа 2014 г.: в 5 ч. Ч. 3. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – 164 с. – С. 39–41.

15. Вайнер, Б.Г. Согласованность ритмов дыхания и сердца у экспериментальных животных при разном составе дыхательной смеси / Б.Г. Вайнер, Е.Г. Вергунов, Д.С. Сергеевичев // Вестник психофизиологии. – 2016. – № 4. – С. 24–33.

16. Vainer, B.G. Infrared thermography as applied to the studies of cardiovascular system in rats / B.G. Vainer, V.I. Baranov, E.G. Vergunov // Proc. QIRT 2014 Conference; 7-11 July 2014, Bordeaux, France. DOI: 10.21611/qirt.2014.157. – URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2014/QIRT%202014%20Papers/QIRT-2014-157.pdf>.

17. Вергунов, Е.Г. Модификация метода Блэнда-Алтмана и её применение для оценки согласованности сердечного и дыхательного ритмов / Е.Г. Вергунов, Б.Г. Вайнер // Вестник психофизиологии. – 2016. – № 4. – С. 34–45.

18. Bland, J.M. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement / J.M. Bland, D.G. Altman // *Lancet*. – 1986. – Vol. 1. – P. 307–310.

19. Vainer, B.G. A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring / B.G. Vainer // *Ann. Biomed. Eng.* – 2018. – Vol. 46. – P. 960–971.

20. Wearable sensing and telehealth technology with potential applications in the coronavirus pandemic / X. Ding, D. Clifton, N. Ji, N.H. Lovell, P. Bonato, W. Chen, X. Yu, Z. Xue, T. Xiang, X. Long, K. Xu, X. Jiang, Q. Wang, B. Yin, G. Feng, Y.T. Zhang // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* – 2021. – Vol. 14. – P. 48–70.

References

1. Lawson R. Implications of surface temperatures in the diagnosis of breast cancer // *Can. Med. Assoc. J.* – 1956. – Vol. 75. – P. 309–311.

2. Lawson R. Thermography; a new tool in the investigation of breast lesions // *Can. Serv. Med. J.* – 1957. – Vol. 8. – P. 517–524.

3. Vainer B. G. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41. – P. 065102.

4. Vainer B. G. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength // *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000, Reims, France, July 18–21, 2000. Proceedings.* Ed. by D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, and G. M. Carlomagno. UTAP URCA – 2000. – P.84–91.

5. Vainer B. G. Treated skin temperature regularities revealed by IR thermography // *Proc. SPIE.* – 2001. – V.4360. – P.470–481.

6. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography in physiology: Investigation of vascular response, perspiration, and thermoregulation in humans. – Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2004. – 96 pp. ISBN 5-7692-0706-X.

7. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Phys. Med. Biol.* – 2005. – V.50. – P.R63–R94.

8. Tarkov M. S., Vainer B. G. Evaluation of a thermogram heterogeneity based on the wavelet Haar transform // *IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Proceedings.* – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, April 20-21, 2007. – P.145–152.

9. Vainer B., Moskalev A. Heterogeneous thermograms: the methods of attack // *QIRT2008, 9-th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Proceedings, July 2-5, 2008, Krakow-Poland.* – Edited by Boguslaw Wiecek. – Poland, Technical University of Lodz, Institute of Electronics. – 2008. – P.157–164.

10. Vainer B. G. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption // *ChemPlusChem*. – 2020. – V.85. – P.1438–1454.

11. Ivanov K. P. Fundamentals of the body energetics: Theoretical and practical aspects // Volume 1. General energetics, heat exchange and thermoregulation. – Leningrad: Nauka. – 1990. – 307 pp.

12. Vainer B. G. Radial artery pulse wave velocity: a new characterization technique and the instabilities associated with the respiratory phase and breath-holding // *Physiol. Meas.* – 2023 – V.44 – P.015004.

13. Vainer B. G. Up-to-date thermal imaging systems in the multichannel automated measurements // 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 44894 Proceedings, APEIE-2018, Novosibirsk, October 2-6, 2018. In 8 Volumes. Papers in English. – Novosibirsk: NSTU, IEEE. – 2018. – V.1, Part 2. – 389 pp. – P.334–338.

14. Vainer B. G., Vergunov E. G., Baranov V. I. Synchronism revealed from the combined measurements of heart rate, breath dynamics and body surface temperature in narcotized laboratory rat // *Science and Education: Topical Problems and Future Trends / Intern. Scientific-Practical Conf.*, August 30, 2014. Proceedings. Part 3. Tambov: Consulting company Ucom Ltd, 2014, pp. 39–41.

15. Vainer B. G., Vergunov E. G., Sergeevichev D. S. Consistency of respiratory and cardiac rhythms in experimental animals exposed to the respiratory gases of different composition mixtures // *Psychophysiology News (ISSN: 2227-6157)*. – 2016 – No.4 – P.24–33.

16. Vainer B. G., Baranov V. I., Vergunov E. G. Infrared thermography as applied to the studies of cardiovascular system in rats // *Proc. QIRT 2014 Conference*, 7-11 July 2014, Bordeaux, France. – DOI: 10.21611/qirt.2014.157. – <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2014/QIRT%202014%20Papers/QIRT-2014-157.pdf>

17. Vergunov E. G., Vainer B. G. Bland-Altman plot modification and its application to assessing agreement between heart and breathing rates // *Psychophysiology News (ISSN: 2227-6157)* – 2016 – No.4 – P.34–45.

18. Bland J. M., Altman D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement // *Lancet*. – 1986. – V.1. – P.307–310.

19. Vainer B. G. A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring // *Ann. Biomed. Eng.* – 2018. – V.46. – P.960–971.

20. Ding X., Clifton D., Ji N., Lovell N. H., Bonato P., Chen W., Yu X., Xue Z., Xiang T., Long X., Xu K., Jiang X., Wang Q., Yin B., Feng G., Zhang Y.T. Wearable sensing and telehealth technology with potential applications in the coronavirus pandemic // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* – 2021. – V.14. – P.48–70.

Сведения об авторе

ВАЙНЕР Б.Г.

e-mail: *boris-stmt@yandex.ru*

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Лаборатории физических основ интегральной микрофотозлектроники Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, профессор Специализированного учебно-научного центра Новосибирского государственного университета, г. Новосибирск

About the author

B.G. VAINER

e-mail: *boris-stmt@yandex.ru*

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Principal Research Scientist, Laboratory of Physical Principles of Integral Microphotoelectronics, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University, Professor of Specialized Educational Scientific Center of Novosibirsk State University, Novosibirsk

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Получена: 02.08.2024

Одобрена: 10.08.2024

Принята к публикации: 15.08.2024

Financing. The work was not sponsored.

Conflict of Interest. The author declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 02/08/2024

Approved: 10/08/2024

Accepted for publication: 05/08/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Вайнер, Б.Г. Современная тепловизионная фотоника в биомедицине / Б.Г. Вайнер // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 5–21.

Please cite this article in English as: Vainer B.G. Modern infrared thermography photonics in biomedicine. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 5–21.

УДК 681.7.068/.069

Д.А. Кислов, А.С. Шалин

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Российская Федерация

УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ МЕТАПОВЕРХНОСТЬЮ ЗА СЧЕТ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Генерация второй гармоники с использованием метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами является активной областью исследований в области фотоники и оптики. В работе показано, что использование метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами позволяет усиливать сигнал второй гармоники. Например, изменение геометрии метаповерхности может привести к увеличению нелинейной поляризуемости вещества и, как следствие, к более эффективной генерации второй гармоники. Кроме того, метаповерхности могут быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить фазовую согласованность волны второй гармоники, что также способствует повышению эффективности генерации. Таким образом, использование метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами представляет собой перспективный подход к созданию эффективных и компактных источников света с удвоенной частотой. Это может иметь важные практические приложения в оптической связи, лазерной технике и других областях, где требуется высокоэффективная генерация света в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, PDMS, растягиваемая метаповерхность, AlGaAs, пропускание, отражение.

D.A. Kislov, A.S. Shalin

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russian federation

CONTROLLING THE EFFICIENCY OF SECOND HARMONIC GENERATION FROM A METASURFACE DUE TO ITS MECHANICAL STRETCHING

Second harmonic generation using metasurfaces with controlled optical properties is an active area of research in photonics and optics. The work shows that the use of metasurfaces with controlled optical properties makes it possible to control and enhance SHG. For example, a change in the geometry of the metasurface can lead to an increase in the nonlinear polarizability of the substance and, consequently, to more efficient generation of the second harmonic. In addition, metasurfaces can be designed in such a way as to ensure phase consistency of the second harmonic wave, which also helps to increase the SHG efficiency. Thus, the use of metasurfaces with controlled optical properties represents a promising approach for creating efficient and compact frequency-doubled light sources. This could have important practical applications in optical communications, laser technology, and other areas that require highly efficient generation of light in the visible and near-infrared ranges.

Keywords: second harmonic generation, PDMS, stretchable metasurface, AlGaAs, transmission, reflection.

Метаповерхности – это искусственные структуры, созданные на микро- или наномасштабе, которые позволяют контролировать и управлять светом на наноуровне. В наши дни диэлектрические метаповерхности нашли свое широкое применение в различных областях науки и технологии. Используя такие структуры, можно получить огромное количество различных физических эффектов. Одним из таких эффектов, имеющих важное значение, является генерация высших гармоник.

Существует много способов управления оптическими свойствами диэлектрических метаповерхностей: изменение геометрии метаструктуры; изменение диэлектрических свойств внешней для метаатомов среды; использование в конструкции метаповерхности активных 2D-слоев с управляемым оптическим откликом за счет внешних стимулов, таких как электрическое или магнитное поле, тепло или свет и т.д. В данной работе были рассмотрены некоторые из этих способов.

Управление оптическими свойствами метаповерхностей является активно развивающимся направлением науки и технологии. Одним из способов управления оптическими свойствами метаповерхностей является изменение их геометрии. Варьирование формы и размера метаатомов может привести к изменению рассеивающих и пропускных свойств у различных диапазонов длин волн метаповерхности в целом. Однако этот способ обладает рядом очевидных недостатков. Невозможно в реальном времени изменять размеры метаатомов в метаповерхности, тем более делать это обратимо. Для этого нужно изготавливать разные образцы метаповерхностей, отличающихся размерами и геометрией метаатомов.

Однако существует способ обратимого управления оптическими свойствами (отражение, пропускание) метаповерхности – механическое растяжение матрицы, в которой находятся метаатомы, при условии, что она обладает эластичностью. Механическое растяжение матрицы может быть достигнуто различными способами, например, с помощью пьезоэлектрических элементов или механических устройств. При растяжении матрицы изменяется период расположения метаатомов в метаповерхности, причем это изменение обратимо, что может быть полезно для создания оптических фильтров, устройств для управления светом или оптических сенсоров. Также механическое растяжение матрицы может использоваться для создания оптических линз с переменным фокусным расстоянием. Путем изменения геометрических параметров метаповерхности можно контролировать фокусировку света, что позволяет

создавать линзы с возможностью изменения фокусного расстояния в реальном времени.

Очевидно, что данный метод можно применять для управления генерацией второй гармоники от метаповерхностей. Как было отмечено выше, механическое растяжение матрицы является обратимым процессом, что позволяет управлять эффективностью генерации второй гармоники в реальном времени. Это открывает новые возможности для создания динамических оптических устройств. Различные геометрии могут создавать различные эффекты, такие как усиление поля, усиление рассеяния и интерференция. Это влияет на генерацию второй гармоники и позволяет контролировать ее параметры.

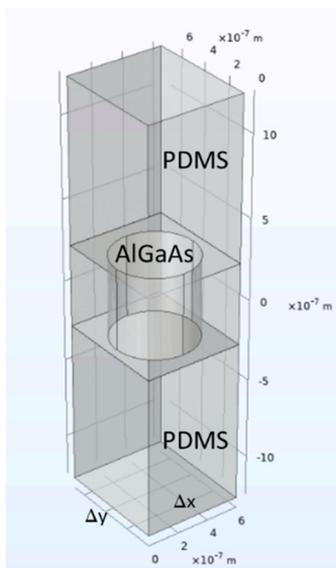


Рис. 1. Элементарная ячейка периодической метаповерхности

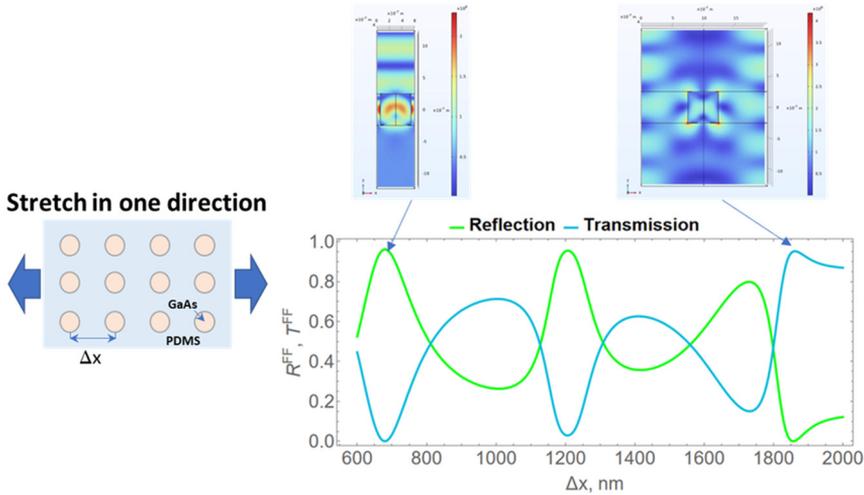
созданы в матрице PDMS. На рис. 1 представлена элементарная ячейка метаповерхности, Показаны цилиндрические метаатомы из AlGaAs в матрице из PDMS. Их размер фиксирован: $R=250$ nm, $H=500$ nm. Δx и Δy – период метаповерхности вдоль осей x и y . На гранях вдоль осей x и y реализованы периодические граничные условия типа Флоке. Верхняя и нижняя грани задаются периодическими портами, которые генерируют плоскую линейно поляризованную волну с постоянной интенсивностью $I_0 = 10^{13}$ Вт/м².

В качестве прозрачной эластичной матрицы отлично подходит полидиметилсилоксан (PDMS). Это эластомер, широко используемый в различных областях, включая микрофлюидику, биомедицину и оптику. Он обладает прекрасными оптическими и механическими свойствами, что делает его привлекательным для использования в различных устройствах.

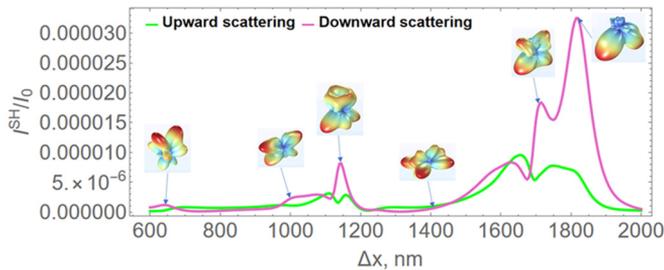
Для выбранных в исследовании длин волн PDMS характеризуется почти постоянным показателем преломления $n = 1,4$ и практически отсутствующим поглощением.

В COMSOL Multiphysics была реализована модель периодической метаповерхности, метаатомы которой располо-

Для начала были исследованы оптические характеристики метаповерхности при изменении периодичности только вдоль оси x . При этом период по оси y оставался неизменным, $\Delta y = 600$ нм. На рис. 2, *a* приведены графики коэффициентов отражения и пропускания метаповерхности при нормальном падении и растяжении PDMS-матрицы вдоль оси x .



a



b

Рис. 2. Результаты моделирования оптических свойств метаповерхности в PDMS при растяжении вдоль направления оси x : *a* – коэффициенты отражения и пропускания метаповерхности на фундаментальной частоте; на вставках показано пространственное распределение ближнего поля для двух разных периодов метаповерхности; *b* – эффективность рассеяния ВГ «вверх» и «вниз»; на вставках показаны диаграммы направленности дальнего поля на частоте второй гармоники

Показано, что при растяжении метаповерхности светоотражающая/светопропускающая способность промодулирована. На вставках показаны карты пространственного распределения ближнего поля для случая полного отражения (левая панель) и случая полного пропускания (правая панель). Приведенные графики демонстрируют, что метод

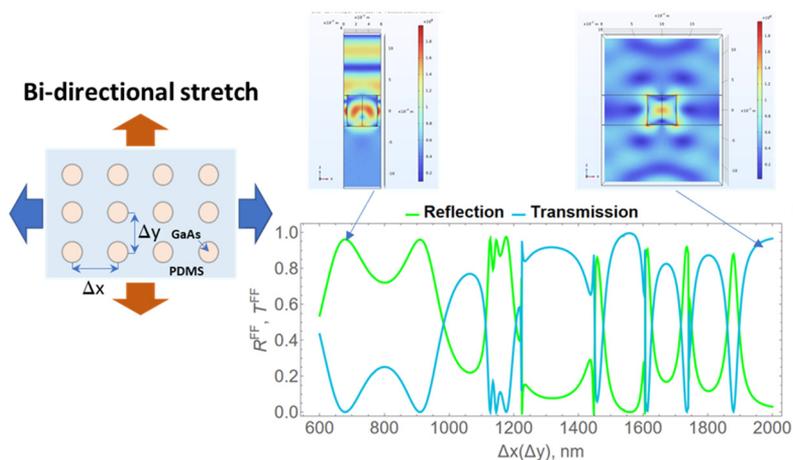
пригоден для точного обратимого управления оптическими характеристиками диэлектрической метаповерхности.

На рис. 2, б показаны результаты моделирования эффективности рассеяния одного метаатома на частоте ВГ в верхнее и нижнее полупространство с учетом влияния соседних метаатомов периодической 2D-решетки. Анализируя кривые, следует выделить два диапазона периодов метаповерхности, где эффективность ГВГ становится на порядок больше по сравнению с ГВГ уединенного метаатома ($I_{SH}/I_0 \approx 10^{-6}$). Так, например в диапазоне Δx от 1000 до 1200 нм эффективность в пике возрастает до значения $I_{SH}/I_0 \approx 10^{-5}$. При этом более эффективна генерация «вниз», что подтверждается диаграммой направленности рассеяния в дальней зоне. Второй диапазон периодов Δx , который следует отметить, от 1600 до 2000 нм. Здесь также более эффективна ГВГ в нижнее полупространство (см. диаграмму направленности в дальней зоне). При этом значение эффективности в пике $I_{SH}/I_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, можно сделать вывод, что, управляя оптическими характеристиками на фундаментальной частоте, можно получать усиление ГВГ, причиной которого будут коллективные эффекты в метаповерхности.

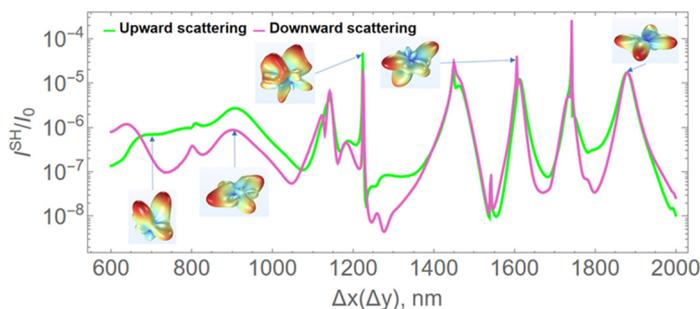
Далее были исследованы оптические свойства метаповерхности при одинаковом растяжении ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3). Графики коэффициентов отражения и пропускания промодулированы с большей частотой по сравнению с предыдущей метаповерхностью (сравнить рис. 2, а и 3, а).

На графиках эффективности ГВГ также стало больше резонансов по сравнению с предыдущей метаповерхностью, что очевидно связано с другой структурой ближних полей при изменении периодичности метаповерхности и интерференцией рассеянного поля отдельными метаатомами. При этом значение эффективности ГВГ в нижнее полупространство в пике становится еще больше и достигает значения $I_{SH}/I_0 \approx 10^{-4}$, что соизмеримо с полной эффективностью ГВГ уединенной цилиндрической наночастицей в воздухе.

Генерация второй гармоники (ГВГ) – важное явление в физике и оптике, которое широко используется в различных областях. С другой стороны, управляемые метаповерхности – это новые искусственные структуры, созданные с целью управления и модификации электромагнитных волн. Они позволяют манипулировать фазой, амплитудой и направлением света, что открывает новые возможности для генерации второй гармоники. Объединение этих двух технологий позволяет создавать эффективные источники света с широким диапазоном частот.



a



b

Рис. 3. Результаты моделирования оптических свойств метаповерхности в PDMS при одинаковом растяжении вдоль направления осей x и y : *a* – коэффициенты отражения и пропускания метаповерхности на фундаментальной частоте; на вставках показано пространственное распределение ближнего поля для двух разных периодов метаповерхности; *b* – эффективность рассеяния ВГ в верхнее и нижнее полупространство; на вставках показаны диаграммы направленности дальнего поля на частоте второй гармоники

Одним из перспективных направлений развития данной технологии является создание сверхкомпактных источников света на основе обратно управляемых метаповерхностей. Это позволит уменьшить габариты и повысить эффективность генераторов второй гармоники, что имеет большое значение для интеграции этих источников в микроэлектронику и микрофотонику. Такие устройства могут быть использованы в оптических коммуникационных схемах, биомедицинских исследованиях, а также в оптических устройствах обработки информации.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию новых инновационных устройств и открытию новых горизонтов в оптической науке.

Список литературы

1. Li, Aobo. Metasurfaces and their applications / Li, Aobo, Singh, Shreya and Sievenpiper, Dan // *Nanophotonics*. – 2018. – Vol. 7, no. 6. – P. 989–1011.
2. CPA-Lasing Associated with the Quasibound States in the Continuum in Asymmetric Non-Hermitian Structures / D.V. Novitsky, A.C. Valero, A. Krotov, T. Salgals, A.S. Shalin, A.V. Novitsky // *ACS Photonics*. – 2022. – Vol. 9. – P. 3035–3042.
3. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering / A.V. Kuznetsov, A. Canós Valero, M. Tarkhov, V. Bobrovs, D. Redka, A.S. Shalin // *Nanophotonics*. – 2021. – Vol. 10. – P. 4385–4398.
4. Medvedev, I.D. Exceptional Points in All-Dielectric Structure with Only In-Plane Symmetry Breaking / I.D. Medvedev, A.V. Kuznetsov, V. Bobrovs // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2024. – P. 184–188.
5. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведенной квадратичной нелинейностью / Е.И. Донцова, И.А. Лобач, А.В. Достовалов, С.И. Каблуков // *Прикладная фотоника*. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 238–256.

References

1. Li A., Singh S., Sievenpiper D. Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics*, 2018, vol. 7, no. 6, pp. 989-1011.
2. Novitsky D.V., Valero A.C., Krotov A., Salgals T., Shalin A.S., Novitsky A.V. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-hermitian structures. *ACS Photonics*, 2022, vol. 9, pp. 3035-3042.
3. Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Tarkhov M., Bobrovs V., Redka D., Shalin A.S. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering. *Nanophotonics*, 2021, vol. 10, pp. 4385-4398.
4. Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2024, vol. 1126, pp. 184-188.
5. Dontsova E.I., Lobach I.A., Dostovalov A.V., Kablukov S.I. Issledovanie polarizatsionnykh svoystv generatsii vtoroi garmoniki v sve-tovodakh s periodicheski navedennoi kvadratischnoi nelineinost'iu [Polarization features of second harmonic generation in periodically poled silica fibers]. *Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 238-256.

Сведения об авторах

КИСЛОВ Д.А.

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Долгопрудный

ШАЛИН А.С.

e-mail: alexandesh@gmail.com

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Долгопрудный

About the authors

D.A. KISLOV

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

A.S. SHALIN

e-mail: alexandesh@gmail.com

D.Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Tunable Optical Nanostructures of the Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00037.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 15.08.2024

Одобрена: 20.08.2024

Принята к публикации: 22.08.2024

Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-72-00037.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 15/08/2024

Approved: 20/08/2024

Accepted for publication: 22/08/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Кислов, Д.А. Управление эффективностью генерации второй гармоники метаповерхностью за счет ее механического растяжения / Д.А. Кислов, А.С. Шалин // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 22–29.

Please cite this article in English as: Kislov D.A., Shalin A.S. Controlling the efficiency of second harmonic generation from a metasurface due to its mechanical stretching. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 22-29.

УДК 621.373.826; 621.9.048.7

А.Г. Маликов, А.А. Голышев

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Российская Федерация

ЛАЗЕРНОЕ АДДИТИВНОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается возможность выращивания металлокерамических материалов с использованием двух технологий лазерного выращивания: прямое лазерное осаждение (DMD) и лазерная поверхностная наплавка (LSC). Показана физическая картина, происходящая в данных технологиях. Применены законы подобия для описания геометрических характеристик наплавляемых треков. С помощью синхротронного излучения установлен структурно-фазовый состав получаемых покрытий. Измерены механические свойства.

Ключевые слова: лазерное аддитивное выращивание, металлокерамические материалы, структурно-фазовое состояние, синхротронное излучение, механические свойства.

A.G. Malikov, A.A. Golyshev

Institution of Science, S.A. Khristianovich Institute
of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

LASER ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL-CERAMIC MATERIALS

The study explores the possibility of manufacturing metal-ceramic materials using two laser manufacturing technologies: Direct Metal Deposition (DMD) and Laser Surface Cladding (LSC). The physical phenomena occurring in these technologies are demonstrated. Similarity laws are applied to describe the geometric characteristics of clad tracks. The structure-phase composition of the resulting coatings is determined using synchrotron radiation. Mechanical properties are measured.

Keywords: laser additive manufacturing, metal-ceramic materials, structure-phase state, synchrotron radiation, mechanical properties.

Введение

В последние годы аддитивное производство (АП), известное также как 3D-печать, привлекает значительное внимание благодаря широкому спектру областей применения в различных отраслях, таких как аэрокосмическая и автомобильная промышленность, биомедицина, ядерное производство и т.д. [1]. В настоящее время для печати используют

в основном металлические сплавы на основе титана, железа, алюминия, кобальта, никеля – более 30 различных марок, список которых продолжает расширяться [2]. Данные материалы уже хорошо изучены с точки зрения изготовления функциональных деталей с использованием АП. Однако на повестке дня стоит создание порошковых материалов, которые могут внести новый вклад в формирование высоких функциональных свойств изделий (прочность, твердость, износостойкость, работа при высоких температурах, высокая стойкость к растрескиванию, стойкость к многоцикловому нагружению и т.д.). Согласно классическому пониманию физики конденсированного состояния структура определяет свойства материалов, т.е. новые свойства можно получить, изменяя структуру материала определенным образом. В нашем случае именно металломатричные композиты (ММК) позволяют добиться свойств, которые трудно достичь для металлических сплавов [3]. ММК обладают повышенной механической прочностью, твердостью, износостойкостью и температурой эксплуатации. Однако создание изделий и покрытий из ММК сопряжено с рядом проблем. Разные теплофизические свойства материалов в результате неравновесного нагрева плавления и последующей кристаллизации под воздействием лазерного излучения могут приводить к получению нежелательных дефектов различного типа: пористость, растрескивание, несплавление и т.д. Необходимо для каждой металлокерамической порошковой композиции тщательно оптимизировать режимы лазерного воздействия (мощность лазерного излучения, длина волны лазерного излучения, плотность мощности, скорость процесса) с целью получения качественных покрытий и изделий [4]. Необходимо также тщательно изучать структурно-фазовый состав, от которого зависят непосредственно механические характеристики. К настоящему времени накоплена довольно обширная база данных по аддитивным технологиям. Для установления общих закономерностей эксперименты должны быть выполнены в широком диапазоне параметров лазерного воздействия. Для успешного решения физической задачи большое значение имеет правильный выбор переменных, характеризующих исследуемый объект. Обработка больших объемов данных существенно упрощается, если удастся представить их в виде зависимостей между безразмерными параметрами, как это делается при анализе сложных физических систем методом подобия [5]. Это позволяет уменьшить количество независи-

мых переменных. Кроме того, формулировка результатов на языке безразмерных параметров позволяет продвинуться в понимании физической сущности происходящих в исследуемой системе процессов и предсказании структурно-фазового состояния получаемых изделий.

В Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН в лаборатории лазерных технологий продолжают фундаментальные и прикладные исследования в области взаимодействия высокоэнергетического лазерного излучения с веществом. В рамках научного направления «Лазерная микрометаллургия» проводятся исследования с целью получения заданного структурно-фазового состава и механических свойств материала после лазерного воздействия.

1. Методология исследований

Изготовление металлокерамических покрытий осуществлялось с использованием двух лазерных технологий: прямое лазерное осаждение (DMD) и лазерная поверхностная наплавка (LSC). Для этого использовался наплавочно-сварочный комплекс, состоящий из многокоординатной руки и волоконного лазера с мощностью до 3 кВт и длиной волны 1,07 мкм [6]. Обе технологии схожи по типу излучения, но отличаются процессом формирования трека. В технологии LSC плавление происходит непосредственно в порошковом слое. В DMD порошок подается в ванну жидкого расплава (рис. 1).

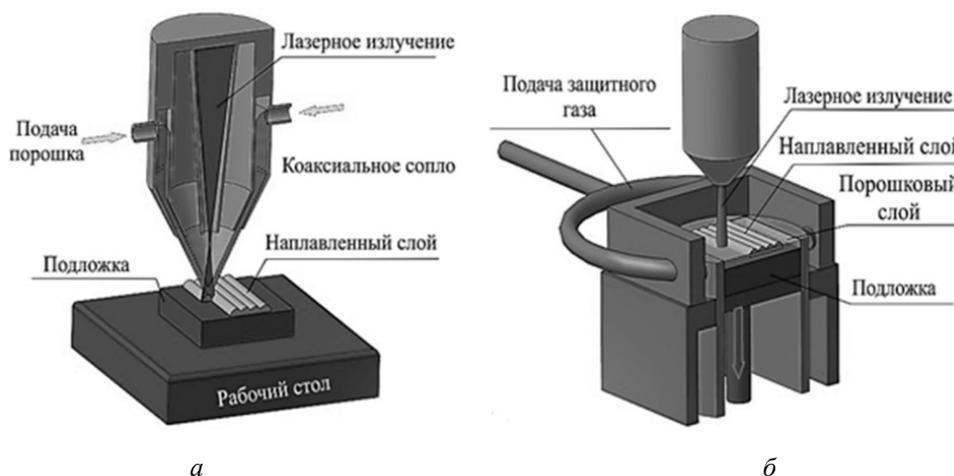


Рис. 1. Схематическое изображение лазерных технологий: а – технология прямого лазерного осаждения (DMD); б – технология лазерной поверхностной наплавки (LSC)

Физические процессы, протекающие в данных технологиях, близки и включают взаимодействие лазерного излучения с веществом, гидродинамику течения расплава, кристаллизацию расплава, механику твердого тела, а также газовую динамику при технологии DMD. В зависимости от интенсивности и длительности воздействия лазерного излучения различают следующие стадии взаимодействия излучения с материалом при лазерной обработке: подвод лазерного излучения к материалу, поглощение светового потока и передача его энергии твердому телу, нагрев материала без видимого разрушения, плавление материала в аддитивных технологиях, кристаллизация и остывание материала после окончания лазерного воздействия. Характер протекания этих процессов зависит от свойств обрабатываемых материалов. Поглощение излучения происходит на поверхности или внутри и зависит от отражающей способности материала, а передача энергии вглубь обусловлена теплопроводностью. Температурный режим нагрева материала определяется плотностью мощности излучения лазера. При низкой плотности мощности (примерно до 10^3 – 10^4 Вт/см²) происходит нагрев материала без его плавления или испарения. С повышением этой величины примерно до 10^6 – 10^7 Вт/см² материал плавится, а при плотности мощности излучения, превышающей 10^7 Вт/см², материал разрушается вследствие испарения. Процесс взаимодействия лазерного излучения в аддитивных технологиях включает два глубоко зависимых, но в то же время физически существенно разных процесса: взаимодействие лазерного излучения с веществом и течение многофазной жидкости в условиях интенсивного выделения энергии и химических реакций (рис. 2) с последующей кристаллизацией. Бросающуюся в глаза специфику лазерной обработки составляют необычно высокие скорости нагрева и охлаждения. Когда лазерный луч встречается с поверхностью металла, то при условии ослабленного отражения (незеркальная поверхность) в месте встречи выделяется за короткое время столько тепловой энергии, что скорость локального нагрева может достигать миллиона градусов в секунду. С другой стороны, локальность взаимодействия луча и металла означает, что после прохождения луча практически мгновенно нагретый участок оказывается в окружении холодного металла, который интенсивно отводит тепло, обеспечивая почти столь же быстрое охлаждение. Скорость охлаждения за счет теплоотвода составляет

сотни тысяч градусов в секунду. Тонкий поверхностный слой практически мгновенно нагревается и столь же мгновенно охлаждается – в этом специфика лазерной обработки, которая широко используется для аддитивных технологий и может привести к возникновению особых, характерных именно для этой обработки структур, трещин, пор и несплавлений.

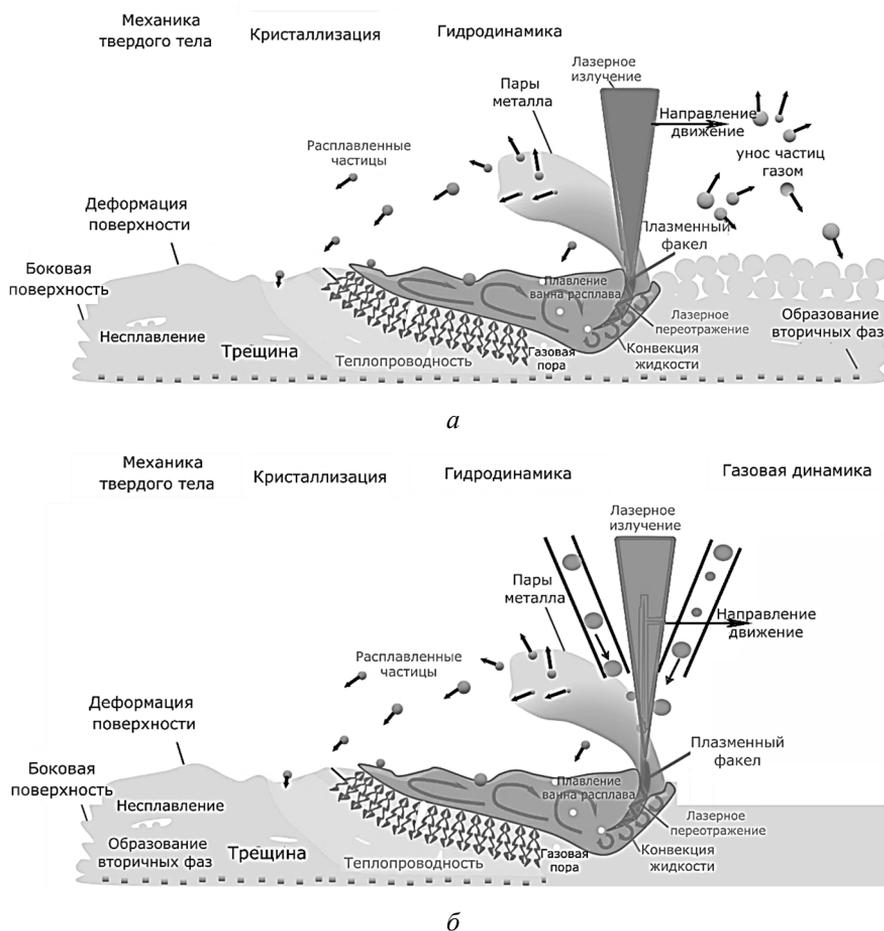


Рис. 2. Физические процессы, протекающие при технологии лазерного выращивания металлокерамических покрытий: *а* – технология прямого лазерного осаждения (DMD); *б* – технология лазерной поверхностной наплавки (LSC)

Данные проблемы нивелируются за счет оптимизации лазерного воздействия с веществом, при этом необходимо учитывать тип, концентрацию, размер керамических включений при наплавке металлокерамического покрытия.

Необходимо контролировать структурно-фазовый состав, от которого зависят механические свойства конечного покрытия. При выполнении аналитических исследований фазового состава создаваемых металлокерамических материалов использовали установку класса «мегасайенс», входящую в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения», экспериментальная станция «Дифрактометрия в „жестком“ рентгеновском диапазоне» (Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН). С помощью источника синхротронного излучения (СИ) была детально исследована эволюция структурно-фазового состава в объеме создаваемых материалов. В типичном эксперименте с использованием синхротронной дифракции образец анализируется на пропускание, а дифракционное изображение записывается с помощью детектора (рис. 3).

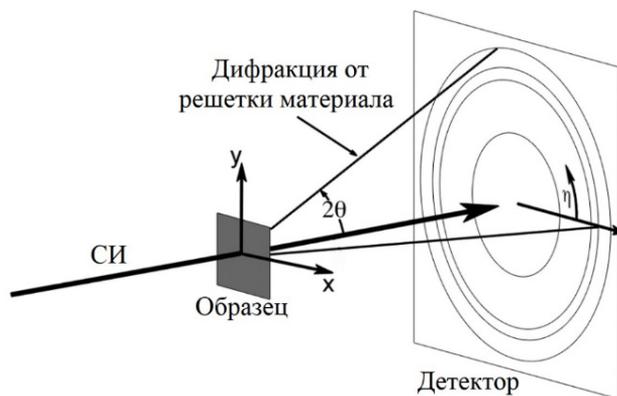


Рис. 3. Геометрия эксперимента по синхротронной дифракции

2. Применение методов подобия и размерности для описания процессов в АП

Известно, что свойства образца (геометрические размеры, структурно-фазовое состояние, механические свойства), формируемого при лазерной наплавке, являются сложной функцией, зависящей от большого количества различных параметров:

$$K = f(N \gg 1), \quad (1)$$

где N – это параметры наплавки, параметры лазерного излучения, параметры транспортирующего и защитного газа, параметры исходной порошковой смеси и т.д.

Однако, используя различные комбинации параметров, выражение (1) можно представить в виде:

$$K = f(A_i), \quad (2)$$

где A_i – набор безразмерных параметров, характеризующих систему фокусировки лазерного излучения, качество пучка, свойства и химический состав исходной порошковой смеси и другие.

Определение параметров, характеризующих физические процессы, происходящие при аддитивном выращивании, позволяет осуществлять контроль поведения ванны расплава. В работе [7] показано, что, контролируя геометрию ванны расплава, можно непосредственно устанавливать взаимосвязь задаваемых параметров и микроструктуры. Таким образом, можно сформулировать аналитические уравнения, которые могут быть использованы при оптимизации процесса аддитивного выращивания. Введение в эти уравнения безразмерных чисел с помощью Пи-теоремы позволяет упростить физические модели и выявить зависимости между физическими величинами. Этот метод успешно применялся в гидродинамике, биологии, биомеханике, ядерной физике и АП.

Введение комбинации переменных в аналитические уравнения позволяет, во-первых, уменьшить количество параметров, которые необходимо исследовать при использовании АП, во-вторых, более точно определять процессы, происходящие при использовании АП.

В уравнениях, описывающих процесс аддитивного выращивания, выделяются три типа безразмерных параметров:

- 1) описывающие геометрическую форму наплавочных треков;
- 2) описывающие микроструктуру материала;
- 3) описывающие взаимосвязь микроструктуры и механических свойств материала.

Для описания геометрической формы наплавочных треков используют два безразмерных параметра [7]:

- 1) число Пекле $Pe = Vw/\alpha$ (V – скорость сканирования; w – ширина ванны расплава; α – температуропроводность сплава), представляющее собой соотношение параметров конвективного и кондуктивного переноса тепла (т.е. определяет механизм переноса тепла внутри ванны расплава) и характеризует размер ванны расплава;

2) безразмерная энтальпия $(B = \Delta H/h_s = 2^{3/4} \pi \frac{T_s}{T_m} = 2^{3/4} \sigma P / (\rho C T_m \sqrt{\alpha V D^3}))$ (T_s – температура поверхности; T_m – температура плавления; σ – коэффициент интегрального поглощения; P – мощность падающего излучения; ρ – плотность; C – удельная теплоемкость; D – диаметр лазерного пятна) – соотношение удельной энергии, поглощаемой материалом, и энергии, необходимой для плавления.

Для описания микроструктуры материала используют [7]:

1) число Марангони $Ma = -\frac{d\gamma}{dT} \frac{w\Delta T}{\mu\alpha}$ (μ – вязкость сплава; ΔT – разность максимальной и начальной температур сплава; $d\gamma/dT$ – тангенс угла наклона кривой зависимости поверхностного натяжения от температуры), представляющее собой отношение сил поверхностного натяжения к силам вязкости (эффективность распределения тепла внутри ванны расплава);

2) число Фурье $F = \frac{\alpha}{VL}$ (L – характерная длина) – отношение скорости диффузионного переноса тепла к скорости накопления тепла (чем больше число Фурье, тем больше скорость рассеивания тепла и, следовательно, тем быстрее происходит охлаждение);

3) соотношения градиента температуры G и скорости затвердевания R . Отношение G/R определяет режим затвердевания, в то время как произведение GR управляет масштабом микроструктуры затвердевания.

Для описания взаимосвязи микроструктуры и механических свойств материала используют:

1) эффективные коэффициенты, интегрально учитывающие микроструктуру системы и механическими свойствами (физические свойства, характерные размеры фаз);

2) склонность к растрескиванию при затвердевании $dT/d(fs)^{1/2}$, где fs – доля твердого вещества.

На рис. 4 представлена зависимость безразмерной глубины (d/D) единичного трека от безразмерной энтальпии (см. рис. 4, а) и числа Пекле (см. рис. 4, б) для LSC и DMD метода выращивания. Теплофизические свойства нержавеющей стали взяты при комнатной температуре и составляют: поглощение нержавеющей стали $A = 0,37$; плотность $\rho = 7,9 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³; удельная теплоемкость $C = 500$ Вт/(с·кг·К); температура плавления $T = 1713$ К; температуропроводность $\lambda = 4,05$ мм²/с.

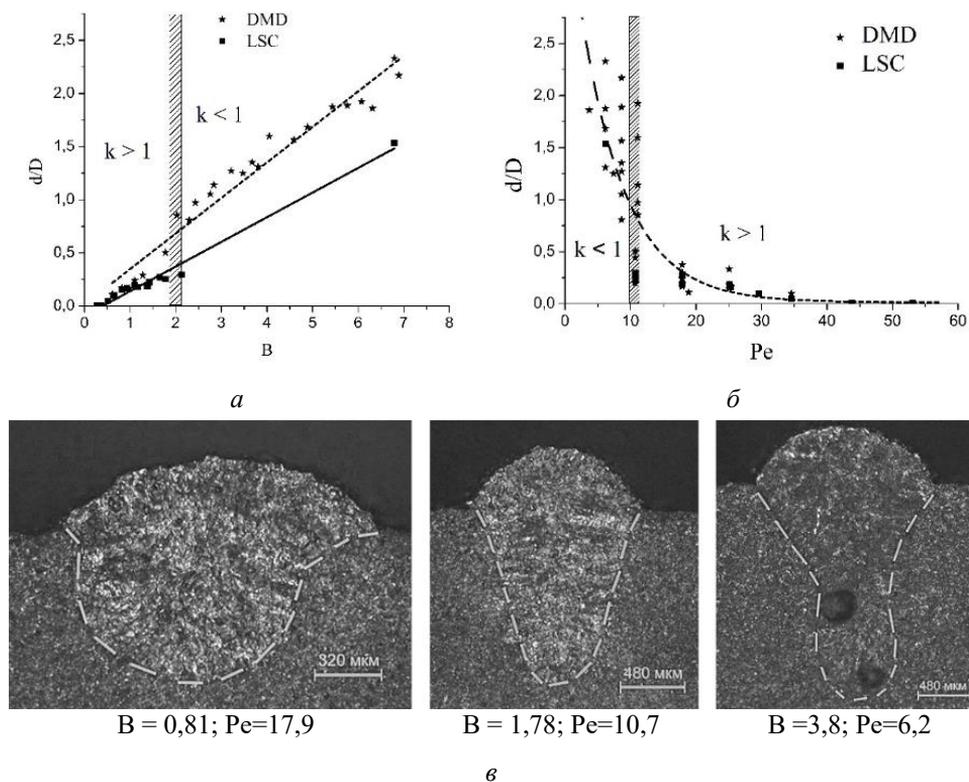


Рис. 4. Зависимости безразмерной глубины (d/D) единичного трека от безразмерной энтальпии (а) и числа Пекле (б) для LSC и DMD метода выращивания

Видно, что в параметре безразмерной глубины (см. рис. 4, а) единичного трека наблюдаются различия в наклоне аппроксимированной функции для технологии LSC и DMD. Так как объем материала в единицу времени для двух технологий был выбран одинаковым, то можно предположить, что наблюдаемого отличия не должно быть. В этом случае отличие возможно только в разном коэффициенте поглощения. В результате на основе экспериментальных данных получено, что коэффициент поглощения для LSC-технологии в 1,3 раза меньше по сравнению с DMD-технологией. В свою очередь, параметр безразмерной глубины не зависит от технологии выращивания и имеет экспоненциальный вид в зависимости от числа Пекле (см. рис. 4, б).

Введем коэффициент формы единичного трека $k = \frac{b}{d} = \frac{\text{ширина}}{\text{глубина}}$, описывающий переход от режима кинжального проплавления к режиму

теплопроводности ($k > 1$ – теплопроводность, $k < 1$ – кинжальное проплавление).

Из рис. 4 видно, что переход от режима кинжального проплавления к режиму теплопроводности происходит при значениях безразмерной энтальпии и числа Пекле, приблизительно равных 2 и 10 соответственно. Особенно ярко переход наблюдается для числа Пекле (см. рис. 4, б). При значении $Pe < 10$ происходит резкое увеличение безразмерной глубины единичного трека, что свидетельствует об образовании кинжального проплавления (см. рис. 4, в). Другими словами, для случая, когда относительная скорость продвижения источника превышает на порядок температуропроводность материала $Vw > 10\lambda$, не хватает плотности энергии в единицу времени для того, чтобы сформировать парогазовый канал (кинжальное проплавление), и, соответственно, формируется режим теплопроводности.

При лазерной наплавке металлокерамической порошковой смеси при расчетах необходимо использовать усредненные значения теплофизических констант. Усреднение плотности и теплоемкости производится по правилу смеси:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{комп}} &= \rho_{\text{арм}} v_{\text{об}} + \rho_{\text{св}} (1 - v_{\text{об}}), \\ c_{\text{комп}} &= c_{\text{арм}} v_{\text{об}} + c_{\text{св}} (1 - v_{\text{об}}), \end{aligned}$$

где $\rho_{\text{комп}}$ – плотность композита, $\rho_{\text{арм}}$ – плотность армирующей фазы (керамика), $v_{\text{об}}$ – объемная доля армирующей фазы (керамики), $\rho_{\text{св}}$ – плотность связующей фазы (металл), $c_{\text{комп}}$ – теплоемкость композита, $c_{\text{арм}}$ – теплоемкость армирующей фазы, $c_{\text{св}}$ – теплоемкость связующей фазы.

Усреднение теплопроводности нельзя проводить по правилу смеси. Вместо этого рассмотрим следующую модель [8]:

$$\lambda_{\text{комп}} = \lambda_{\text{св}} \left(1 + v_{\text{об}} \frac{1 - \frac{\lambda_{\text{св}}}{\lambda_{\text{арм}}}}{1 - v_{\text{об}}^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{\lambda_{\text{св}}}{\lambda_{\text{арм}}} \right)} \right), \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{комп}}$ – теплопроводность композита, $\lambda_{\text{св}}$ – теплопроводность связующей фазы, $\lambda_{\text{арм}}$ – теплопроводность армирующей фазы.

В результате вычислений по полученным формулам для лазерной наплавки металлокерамической порошковой смеси ВТ-6+SiC построены графики зависимости безразмерных геометрических параметров треков (нормированных на диаметр лазерного пучка) от безразмерной энтальпии (рис. 5) и числа Пекле (рис. 6). На графиках представлены данные для различных концентраций керамики в порошковой смеси. Видно, что все экспериментальные точки описываются едиными зависимостями.

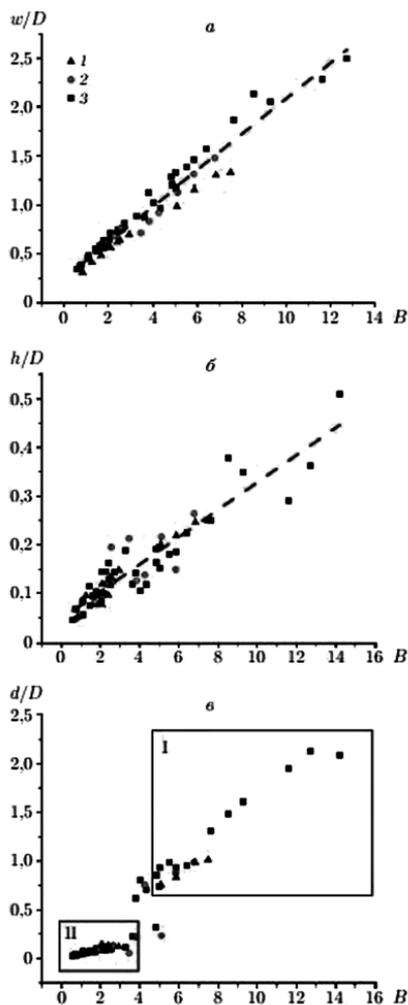


Рис. 5. Зависимости безразмерной ширины w/D (а), высоты h/D (б) и глубины d/D (в) наплавленных треков от безразмерной энтальпии (концентрация керамики: 1 – 0 мас.%, 2 – 10 мас.%, 3 – 20 мас.%)

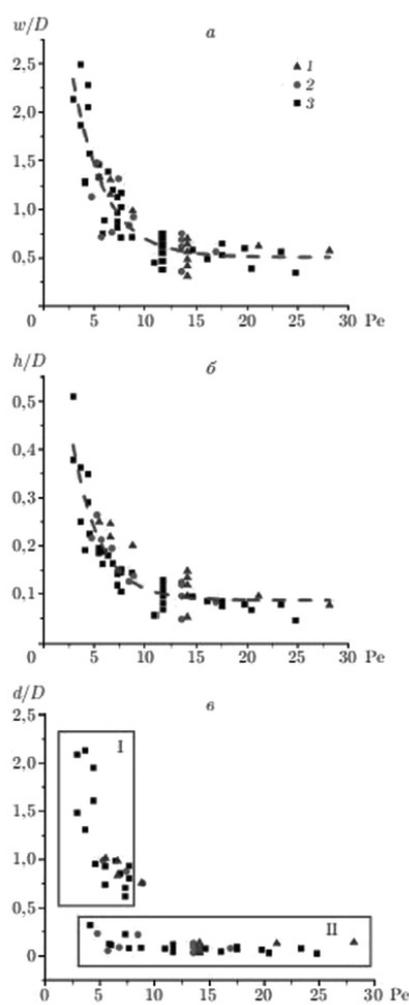


Рис. 6. Зависимости безразмерной ширины w/D (а), высоты h/D (б) и глубины d/D (в) наплавленных треков от числа Пекле (концентрация керамики: 1 – 0 мас.%, 2 – 10 мас.%, 3 – 20 мас.%)

Из рис. 5, в можно определить два характерных режима наплавки: режим теплопроводности ($B < 4,5$) и режим кинжального проплавления ($B > 4,5$). Так как параметр безразмерной энтальпии представляет собой комбинацию задаваемых параметров лазерной наплавки (мощность излучения, скорость сканирования и диаметр пучка), то, используя полученные закономерности, можно формировать наплавочный валик с необходимыми размерами и свойствами.

3. Создание и исследование многослойных металлокерамических материалов

На рис. 7 представлены изображения поперечных сечений ММК, полученные с помощью электронного микроскопа при разном увеличении [9]. Получено, что наплавленный материал имеет сложную развитую микроструктуру. Исходные керамические частицы окружены вторичными фазами, образованными в результате экзотермической реакции между карбидом бора и титаном (TiB , TiB_2 , TiC).

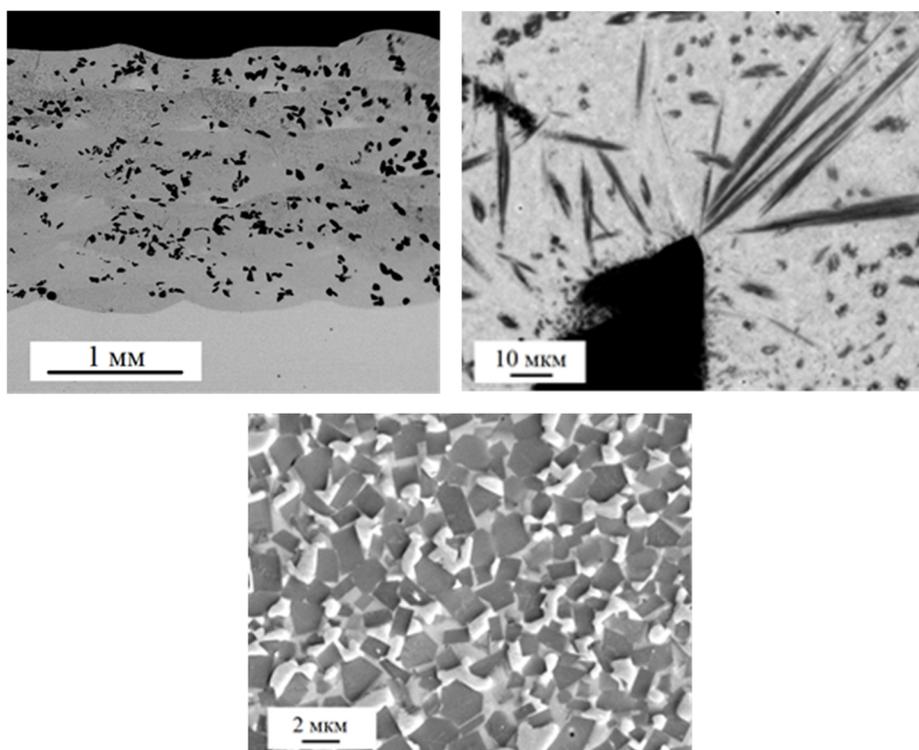


Рис. 7. Изображение с электронного микроскопа покрытия $V_4C - VT-6$ с соотношением 1:9 мас.%

На рис. 8 представлена микроструктура образца NiCrSiB + WC 4:6 мас.%, полученная с помощью электронного микроскопа [10]. Видно, что аналогично титаноматричным композитам происходит синтез *in-situ* и в результате химической реакции формируются вторичные фазовые соединения (CrB, (Cr,Fe)₇C₃ и Cr₂₃C₆).

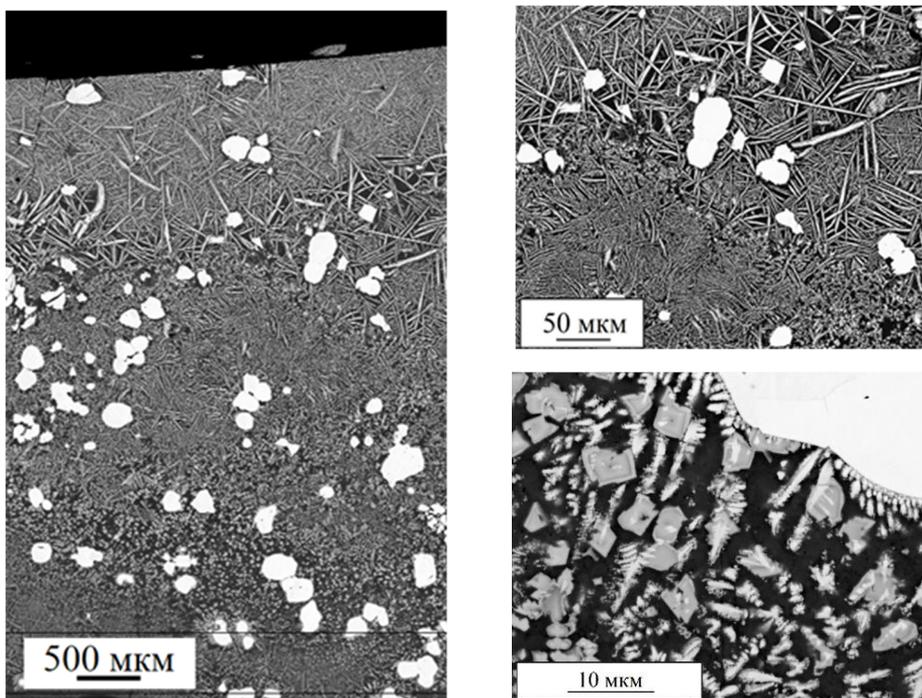


Рис. 8. Изображение с электронного микроскопа покрытия NiCrSiB – WC с соотношением 6:4 мас.%

На рис. 9 показано влияние концентрации керамики на микротвёрдость создаваемых металломатричных покрытий (BT-6-B₄C). Видно, что с увеличением концентрации керамики происходит рост микротвёрдости образцов. Измерение износостойкости показало, что покрытие BT-6 + 10 мас.% B₄C позволяет в 4,1 раза, а покрытие NiCrSiB + 40 мас.% WC в 2,5 раза уменьшить износ по сравнению с покрытием без керамики. Увеличение механических свойств металлокерамических покрытий объясняется тем, что в процессе лазерного воздействия в ванне расплава, кроме исходных керамических частиц, могут образовываться вторичные армирующие фазы типа TiB_w, CrB, TiC, (Cr,Fe)₇C₃, Cr₂₃C₆ и другие.

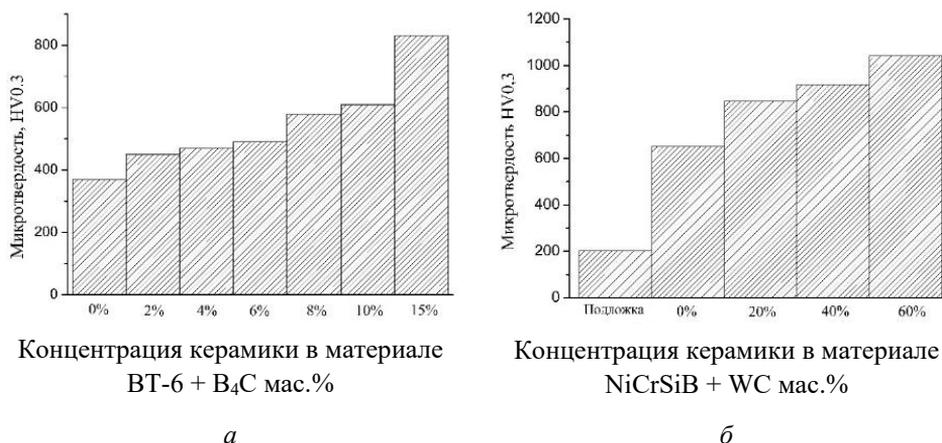


Рис. 9. Микротвёрдость образцов VT-6 + V₄C (а) и NiCrSiB + WC (б) при разной концентрации керамики

Проведено комплексное исследование по созданию и изучению функционально-градиентных материалов (ФГМ) с использованием в качестве матрицы титанового сплава VT-6, а в качестве армирующих частиц – различных типов керамики: TiB, TiB₂, B, V₄C, SiC, WC, TiN. Однако все рассматриваемые комбинации «матрица + керамика» изучались по отдельности. В результате интерес представляет обобщение всех полученных данных для выявления общих закономерностей. Кроме того, важно понимать, как зависят механические характеристики ФГМ не только от концентрации единой керамики, но и от различных типов армирующих элементов.

На рис. 10 приведены средние значения микротвёрдости образцов с разным типом керамики. Видно, что для всех образцов с армированием микротвёрдость возросла по сравнению с титановым сплавом VT-6. Наибольший рост показал образец с добавлением керамики карбида кремния. Особый интерес представляет покрытие, сформированное из сплава VT-6 в азотной среде. В данном случае достигается высокая микротвёрдость (приблизительно 800HV_{0.3}), однако для этого не требуется добавление керамических частиц.

На рис. 11 представлены дифрактограммы, полученные с помощью синхротронного излучения многослойного металлокерамического покрытия VT-6 + 10 мас.% V₄C в разных точках образца.

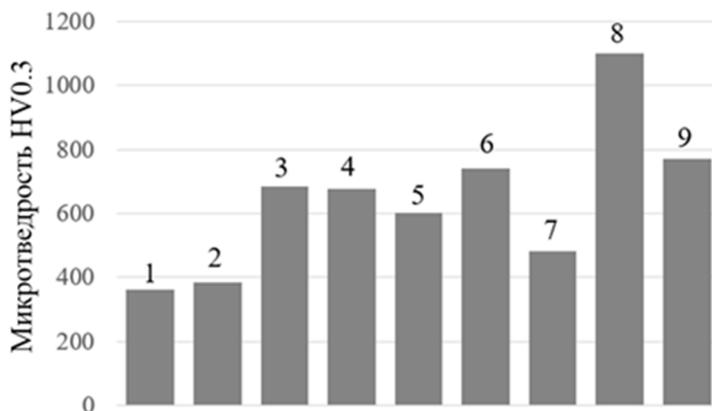


Рис. 10. Средние значения микротвердости образцов с разным типом керамики (1 – катаный лист ВТ-6; 2 – ВТ-6; 3 – ВТ-6+TiB; 4 – ВТ-6+TiB₂; 5 – ВТ-6+B; 6 – ВТ-6+B₄C; 7 – ВТ-6+WC; 8 – ВТ-6+SiC; 9 – ВТ-6+TiN)

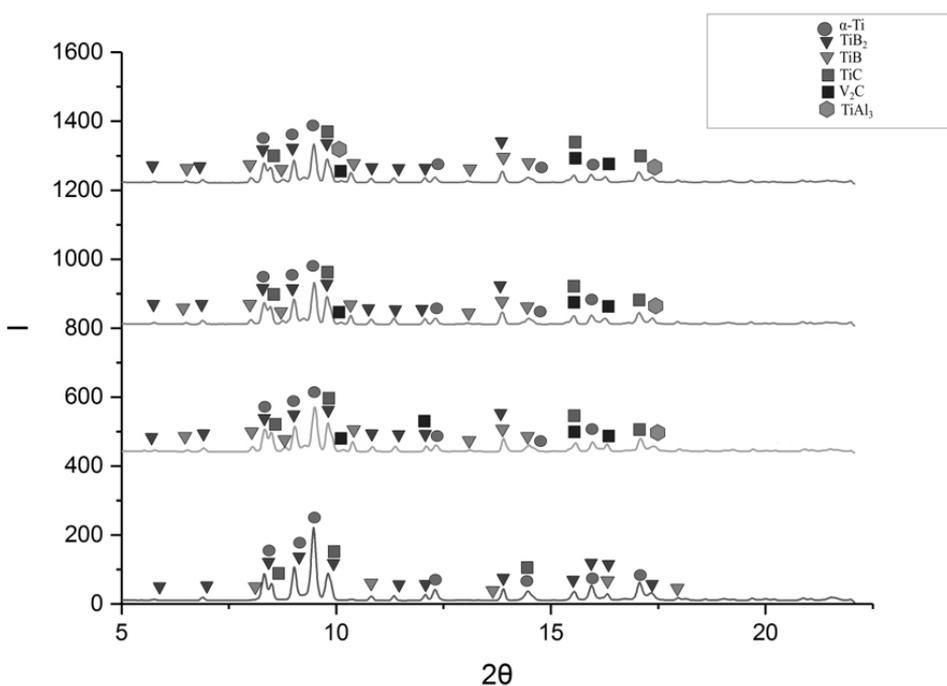


Рис. 11. Рентгенограмма, полученная с помощью синхротронного излучения многослойного металлокерамического покрытия ВТ-6 + 10 мас.% V₄C

Комплексное исследование фазового состава с помощью СИ показало, что добавление армирующих элементов в титановую матрицу приводит к экзотермической реакции с образованием вторичных фазовых соединений. Важно отметить, что такие вторичные фазы представляют собой карбиды, бориды и нитриды, что приводит к изменению физико-механических свойств формируемого функционально-градиентного материала.

Заключение

Разработанная технология прямого лазерного выращивания, которая позволяет наплавлять не только современные материалы, но и металлокерамические материалы с высокой концентрацией керамики (до 60 мас.%), которые не могут наплавить существующие конкурирующие аналоги. Отличие от имеющихся аналогов заключается в применении двух методов добавления армирующих компонентов.

Первый – *ex-situ*-метод, в котором введение керамических частиц или керамического волокна происходит непосредственно в металлическую матрицу. Вторым способ – это *in-situ*-метод, в котором армирующие частицы вследствие диффузии высвобождают реагенты в металлическую матрицу, которые в ходе кристаллизации вступают в химическую реакцию с металлической матрицей, образуя продукты реакции, другими словами, вторичные фазовые соединения.

Главным преимуществом технологии *in-situ*-синтеза по сравнению с *ex-situ* является меньшая разница между коэффициентами теплового расширения керамических частиц и матрицы, что приводит к снижению распространения трещин. Кроме того, процесс *in-situ* характеризуется образованием мелких частиц с равномерным распределением во всем объеме, которые являются более термодинамически стабильными, с хорошей межфазной совместимостью.

Введение термостойких и прочных керамик и керамических волокон позволяет ММК сохранять значительную долю несущей способности благодаря торможению и отклонению матричных микро-трещин на границе керамика либо волокно/матрица, что и обуславливает «псевдопластичный» характер разрушения композиционных материалов. Кроме того, применение керамического волокна/частиц приводит к увеличению прочности на разрыв, трещиностойкости, модуля упругости и т.д. Использование источника синхротронного

излучения впервые позволило получить уникальные данные об эволюции структурно-фазового состава композитных материалов, в том числе и в результате *in-situ*-синтеза (образование вторичных фаз).

В результате впервые показано влияние добавления керамики TiB, TiB₂, W₄C, WC, SiC, керамического волокна SiC и металлического бора на эволюцию структурно-фазового состава и механические характеристики функционально-градиентных материалов на основе титанового, никелевого сплава, полученных методом лазерного плавления [3, 4]. Впервые, управляя концентрацией керамики в исходной смеси, возможно целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойств: увеличение макро- и микротвёрдости, увеличение стойкости к абразивному износу, увеличение ударостойкости и износостойкости. Данные параметры в зависимости от типа керамики варьируются в два-три раза за счёт изменения структурно-фазового состава получаемого функционально-градиентного материала за счёт формирования различных типов вторичных фаз в результате *in-situ*-синтеза и неравновесности протекания процессов кристаллизации в результате лазерного воздействия.

Список литературы

1. Blakey-Milner, B. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. / P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks [et al.] // Mater. Des. Elsevier. – 2021. – Vol. 209. – P. 110008.
2. Применение волоконных лазеров для формирования покрытий из порошков переходных и редкоземельных металлов в постоянном магнитном поле / Ю.Н. Кульчин, Н.Г. Галкин, А.И. Никитин, Е.П. Субботин, А.А. Костянко, Д.С. Пивоваров // Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5, № 3. – С. 238–256.
3. A review of additive manufacturing of cermets / A. Aramian, S.M.J. Razavi, Z. Sadeghian, F. Berto // Addit. Manuf. Elsevier. – 2020. – Vol. 33. – P. 101130.
4. Fabbro, R. Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding / R. Fabbro // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 43, no. 44.
5. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges / W.E. King, A.T. Anderson, R.M. Ferencz, N.E. Hodge [et al.] // Appl. Phys. Rev. AIP Publishing LLC/AIP Publishing. – 2015. – Vol. 2, no. 4. – P. 041304.

6. Malikov, A. Investigation of the Resistance to High-Speed Impact Loads of a Heterogeneous Materials Reinforced with Silicon Carbide Fibers and Powder / A. Malikov, A. Golyshev // *Materials (Basel)*. – 2023. – Vol. 16, no. 2.

7. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee [et al.] // *Prog. Mater. Sci.* – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.

8. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М.: Мир, 1968. – 464 с.

9. Golyshev, A.A. Effect of laser impact parameters on the formation of a pool of the molten B₄C – Ti–6Al–4V cermet mixture / A.A. Golyshev, A.M. Orishich // *J. Appl. Mech. Tech. Phys. Pleiades journals*. – 2022. – Vol. 63, № 2. – P. 268–278.

10. Golyshev, A. Effect of repetitively pulsed laser radiation on the morphology, microstructure and mechanical properties of WC – NiCrBSi coatings obtained by laser surface cladding / A. Golyshev, N. Bulina, M. Gulov // *Lasers Manuf. Mater. Process. Springer*. – 2022. – Vol. 9, no. 4. – P. 590–609.

References

1. Blakey-Milner B. et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Mater. Des.*, 2021, vol. 209, p. 110008.

2. Kul'chin Y.N., Galkin N.G., Nikitin A.I., Subbotin E.P., Kostianko A.A., Pivovarov D.S. Primenenie volokonnykh lazerov dlia formirovaniia pokrytii iz poroshkov perekhodnykh i redkozemel'nykh metallov v postoiannom magnitnom pole [Application of the fiber lasers for formation of coverings from powders of transitional and rare-earth metals in constant magnetic field]. *Applied Photonics*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 238-256.

3. Aramian A., Razavi S.M.J., Sadeghian Z., Berto F. A review of additive manufacturing of cermets. *Addit. Manuf.*, 2020, vol. 33, p. 101130.

4. Fabbro R. Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 44.

5. King W.E., Anderson A.T., Ferencz R.M., Hodge N.E. et al. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Appl. Phys. Rev.*, 2015, vol. 2, no. 4, p. 041304.

6. Malikov A., Golyshev A. Investigation of the resistance to high-speed impact loads of a heterogeneous materials reinforced with silicon carbide fibers and powder. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2.

7. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T. et al. Additive manufacturing of metallic components - process, structure and properties. *Prog. Mater. Sci.*, 2018, vol. 92, pp. 112-224.

8. Misnar A. *Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций*. Moscow: Mir, 1968, 464 p.

9. Golyshev A.A., Orishich A.M. Effect of laser impact parameters on the formation of a pool of the molten B4C – Ti–6Al–4V cermet mixture. J. Appl. Mech. Tech. Phys., 2022, vol. 63, no. 2, pp. 268-278.

10. Golyshev A., Bulina N., Gulov M. Effect of repetitively pulsed laser radiation on the morphology, microstructure and mechanical properties of WC – NiCrBSi coatings obtained by laser surface cladding. Lasers Manuf. Mater. Process., 2022, vol. 9, no. 4, pp. 590-609.

Сведения об авторах

МАЛИКОВ А.Г.

e-mail: smalik707@yandex.ru

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории лазерные технологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

ГОЛЫШЕВ А.А.

e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории лазерные технологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

About the authors

A.G. MALIKOV

e-mail: smalik707@yandex.ru

DSc, Leading Researcher at the Laboratory of Laser Technologies, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

A.A. GOLYSHEV

e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

PhD, Senior Research at the Laboratory of Laser Technologies, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации: 124021500015-1). Эксперименты выполнены на базе ЦКП «Механика».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 02.09.2024

Одобрена: 06.09.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

Financing. The work was carried out within the framework of the state assignment of ITAM SB RAS (state registration number: 124021500015-1). The experiments were carried out at the Mechanics Collective Use Center.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 02/09/2024

Approved: 06/09/2024

Accepted for publication: 09/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Маликов, А.Г. Лазерное аддитивное выращивание металлокерамических материалов / А.Г. Маликов, А.А. Гольшев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 30–49.

Please cite this article in English as: Malikov A.G., Golyshev A.A. Laser Additive Manufacturing of Metal-Ceramic Materials. *Applied photonics*, 2024, no. 3, pp. 30-49.

УДК 535-15

В.С. Айрапетян, А.В. МакеевСибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Российская Федерация**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ AgGaS₂
В ДИАПАЗОНЕ 1,41-9,01 МКМ**

Приведены результаты расчетного и экспериментального исследований характеристик параметрического лазера с активным элементом из нелинейного кристалла AGS. Целью работы являлась разработка параметрического лазера с высокими генерационными характеристиками, такими как выходная энергия в импульсе, спектральная ширина и расходимость лазерного излучения. Разработанная оптическая схема кольцевого резонатора параметрического лазера при плавной перестройке длины волны от 1,41 до 9,01 мкм позволила получить энергию в импульсе до 11 мДж путем оптимизации отражательно-пропускательных характеристик зеркал резонатора, спектральную ширину излучения на полувысоте $4,6 \text{ см}^{-1}$, достигнутую путем ввода в резонатор эталона Фабри–Перо, и расходимость менее 1 мрад.

Ключевые слова: параметрический генератор света, кольцевой резонатор, тиогаллат серебра, эталон Фабри–Перо.

V.S. Airapetyan, A.V. MakeevSiberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation**STUDY OF GENERATION CHARACTERISTICS
OF PARAMETRIC LASER ON AgGaS₂ CRYSTAL
IN THE RANGE OF 1.41-9.01 μM**

The paper presents the results of the calculated and experimental studies of the characteristics of a parametric laser with an active element made of a nonlinear AGS crystal. The developed optical scheme of the ring resonator of the parametric laser with a smooth wavelength tuning from 1.41 to 9.01 μm made it possible to obtain an energy in a pulse of up to 11 mJ, a spectral width of radiation at half-height of 4.6 cm^{-1} and a divergence of less than 1 mrad.

Keywords: parametric light generator, ring resonator, silver thiogallate, Fabry-Perot etalon.

Введение

Перестраиваемые лазеры, позволяющие осуществлять перестройку длины волны в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах, становятся все более актуальным инструментом для применения в различных областях науки и техники. Существует несколько способов перестройки лазерного излучения в ИК-диапазон от 1,41 до 9,01 мкм: использование многочисленных линий генерации CO₂-лазера и их гармоник [1] и параметрическое преобразование света в ИК-диапазон. Неэффективность применения CO₂-лазера в задачах спектроскопии обусловлена нерезонансным совпадением частот его дискретных линий с собственными частотами колебаний исследуемых молекул. В случае параметрических генераторов света (ПГС) на халькогенидных кристаллах можно достичь резонансного совпадения частот излучения лазера собственных колебаний исследуемой молекулы. Поэтому ПГС является наиболее эффективным инструментом для резонансного взаимодействия частоты лазерного излучения с собственной частотой молекул исследуемого вещества, однако при разработке ПГС чаще всего особое внимание уделяется достижению максимально возможного диапазона перестройки [2–12], что, несомненно, важно, однако для дистанционного зондирования атмосферы не менее важными являются максимально узкая спектральная ширина излучения ПГС и высокая выходная энергия излучения, чтобы иметь возможность эффективно работать в узких спектральных окнах прозрачности атмосферы. В данной работе представлены расчетные и экспериментальные исследования генерационных характеристик ПГС на основе вновь синтезированных нелинейных кристаллов (НК), удовлетворяющих следующим требованиям:

- 1) высокая прозрачность в области от 1,41 до 9,01 мкм;
- 2) достаточная лучевая стойкость к импульсному лазерному излучению (не менее 350 МВт/см²);
- 3) теплопроводность не ниже 2 Вт/(м·К);
- 4) величина компонент тензора квадратичной нелинейной восприимчивости на уровне 10 пм/В;
- 5) возможность получения активного элемента требуемого геометрического размера (10×10×10 мм);
- 6) стабильность свойств материала во внешней среде.

В табл. 1 приведены нелинейно-оптические характеристики НК, позволяющих осуществлять перестройку частоты излучения лазера накачки в ближнем и среднем ИК-диапазонах.

Таблица 1

Сравнительные характеристики НК среднего ИК-диапазона

Кристалл	Химическая формула	Диапазон прозрачности (мкм)	Теплопроводность максимальная (Вт/(м·К))	Оптическая нелинейность (пм/В)	Порог механических повреждений (МВт/см ²)
Тиагаллат серебра	AGS	0,5–12	1,5	12,5	350
Тиагаллат ртути	HGS	0,5–13	2,85	31,5	136
Лангасит	LGS	0,33–11,6	19	5	240
–	LIS	0,3–12	21	9,35	1000
Тиагаллат бария	BGS	0,5–9,4	16	6	286
Селеногаллат серебра	AGSE	0,73–18	1,1	33	350
–	AgGaSe _x S ₂ (1+x)	0,9–17	1,3	26	340
Селеногаллат бария	BGSe	0,5–18	0,56	14,2	225,6
Селеногаллат бария германия	BaGaGeSe ₆	0,58–12	15,7	24,3	300
Селенид кадмия	CdSe	0,71–24	6,9	18	60
Селенид галлия	GaSe	0,62–20	16,2	63	30
Арсенид галлия	GaAs	0,7–19	2,1	4,7	17
Селенид цинка	ZnSe	0,62–19	5,7	26	0,002
Селенид лития-индия	LiInSe ₂	0,43–13	19	12	500
Селенид лития-галлия	LiGaSe ₂	0,37–13,2	21,3	9,9	350
Фосфид германия цинка	ZGP	0,74–12	36	75	60
Фосфид кадмия-кремния	CdSiP ₂	0,5–9	13,6	84	120
Фосфид-галлия	GaP	1,2–18	46	60	60
Арсенид индия	InAs	0,9–18	46	28	45
Фосфид индия	InP	1,3–18	46	18	57
Антимонид индия	InSb	1,2–18	46	10	54
–	Tl ₄ HgI ₆	0,8–60	5,4	1	12

Проведенный анализ нелинейно-оптических и механических характеристик НК показывает, что наиболее эффективные выходные параметры излучения ПГС могут быть достигнуты при использовании активного элемента из кристалла AGS. Исходя из вышеизложенного, целью работы является разработка ПГС, характеристики которого (максимально узкая спектральная ширина излучения и высокий

энергосъем) позволят с высокой эффективностью использовать его в качестве источника излучения для устройств лазерной спектроскопии и мониторинга земли.

Расчет амплитудных и пространственно-временных характеристик ПГС

Оптимальные значения генерационных характеристик ПГС можно получить при решении системы уравнений [:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial t} = -\delta_1 A_1 + \sigma A_2 A_3 \exp(-i\Delta Z); \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial t} = -\delta_2 A_2 + \sigma A_3 A_1 \exp(-i\Delta Z); \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \cdot \frac{\partial A_3}{\partial t} = -\delta_3 A_3 + \sigma A_1 A_2 \exp(-i\Delta Z); \end{cases}$$

где $A_j(z, t)$ ($j=1, 2, 3$) – амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки соответственно; A_j – сопряженная амплитуда сигнальной, холостой волн и волны накачки; v_j – групповые скорости волн; δ_j – коэффициент поглощения НК, который может быть определен как

$$\delta = \frac{S\omega_0^2 \Gamma}{4c(\omega_0 - \omega)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}; \Gamma = 1 \text{ см}^{-1}; l - \text{длина НК, равная 10 мм}; \sigma = \frac{W_j d_{\text{эф}}}{n_j c} -$$

нелинейный коэффициент НК; $d_{\text{эф}}$ – эффективный нелинейный коэффициент, который определяется геометрией взаимодействия волн в кристалле; n_j – показатель преломления НК; c – скорость света в вакууме; ω_j – частота сигнальной, холостой волн и волны накачки, удовлетворяющая условиям синхронизма:

$$\begin{cases} \omega_{\text{н}} = \omega_{\text{с}} + \omega_{\text{х}}, \\ k_{\text{н}} = k_{\text{с}} + k_{\text{х}} + \Delta, \end{cases}$$

где $k_{\text{н}}, k_{\text{с}}, k_{\text{х}}$ – волновые числа частоты накачки сигнальной и холостой волн и волны накачки соответственно.

Поскольку пучок имеет гауссовскую форму, его амплитуда описывается как:

$$A_3(r, 0, t) = A_{30} \exp \left[-2 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_H} \right)^2 - \left(\frac{r}{\rho_0} \right)^2 \right],$$

где A_{30} – амплитуда излучения лазера накачки в центре луча и в максимуме импульса, $A_{30} = \frac{1}{\sigma} \left[2\delta + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \right]$; τ_H – длительность импульса накачки по уровню половины максимума интенсивности; ρ_0 – радиус перетяжки пучка накачки в НК; R_1, R_2 и R_3 – коэффициенты отражения зеркал резонатора; r – радиус-вектор обхода луча в кольцевом резонаторе; t – время обхода луча в кольцевом резонаторе с периметром L , определяется как $t = \frac{nl + (L-l)}{c}$.

Результаты экспериментальных измерений амплитудно-временных и спектральных характеристик ПГС

Теоретические [1] и экспериментальные исследования [2–3] показывают, что высокий энергосъем в сочетании с оптимальными спектральными и пространственными характеристиками излучения ПГС можно получить при внрезонаторном параметрическом преобразовании излучения импульсного YAG:Nd³⁺ лазера накачки. Оптическая схема резонатора приведена на рис. 1.

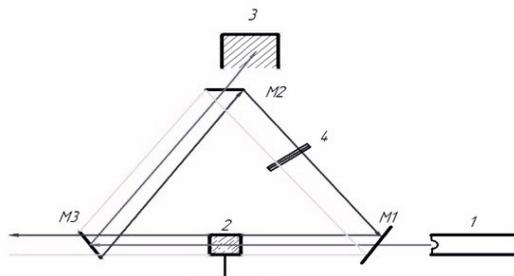


Рис. 1. Оптическая схема ПГС

Излучение лазера накачки I на кристалле YAG:Nd³⁺ с длиной волны $\lambda_p=1,064$ мкм и длительностью импульса 10 нс попадает в кольцевой резонатор через входное зеркало $M1$ и проходит через

нелинейный кристалл AGS 2, установленный для реализации угловой перестройки длины волны излучения на вращающейся платформе, приводимой в движение шаговым двигателем с точностью 11 arcsec. Ориентация кристалла $\theta=69^\circ$, $\varphi=45^\circ$. Перестроечная кривая представлена на рис. 2.

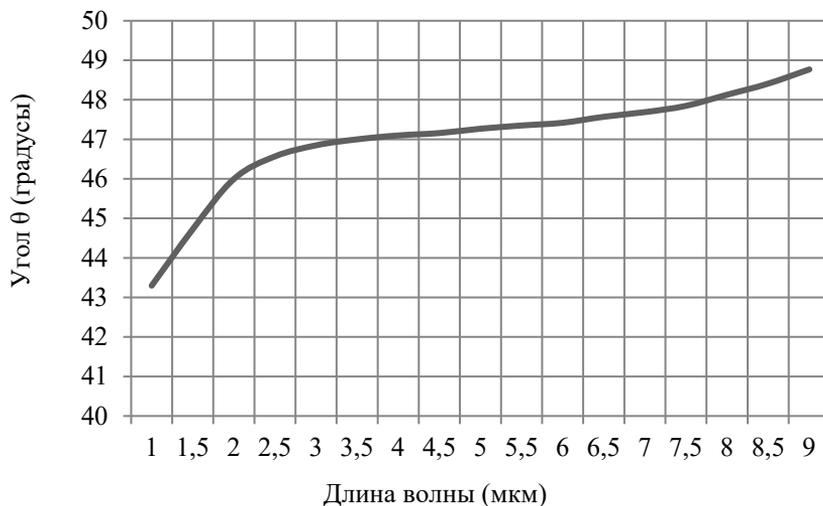


Рис. 2. Зависимость перестройки длины волны от угла поворота НК

При прохождении луча лазера накачки в нелинейном кристалле происходит переизлучение световых волн с сигнальной и холостой частотой. Далее волны отражаются от зеркала $M3$, выполненного в виде револьверного механизма, со сменным набором зеркал, для повышения выходной энергии излучения за счет оптимального пропускания на данной длине волны и попадают на зеркало $M2$, которое запирает сигнальную и холостую волну внутри резонатора и пропускает мощное излучение накачки в поглотитель 3. Такое решение вызвано необходимостью защитить диспергирующий элемент 4, выполненный в виде эталона Фабри–Перо (ЭФП), также установленного на вращающейся платформе с шаговым двигателем. Синхронным вращением ЭФП и нелинейного кристалла достигается сужение спектральной ширины выходного излучения ПГС до уровня 1 см^{-1} . Такая спектральная ширина позволяет попадать в узкие окна прозрачности атмосферы.

В целях повышения эффективности действия диспергирующего элемента была определена оптимальная толщина ЭФП.

Для случая нормального падения луча максимум пропускания ЭФП описывается как $\gamma = \frac{k}{2\pi P}$, где k – порядок интерференции, n – показатель преломления материала эталона (для германия 4), P – толщина ЭФП. Оптимальное пропускание ЭФП описано как

$$A = \frac{(1 - R^2)}{1 + R^2 + 2R \cos 2\varphi},$$

коэффициент отражения R для используемого эталона составляет 0,16, φ – фазовая толщина слоя. Коэффициент пропускания ЭФП для падающей на него плоской монохроматической волны зависит от угла падения. Оптимальный угол поворота ЭФП в зависимости от длины волны излучения определен как $\alpha = \arccos\left(\frac{\lambda \cdot \varphi}{2\pi n d}\right)$. Ширина пучка в поперечной плоскости описывается как

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2},$$

где W_0 – радиус перетяжки пучка, z_0 – релеевская

длина. Величина смещения температурных максимумов ЭФП описана как $\Delta F = -\frac{\gamma}{n} \left(\frac{\partial N}{\partial T}\right) \Delta T$, где $\frac{\partial N}{\partial T} = 3,9 \cdot 10^{-4}$, ΔT – изменение температуры ЭФП. Спектральная ширина выходного излучения оценена как $\Delta \vartheta = \frac{u}{\lambda_0^2}$, где u интервал на полувысоте пика интенсивности, λ_0 – частота, на которой наблюдается пик интенсивности излучения.

Результаты расчета оптимальной толщины ЭФП представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлен сравнительный спектр выходного излучения ПГС без использования ЭФП и с использованием ЭФП толщиной 615 мкм.

Оптимизация параметров ПГС производилась с помощью разработанного алгоритма в среде MATLAB. Результаты расчетов во всем спектральном диапазоне представляются в виде массива данных с накоплением и последующей визуализацией. Расчетная зависимость энергии излучения ПГС от длины волны перестройки приведена на рис. 4.

Таблица 2

Зависимость спектральной ширины выходного излучения от толщины ЭФП

Толщина ЭФП (мкм)	Спектральная ширина излучения $\Delta\theta$ (см ⁻¹)
450	17,2
500	16,8
550	16,5
600	15,4
610	6,8
615	4,7
620	6,8
630	6,87
640	6,17
650	6,8

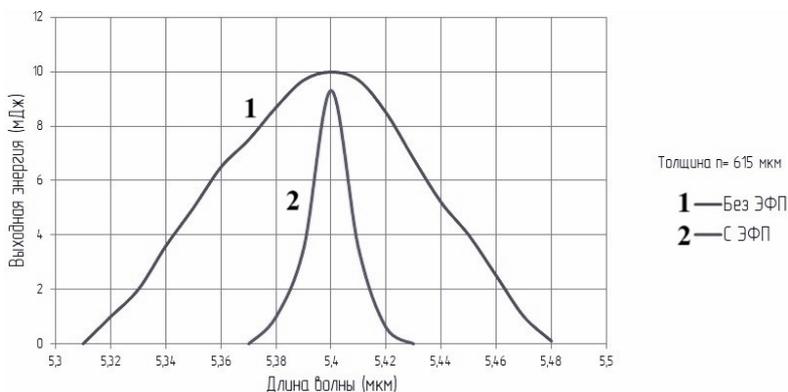


Рис. 3. Спектр выходного излучения ПГС при вводе в резонатор ЭФП

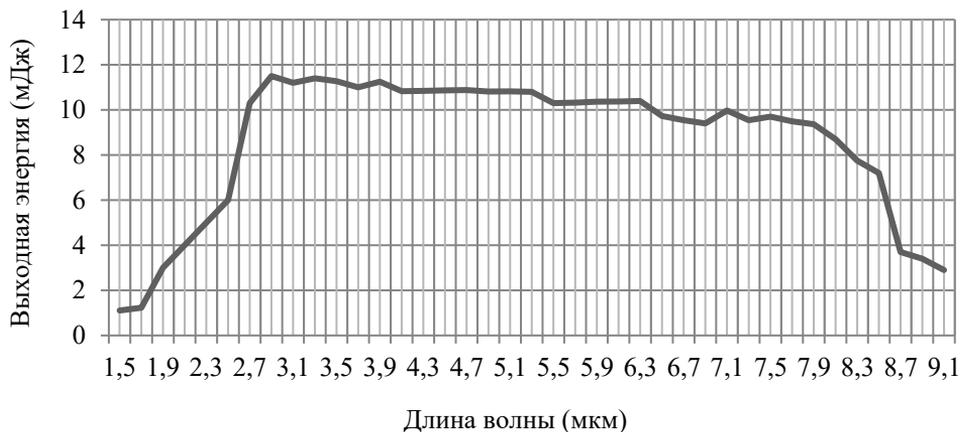


Рис. 4. Распределение выходной энергии ПГС в зависимости от длины волны

Из графика видно, что происходит спад выходной энергии ПГС, начиная со спектрального диапазона 8,5 мкм. Это обусловлено падением пропускания кристалла AGS в данной области (рис. 5), а также неоптимальностью отражательно-пропускательных коэффициентов зеркала МЗ.

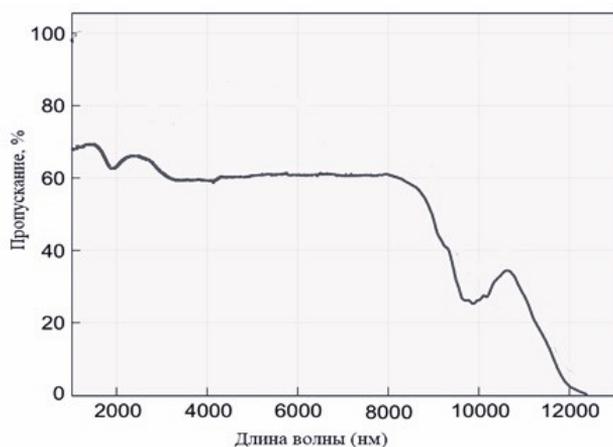


Рис. 5. Спектр пропускания кристалла AGS

Выводы

Таким образом, результаты расчетных и экспериментальных исследований позволили разработать оптическую схему кольцевого резонатора ПГС с активным элементом из кристалла AGS. Полученные энергетические (до 11 мДж в импульсе), спектральные (менее 5 см^{-1} ширина излучения), пространственные (расходимость излучения менее 1 мрад) данные излучения ПГС с плавной перестройкой (шаг перестройки от импульса к импульсу менее 1 нм) в ближнем и среднем ИК-диапазонах (1,41–9,01 мкм) позволяют его применение для широкого круга задач науки и техники, таких как лидарный мониторинг, при определении амплитудно-временных, спектроскопических и физико-химических параметров сложных органических молекул.

Список литературы

1. Ананьев, Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения / Ю.А. Ананьев. – М.: Мир, 1982. – 355 с.
2. Айрапетян, В.С. ИК параметрический лазер с высокой эффективностью излучения во всем диапазоне перестройки частоты / В.С. Айрапетян, Т.А. Широкова, П.Г. Пасько // Вестник НГУ. Сер. Физика. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 6–10.

3. Айрапетян, В.С. Параметрический генератор света на кристалле HGS с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм / В.С. Айрапетян, А.В. Макеев // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 01. – С. 57–60. DOI: 10.15372/AOO20210107

4. Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5-9 mkm frequency reset / V. Nayrapetyan, A. Makeev [et al.] // Proc. SPIE. 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.

5. Baumgartner, R.A. High energy near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators / R.A. Baumgartner, L.R. Byer // IEEE J. Quant. Electron. – 1979. – Vol. 15. – P. 432–444.

6. Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М.: Радио и связь, 1982.

7. Carrion, L. Development of a simple model for optical parametric generation / L. Carrion, J.-P. Girardeau-Montaut // J. Opt. Soc. Am. B. – 2000. – Vol. 17, no. 1.

8. Ахманов, С.А. Об одной возможности усиления световых волн / С.А. Ахманов, Р.В. Хохлов // ЖЭТФ. – 1962. – Т. 43, № 1. – С. 351–353.

9. Theoretical and numerical investigations of parametric transfer via difference frequency generation for indirect mid-infrared pulse shaping / J. Rawiharjo, H.S.S. Hung, D.C. Hanns, D.P. Shepherd // Journal of The Optical Society of America B-optical Physics – J OPT SOC AM B-OPT PHYSICS. – 2007. – Vol. 24, no. 4.

10. Исследование динамики внутррезонаторной параметрической генерации на длине волны 1,54 мкм / А.Г. Калинин, В.В. Назаров, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов // Оптический журнал. – 2002. – № 3, Т. 69. – С. 54–58.

11. Непрерывный иттербиевый одномодовый лазер с мощностью излучения 1500 Вт / А.А. Колегов, А.А. Абакшин, А.В. Горбачев, Д.А. Фролов // Прикладная фотоника. – 2021. – Т. 8, № 3. – С. 30–38.

12. Люминесцентные дефектные центры в кристаллах ниобата лития, легированных магнием / М.В. Смирнов, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников, В.Б. Пикулев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 68–80.

References

1. Anan'ev Y.A. Opticheskie rezonatory i problema raskhodimosti lazernogo izlucheniia. Moscow: Mir, 1982, 355 p.

2. Ayrapetyan V.S., Shirokova T.A., Pasko P.G. IK parametricheskii lazer s vysokoi effektivnost'iu izlucheniia vo vsem diapazone perestroiki chastoty [The parametric IR lasers with high radiation efficiency over the entire range of frequency tuning]. Siberian Journal of Physics, 2013, vol. 10, no. 4, pp. 6-10.

3. Ayrapetyan V.S., Makeev A.V. Parametricheskii generator sveta na kristalle HGS s plavnoi perestroikoi dliny volny v diapazone 4,75–9,07 mkm [An

HGS optical parametric oscillator tunable in the 4.75-9.07 μm wavelength range]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2021, vol. 34, no. 3, pp. 263-266.

4. Hayrapetyan V., Makeev A. et al. Optical parametric oscillator on hgs crystal with 5-9 mkm frequency reset. 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proc. SPIE, 2019, vol. 11208.

5. Baumgartner R.A., Byer L.R. High energy near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators. IEEE J. Quant. Electron., 1979, vol. 15, pp. 432-444.

6. Dmitriev V.G., Tarasov L.V. Prikladnaia nelineinaia optika: Generatory vtoroi garmoniki i parametri-cheskie generatory sveta. Moscow: Radio i sviaz', 1982.

7. Carrion L., Girardeau-Montaut J.-P. Development of a simple model for optical parametric generation. J. Opt. Soc. Am. B, 2000, vol. 17, no. 1.

8. Akhmanov S.A., Khokhlov R.V. Ob odnoi vozmozhnosti usileniia svetovykh voln [On one possibility of amplifying light waves]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1962, vol. 43, no. 1, pp. 351-353.

9. Rawiharjo J., Hung H.S.S., Hanns D.C., Shepherd D.P. Theoretical and numerical investigations of parametric transfer via difference frequency generation for indirect mid-infrared pulse shaping. Journal of The Optical Society of America B: Optical Physics, 2007, vol. 24, no. 4.

10. Kalintsev A.G., Nazarov V.V., Khloponin L.V., Khramov V.Yu. Study of the dynamics of intracavity parametric lasing at 1.54 micrometers. J. Opt. Technol., 2002, no. 3, vol. 69, p. 179.

11. Kolegov A.A., Abakshin A.A., Gorbachev A.V., Frolov D.A. Nepreryvnyi ytterbievyy odnomodovyy lazer s moshchnost'iu izlucheniia 1500 Wt [1500 W ytterbium-doped single mode CW fiber laser]. Applied Photonics, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 30-38.

12. Smirnov M.V., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., Pikulev V.B. Liuminestsentnye defektnye tsentry v kristallakh niobata litiia, legirovannykh magniem [Luminescent defect centers in magnesium-doped lithium niobate crystals]. Applied Photonics, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 68-80.

Сведения об авторе

АЙРАПЕТЯН В.С.

e-mail: v.hayr10004@mail.ru

Доктор технических наук, доцент, ведущий кафедрой специальных устройств инноватики и метрологии Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск.

About the author

V.S. AIRAPETYAN

e-mail: v.hayr10004@mail.ru

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Special Devices of Innovation and Metrology, SSUGIT, Novosibirsk.

МАКЕЕВ А.В.

e-mail: *makeeffsan@yandex.ru*

A.V. MAKEEV

e-mail: *makeeffsan@yandex.ru*

Ассистент кафедры специальных устройств инноватики и метрологии Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск.

Assistant of the Department of Special Devices, Innovations and Metrology, SSUGIT, Novosibirsk.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке государственной НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Вклад автора 100 %.

Получена: 16.09.2024

Одобрена: 23.09.2024

Принята к публикации: 25.09.2024

Financing. The study was carried out with the support of the state budget research project “Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures using low-budget high-precision vertical displacement sensors in the conditions of the Far North” (FEFS-2023-0003).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 16/09/2024

Approved: 23/09/2024

Accepted for publication: 25/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Айрапетян, В.С. Исследование генерационных характеристик параметрического лазера на кристалле AgGaS₂ в диапазоне 1,41–9,01 мкм / В.С. Айрапетян, А.В. Макеев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 50–61.

Please cite this article in English as: Airapetyan V.S., Makeev A.V. Study of generation characteristics of parametric laser on AgGaS₂ crystal in the range of 1.41-9.01 μm. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 50-61.

УДК 681.7.068

А.В. Немыкин, Д.А. ШапироИнститут автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия**ФАЗОВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПИКОВОЙ АМПЛИТУДЫ
СУММЫ ГАРМОНИК**

Представлен наиболее эффективный на данный момент алгоритм решения задачи минимакса применительно к конечной сумме комплексно-значных гармоник с одинаковыми амплитудами, эквидистантно отстоящими друг от друга частотами. Подход основан на переборе корней разложения амплитудной функции на множители для получения оптимальной фазовой функции и дальнейшей оптимизации алгоритмом Гершберга–Сакстона. Приведено сравнение результатов с наилучшими из описанных ранее. Отмечены главные особенности алгоритма, позволяющие за ограниченное число итераций достигать глобального минимума задачи оптимизации. Также в работе представлены графики решенных задач минимакса, оптимумы которых оказались лучше отмеченных ранее в литературе.

Ключевые слова: фазовая оптимизация, пиковая амплитуда, сумма гармоник, многочастотный фильтр, поиск минимакса.

A.V. Nemykin, D.A. ShapiroInstitute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**CREST FACTOR MINIMIZATION
OF THE MULTITONE COMPLEX SIGNAL**

In this paper we present the most effective algorithm for a crest factor minimization of multitone complex signals. The approach includes complex root selection of the amplitude function for the phase function rebuilding and then Gerchberg-Saxton algorithm application for a fine phase tuning. Phase optimization of a finite sum is fulfilled in case of the complex harmonics with equal amplitudes and equispaced frequencies. We compare our results with the earlier calculated best ones and remark its superiority. The main features of the approach are highlighted to underline the stability and performance capabilities for the global minimum achievement. Finally, we introduce some amplitude functions of multitone signals with lower crest factor than previously reported in the literature.

Keywords: crest factor minimization, phase tuning, peak amplitude, multitone signal, multitone filter, minimax problem.

Введение

Задачи оптимизации возникают повсеместно, что зачастую является следствием ограниченности ресурсов или физических параметров используемых узлов. В частности, одной из таких задач является минимизация пиковой амплитуды многочастотной функции [1], которая, например, возникает при создании широкополосных волоконных брэгговских решеток (ВБР) для перестраиваемых лазеров [2] или в линиях связи со спектральным уплотнением каналов для компенсации дисперсии [3], либо для быстрой проверки работоспособности интегральных схем на разных частотах, когда на вход устройства подается синтезированный широкополосный сигнал, не превышающий допустимое амплитудное значение [4]. Касательно ВБР суть проблемы в том, что в один и тот же участок волокна записываются профили нескольких решеток с близкими друг другу периодами, и может случиться так, что локально требуемое итоговое отклонение показателя преломления (ПП) превысит технические возможности записи. В таком случае запись профилей можно осуществить с небольшой разбежкой по координате в пределах одного периода, что на групповую задержку не повлияет, но уменьшит пиковое значение итогового профиля [5].

В данной работе приводится алгоритм дискретных преобразований, позволяющий за конечное время повторять, а в некоторых случаях и превосходить, уже известные значения задачи минимакса. На первом этапе оптимизации специальным нулевым приближением определяется функция амплитуды функционала S , и методом перебора из 2^{N-2} реализаций устанавливается знак мнимой части комплекснозначных корней из разложения рассматриваемого функционала на множители, при которых образующие функционал гармоник имеют максимально близкую к единице амплитуду. Затем во втором этапе оптимизации реализуется алгоритм Гершберга–Сакстона [6], при этом в координатном представлении срезаются максимумы модуля функционала S по плавно понижающемуся уровню, а в спектральном представлении обрезаются высокочастотные гармоники и принимаются за единицу амплитуды оставшихся с сохранением их фазы.

Постановка задачи

При записи нескольких ВБР внутри одного и того же объема оптического волокна возникает проблема с ограниченным значением вариации ПП сердцевины, обычно порядка 10^{-4} . Чтобы уложиться

в техническое ограничение, но при этом иметь возможность записи решеток с достаточно глубокой модуляцией ПП для сохранения их эффективности, нужно тщательно подбирать взаимные фазы записываемых профилей, чтобы суммарное отклонение ПП не выходило за пределы возможного к реализации с требуемой точностью. Ограничение амплитуды вариации ПП записываемой решетки через уравнения связанных мод и потенциал взаимодействия сводится к минимизации максимума модуля функционала:

$$S(x, \varphi_1, \dots, \varphi_N) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{inx + i\varphi_n} \quad (1)$$

на множестве нормированной координаты x посредством подбора вещественных параметров $\varphi_1, \dots, \varphi_N$. Здесь подразумевается, что требуемые к записи амплитуды ПП всех N записываемых профилей ВБР одинаковы, а их резонансные частоты эквидистантны.

Процедура оптимизации заключается в поиске абсолютного максимума модуля функционала (1) на всем интервале вещественной переменной x , после чего выполняется вариация фазовых значений φ_n с целью уменьшения этого абсолютного максимума. Стоит отметить, что общая фаза функционала, как и точка начала отсчета по переменной x , не влияет на значение максимума его модуля, следовательно, размерность вариационного пространства можно уменьшить на два непрерывных параметра. Для удобства в дальнейшем мы примем фазы крайних гармоник равными нулю $\varphi_1 = \varphi_N = 0$. Так как функционал 2π периодичен по всем переменным, то для поиска абсолютного максимума достаточно исследовать функцию на интервале $[0, 2\pi]$ по аргументу x :

$$R_{\text{Max}} = \min_{\vec{\varphi} \in R^N} \max_{x \in [0, 2\pi]} |S(x; \vec{\varphi})| \geq \sqrt{1 + 2/N}. \quad (2)$$

Полученное значение R_{Max} является искомым наряду с массивом значений φ_n . Также существует ограничивающее его снизу значение, стремящееся к единице с ростом числа N , которое проистекает из равенства единице амплитуд гармоник. Доказательство этого неравенства из-за некоторой громоздкости мы опустим.

Попытки решать данную задачу градиентными алгоритмами занимают крайне много времени из-за специфики топологии [7] и большого количества локальных минимумов.

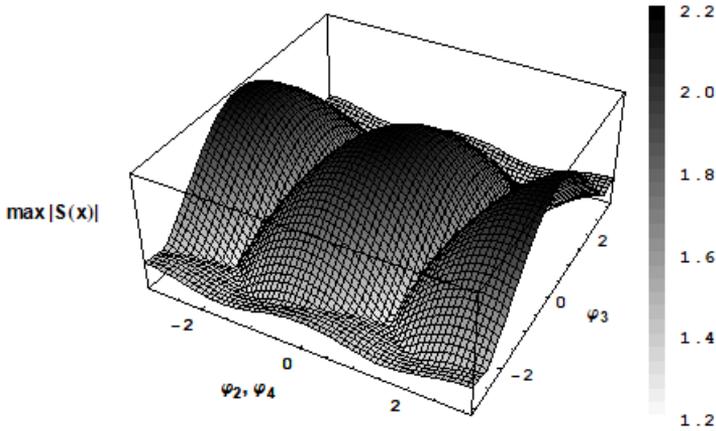


Рис. 1. Гиперповерхность, образованная максимумами модуля функционала при различных значениях фаз, для симметричного случая оптимизации суммы из пяти гармоник

В частности, на рис. 1 представлена гиперповерхность из максимумов модуля функционала S , образованная двумя варьируемыми параметрами (фазами), для симметричного по x случая оптимизации пяти гармоник, в котором фазы φ_2 и φ_4 совпадают. Изрезанность профиля глубокими и бесконечно узкими каньонами подразумевает старт градиентного алгоритма с каждого из гладких участков всего многообразия. Поэтому, чтобы повторить или превзойти даже с $N < 20$ известные в литературе результаты [5, 6], приходится вводить фактор случайности при выборе точки старта и выполнять сотни реализаций без гарантий на успех.

Начальное приближение

Первая идея – сделать перебор гладких многообразий гиперповерхности не вероятностным, а упорядоченным, для чего воспользуемся определенным представлением решения в виде разложенного на множители полинома по степеням e^{ix} :

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{inx+i\varphi_n} = \frac{e^{ix+i\varphi_N}}{\sqrt{N}} \prod_{k=1}^{N-1} (e^{ix} - e^{i\varphi_k}). \quad (3)$$

Такое представление существует всегда согласно основной теореме алгебры. Здесь за ψ_k обозначены комплекснозначные корни многочлена. Если какой-то ψ_n оказывается вещественным, то функционал S обращается в ноль при значении аргумента $x = \text{Re} \psi_n$. Вариации значений ψ_k в ходе оптимизации должны непременно приводить к уменьшению мнимой части φ_n . Возведение суммы (3) по модулю в квадрат удваивает количество комплекснозначных корней, при этом для каждого отдельного корня ψ_k возникает комплиментарный ему ψ_k^* , полученный сопряжением:

$$|S(x; \bar{\varphi})|^2 = \frac{1}{N} \prod_{k=1}^{N-1} |e^{ix} - e^{i\psi_k}|^2 = \frac{4^{N-1}}{N} \prod_{k=1}^{N-1} e^{\frac{i(\psi_k - \psi_k^*)}{2}} \left| \sin \frac{x - \psi_k}{2} \right|^2. \quad (4)$$

Итоговый полином обладает симметрией ряда по степеням, попадающим в диапазон от $-N + 1$ до $N - 1$, при этом положительно определен на множестве вещественных значений аргумента x , а количество его корней четно и соответствует числу $2N - 2$. Здесь мы специально представили результат произведением через квадрат модуля тригонометрической функции, который остается инвариантным при замене $\psi_k \leftrightarrow \psi_k^*$. Если мы хотим уменьшить максимальное значение функционала, то нам необходимо потребовать стремление к нулю хотя бы одного из множителей на каждом участке периода аргумента x . В таком случае в качестве корней полинома выберем ψ_k с эквидистантно расположенной вещественной частью, чтобы все множители были эквивалентными между собой, при этом мнимая часть должна быть минимальной по модулю, но в то же время сохранять нормировку функционала S . Можно привести иные рассуждения, чтобы мнимая часть была максимальна по модулю, тогда тригонометрические множители будут квазипостоянными, что увеличит фактор заполнения функционала и приведет к набору интеграла нормировки при меньших максимумах амплитуды.

Обе вариации рассуждений приведут к одному итогу: при взятии эквидистантных вещественных частей и выборе постоянной по модулю мнимой части ψ_k для одной половины корней, но меняющей знак на противоположный для оставшейся половины, удастся добиться наиболее оптимального (в случае нечетного числа каналов) амплитудного профиля для данного представления с выполнением соответствующего свойства:

$$\Psi_k = \frac{2\pi k}{N-1} + i\alpha \operatorname{sign}\left(k - \frac{N}{2}\right) \Rightarrow \prod_{k=1}^{N-1} e^{i \frac{\Psi_k - \Psi_k^*}{2}} = 1. \quad (5)$$

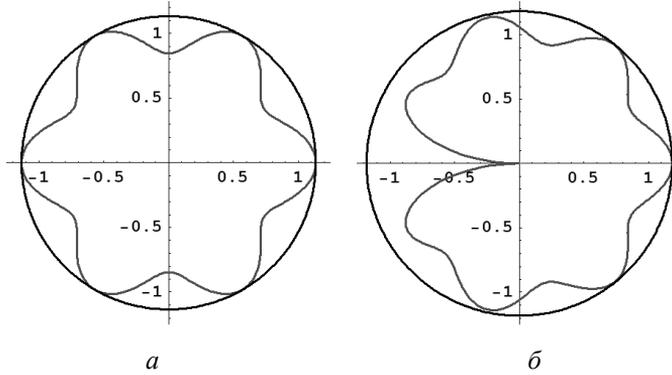


Рис. 2. Амплитуда начального приближения функционала S и ограничивающая ее окружность в полярных координатах от x для 7 каналов (a) и 8 каналов (b)

Доказательство данного утверждения мы опустим. Отметим только, что если количество корней нечетно, то один из них будет иметь нулевую мнимую часть. Коэффициент α находится из нормировки функционала S :

$$\alpha : \frac{4^{N-1}}{N} \prod_{k=1}^{N-1} \int_0^{2\pi} \left| \sin \frac{x - \Psi_k}{2} \right|^2 \frac{dx}{2\pi} = 1. \quad (6)$$

На рис. 2 в качестве примера представлены профили начального приближения амплитуд функционала, построенные вышеупомянутым образом, для некоторого числа каналов оптимизации. Для нечетного числа каналов амплитуда максимумов получается строго равной теоретическому пределу $\sqrt{1 + 2/N}$, для четного же числа за счет обращения в ноль мнимой части одного из корней она получается чуть больше. В частности, для восьми каналов, указанных на рисунке, максимум выше на 5,7 % относительно теоретического предела.

Алгоритм дискретных преобразований

В предыдущем подразделе в качестве начального мы получили амплитудный профиль функционала S , построенный на представлении разложенного на множители полинома с выполнением условия нормировки на среднеквадратичную постоянную составляющую. Стоит

отметить, что хотя амплитудный профиль и оптимален применительно к представлению, он не может быть получен путем взятия модуля от сложения гармоник с равными между собой амплитудами. Тем не менее мы можем приблизить его к такому, для чего будем выполнять определенные преобразования, которые не влияют на амплитудную часть функции, но влияют на фазу функционала S , вследствие чего Фурье-преобразование получаемой функции будет приводить к более равномерному амплитудному спектру интересующих нас гармоник. Такими преобразованиями являются парные перестановки мнимых частей с различными знаками у коэффициентов ψ_k :

$$\begin{cases} \psi_m \rightarrow \psi_m^*, \\ \psi_n \rightarrow \psi_n^*, \end{cases} \text{ где } m < \frac{N}{2} < n. \quad (7)$$

Иначе говоря, мы решаем, какой из множителей квадрата модуля функционала отнести к самому функционалу, а какой – к его сопряженному двойнику. В частности, при оптимизации задачи с $N = 7$ транспозиция $(010 | 100)$ означает $\psi_2 \rightarrow \psi_2^*$ и $\psi_4 \rightarrow \psi_4^*$, как обозначено на рис. 3.

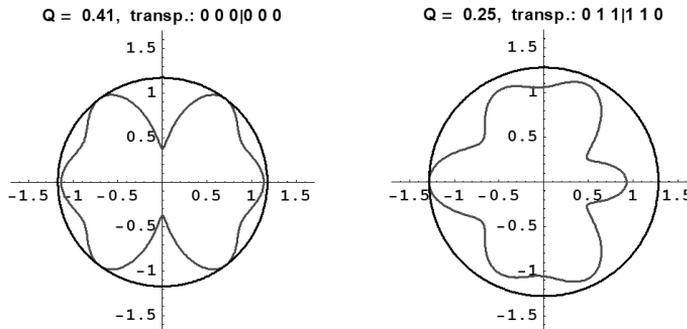


Рис. 3. Эволюция профиля амплитуды функционала S для 7 каналов при реализации серии сопряжений параметра ψ_k

Вертикальная черта в средней позиции для четного числа каналов обозначает осевую симметрию начального распределения. В формуле (5) в этой точке меняется значение функции sign . В случае нечетного числа каналов в центре транспозиции ставятся две вертикальные черты. Таким образом, произведение от перестановки множителей не меняется, как и не меняется по этой причине амплитуда, но меняется фазовая функция функционала S .

Для понимания успешности той или иной перестановки применительно к исходной задаче введем дополнительный функционал Q , который, по сути, является стандартным отклонением от нуля мнимой части вариационных фаз. Мнимая часть фазы гармоники в представлении (3) отвечает за изменение амплитуды этой гармоники относительно единицы, поэтому требование устремления ее к нулю в процессе оптимизации необходимо и достаточно:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{Im} \varphi_n)^2}. \quad (8)$$

Итоговый алгоритм перебора знаков мнимых частей у параметров ψ_k , образующих корни функционала S , состоит в следующей последовательности. Вычисляем начальный параметр Q , для чего выполняем преобразование Фурье начального функционала S и пересчитываем полученные амплитуды коэффициентов в мнимую часть фаз гармоник. Теперь, когда есть начальное значение функционала Q , реализуем одну перестановку из всего множества. После чего повторяем расчет мнимых частей фаз гармоник и сравниваем новое значение Q с предыдущим. Если новое значение Q оказалось меньше, то полученные вещественные части фаз будем считать более оптимальными, как это и показано на рис. 4.

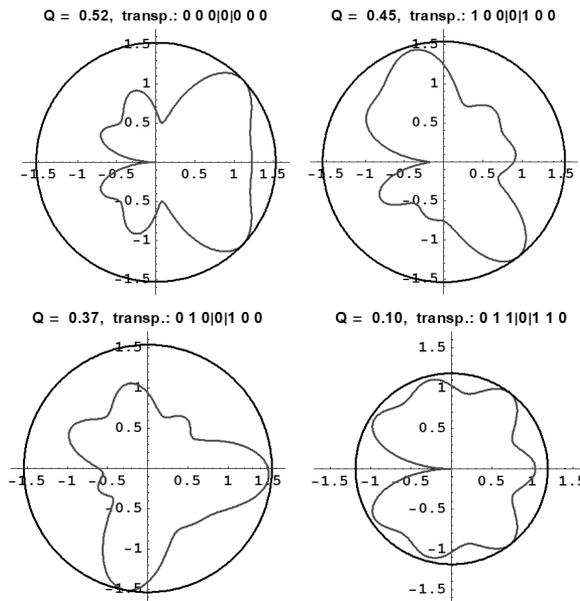


Рис. 4. Эволюция профиля амплитуды функционала S для 8 каналов при реализации серии сопряжений параметра ψ_k

Прделаем эту операцию до полного перебора всего множества перестановок. На рис. 3 и 4 приведены амплитуды функционала S , построенного на вещественных частях фаз, рассчитанных для каждой из перестановок с приведением значения функционала Q .

Алгоритм Гершберга–Сакстона

Как можно заметить, нет монотонной зависимости между абсолютным максимумом модуля функционала S и значением функционала Q , когда оно достаточно велико (см. рис. 3). По этой причине приходится подвергать дальнейшей оптимизации функционал S , отвечающий большим значениям Q , наравне с меньшим, если лучшее значение Q недостаточно мало. В данном случае таковым примером является решение задачи оптимизации для 7 гармоник (рис. 5, 6).

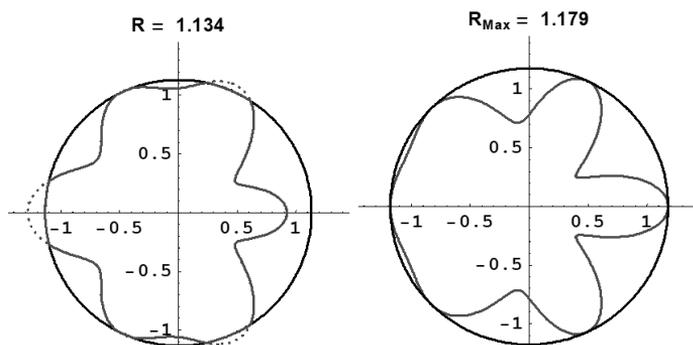


Рис. 5. Минимизация функционала S для 7 каналов алгоритмом Гершберга–Сакстона, полученного перестановкой (011|110)

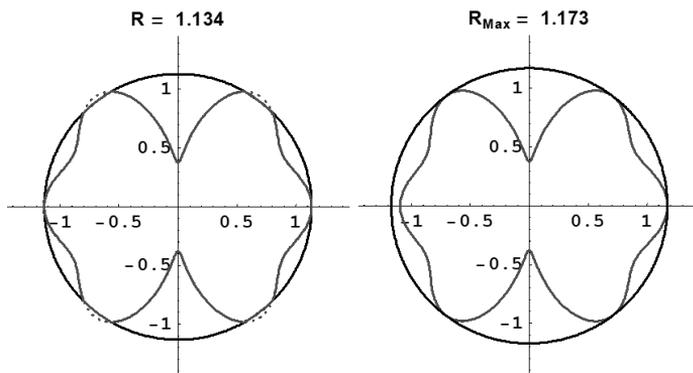


Рис. 6. Минимизация функционала S для 7 каналов алгоритмом Гершберга–Сакстона, полученного перестановкой (000|000)

Для окончательной минимизации максимума модуля функционала S пользуемся весьма известным в области голографии алгоритмом Гершберга–Сакстона [6], который не является градиентным и применяется для создания, например, исключительно амплитудных или фазовых масок. Применительно к нашей задаче мы стараемся уменьшить амплитуду функционала S , сохранив фазы φ_n вещественными. Для этого слегка подрезаем текущий максимум функционала с сохранением его фазы и делаем прямое преобразование Фурье. Так как подрезанная функция имеет более широкий спектр, как минимум, из-за нарушения гладкости, корректируем до единицы амплитуды удерживаемых гармоник и обращаем в ноль амплитуды остальных. После чего по полученным фазам строим новый функционал S , т.е. выполняем прямое преобразование Фурье, и продолжаем итерационный процесс до тех пор, пока функционал от шага к шагу не перестанет меняться. Критерии сужения радиуса обрезки максимума функционала S рассматривать здесь не будем, но отметим, что скорость сходимости итерационного процесса и качество конечного результата зависят от него весьма сильно. На рис. 5, 6 и 7 представлены одиночные реализации из промежуточных этапов оптимизации функционала S приведенным алгоритмом, а также конечный результат.

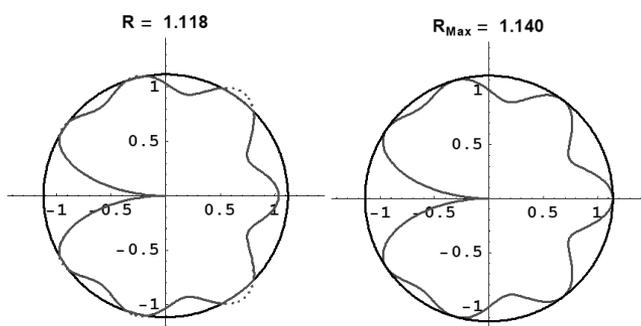


Рис. 7. Минимизация функционала S для 8 каналов алгоритмом Гершберга–Сакстона, полученного перестановкой (011|0|110)

В частности, предварительные два вариационных результата промежуточной оптимизации для 7 гармоник не могли быть подвергнуты сравнению до окончания процесса, так как итоговая разница между ними составила всего около половины процента (см. рис. 5, 6). Чего уже нельзя сказать об оптимизации 8 каналов (см. рис. 7), когда наиболее оптимальный предполагаемый профиль совпал с итоговым.

Заключение

Благодаря удачно слаженному тандему из неградиентных алгоритмов удалось повторить лучшие результаты оптимизации, а некоторые из них даже превзойти. На рис. 8 приведены максимальные значения амплитуд функционала S , полученные ранее и сейчас, а также отмечен теоретический предел. Количественные улучшения начинаются уже с 10 каналов оптимизации, а принципиально качественные уже с 17 гармоник.

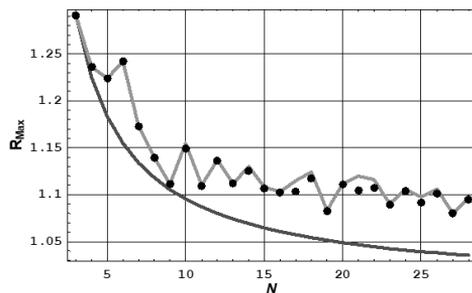


Рис. 8. Сравнение новых значений (кружки) и полученных ранее (углы серой кривой) максимальных значений амплитуд оптимизированных функционалов; гладкая кривая – теоретический предел

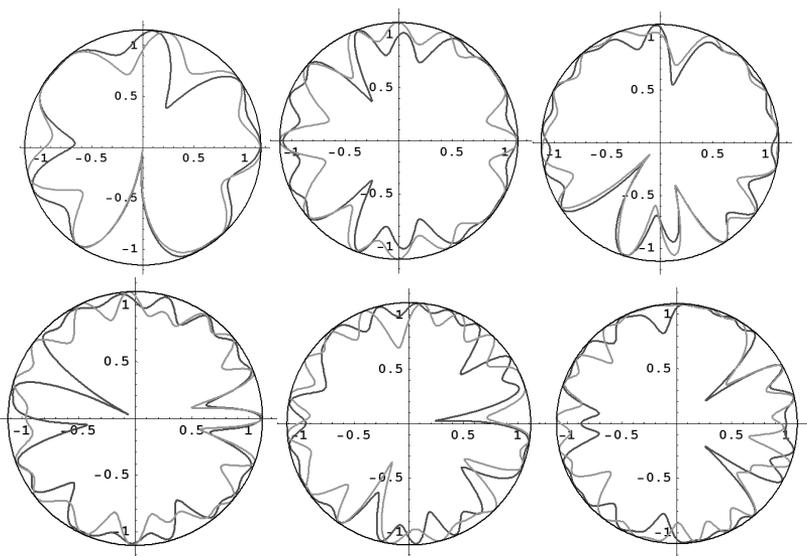


Рис. 9. Сравнение новых (темная кривая) и полученных ранее (серая кривая) профилей амплитуды функционала S для следующего числа гармоник (слева-направо-сверху-вниз): 10, 17, 18, 21, 22, 25; окружностями обозначены полученные ранее пиковые значения

Помимо общего результата на рис. 9 приведены графики профилей, которые были существенно улучшены новым подходом.

Список литературы

1. Friese, M. Multitone signals with low crest factor / M. Friese // *IEEE Trans. on Comm.* – 1997. – Vol. 45(10). – P. 1338–1344.
2. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters / J. Chow, G. Town [et al.] // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 1996. – Vol. 8 (1). – P. 60–62.
3. Advances in the design and fabrication of high-channel-count fiber Bragg gratings / Hongpu Li, Ming Li [et al.] // *J. Lightwave Technol.* – 2007. – Vol. 25(9). – P. 2739–2750.
4. Analysis and design of multi-tone signal generation algorithms for reducing crest factor / Yukiko Shibasaki, Koji Asami [et al.] // *2020 IEEE 29th Asian Test Symposium (ATS'20)*. – 2020. – P. 1–6.
5. Three-step design optimization for multi-channel fibre Bragg gratings / K.Y. Kolossovski, R.A. Sammut [et al.] // *Opt. Express.* – 2003. – Vol. 11(9). – P. 1029–1038.
6. Gerchberg, R.W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures / R.W. Gerchberg, W.O. Saxton // *Optik.* – 1972. – Vol. 35(2). – P. 237–246.
7. Shapiro, D.A. Sixth moment optimization of multi-channel Bragg filters / D.A. Shapiro, A.I. Latkin // *Opt. Commun.* – 2011. – Vol. 284(6). – P. 1565–1568.

References

1. Friese M. Multitone signals with low crest factor. *IEEE Trans. on Comm.*, 1997, vol. 45, no. 10, pp. 1338-1344.
2. Chow J., Town G. et al. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1996, vol. 8, no. 1, pp. 60-62.
3. Li Hongpu, Li Ming et al. Advances in the design and fabrication of high-channel-count fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Technol.*, 2007, vol. 25, no. 9, pp. 2739-2750.
4. Shibasaki Yukiko, Asami Koji et al. Analysis and design of multi-tone signal generation algorithms for reducing crest factor. *Proceedings of IEEE 29th Asian Test Symposium (ATS'20)*, 2020, pp. 1-6.
5. Kolossovski K.Y., Sammut R.A. et al. Three-step design optimization for multi-channel fibre Bragg gratings. *Opt. Express*, 2003, vol. 11, no. 9, pp. 1029-1038.
6. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, vol. 35, no. 2, pp. 237-246.
7. Shapiro D.A., Latkin A.I. Sixth moment optimization of multi-channel Bragg filters. *Opt. Commun.*, 2011, vol. 284, no. 6, pp. 1565-1568.

Сведения об авторах

НЕМЫКИН А.В.

e-mail: *anti1985ster@gmail.com*

Младший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

ШАПИРО Д.А.

e-mail: *shapiro@iae.nsk.su*

Заведующий Лабораторией фотоники, доктор физико-математических наук, профессор, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

About the authors

A.V. NEMYKIN

e-mail: *anti1985ster@gmail.com*

Junior researcher, PhD in Physics and Mathematics, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

D.A. SHAPIRO

e-mail: *shapiro@iae.nsk.su*

Head of the Photonics Laboratory, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 18.09.2024

Одобрена: 20.09.2024

Принята к публикации: 23.09.2024

Financing. The study was not sponsored.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equal.

Received: 18/09/2024

Approved: 20/09/2024

Accepted for publication: 23/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Немыкин, А.В. Фазовая оптимизация пиковой амплитуды суммы гармоник / А.В. Немыкин, Д.А. Шапиро // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 62–74.

Please cite this article in English as: Nemykin A.V., Shapiro D.A. Crest factor minimization of the multitone complex signal. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 62-74.

УДК 621.372.8.082.5

Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Российская Федерация

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН СИГНАЛА С КРАТНЫМ НЕЦЕНТРАЛЬНЫМ ЧИРПИРОВАНИЕМ

Предлагается метод, который помогает снизить нелинейные искажения сигналов для амплитудно-фазовой модуляции, используя формат 8-QAM в качестве примера. Нецентральное чирпирование также дает возможность управлять частотными областями и разбивать каналы на несколько частей.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, математическое моделирование, нелинейное уравнение Шредингера, фазовая модуляция, нецентральное чирпирование, ортогональные поляризации.

E.G. Shapiro, D.A. Shapiro

Institute of Automation and Electrometry of the Siberia Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

SPECTRAL DESIGN OF THE SIGNAL WITH MULTIPLE NON-CENTRAL CHIRPING

A method is proposed that helps to reduce the nonlinear distortion of signals for amplitude-phase modulation, using the 8-QAM format as an example. Non-central chirping also gives the ability to control the frequency regions and partition the channel into multiple parts.

Keywords: fiber optic links, mathematical modeling, nonlinear Schrödinger equation, phase modulation, non-central chirping, orthogonal polarizations.

Введение

Волоконно-оптические линии связи имеют широкий круг применений благодаря своей способности передавать данные на большие расстояния без ухудшения качества сигнала. Они используются для быстрого доступа в Интернет, передачи данных между компаниями и правительственными учреждениями, где важны безопасность и высокое качество сигнала, и для многих других целей. В связи с этим требования к системам передачи могут сильно различаться в зависимости от их использования. Для решения разнообразных задач применяются такие

ключевые технологии, как когерентное детектирование, новые типы модуляции, мультиплексирование по поляризациям, компенсация дисперсии на приемнике и другие [1–4]. Несмотря на эти преимущества, когерентные системы подвержены нелинейным эффектам, которые могут снизить отношение сигнал/шум и, следовательно, привести к ошибкам при приеме.

Разработка методов подавления нелинейных искажений является важной и актуальной задачей. В данной работе для уменьшения нелинейных искажений при распространении амплитудно-фазового сигнала мы предложили использовать кратное чирпирование, способ формирования, при котором длительность периода чирпирования состоит из нескольких длительностей битового интервала. На примере формата 8-QAM показано, что данный способ эффективно подавляет нелинейный шум. Кроме того, кратное чирпирование позволяет перемещать отдельные группы оптических импульсов в другую частотную область.

Кратное чирпирование

Гауссов оптический импульс с нецентральной чирпом задается формулой

$$f(t) = Qe^{-\frac{1}{2T_0^2}t^2} e^{i\frac{C(t-t_0)^2}{2T_0^2}} = Qe^{iC\frac{t_0^2}{2T_0^2}} e^{-\frac{1-iC}{2T_0^2}t^2} e^{-\frac{iCt_0}{T_0^2}t}, \quad (1)$$

где Q^2 определяет мощность импульса, T_0 – параметр ширины, t_0 – величина сдвига чирпа относительно точки пиковой мощности импульса. Множитель $\exp[-iCt_0t/T_0^2]$ в (1) означает, что Фурье-образ функции $f(t)$ имеет частотный сдвиг на $\Delta\omega = -Ct_0/T_0^2$.

Если у разных импульсов различаются сдвиги чирпа, то различаются и частотные области импульсов. Обозначим T длительность битового интервала, предположим, что длительность интервала чирпирования равна mT и $m > 1$. Тогда у импульсов, находящихся внутри периода чирпирования, сдвиги разные.

На рис. 1 изображены профили мощности импульсов на периоде чирпирования 0–100 пс и график функции чирпа при $C = 1$. В общем случае период чирпирования $0 - mT$ содержит m битовых интервалов и m коэффициентов модуляции. Обозначим $f_1(t), \dots, f_l(t), \dots, f_m(t)$

последовательность импульсов, находящихся на интервале $0 - mT$ пс. Тогда чирп и импульсы на этом временном интервале задаются формулами [5]:

$$\text{Ch}(t) = C \left(t - \frac{m}{2}T \right)^2 / 2T_0^2, \quad (2)$$

$$f_l(t) = c_l Q e^{-\frac{(t-lT+T/2)^2}{2T_0^2}} e^{i \frac{C}{2T_0^2} \left(t - \frac{m}{2}T \right)^2}, \quad t \in [(l-1)T, lT], \quad l = 1, \dots, m,$$

где c_l – коэффициент модуляции. Сдвиг чирпа t_l функции $f_l(t)$ задается равенством $t_l = \frac{T}{2}(2l - m - 1)$. Пиковая мощность Фурье-образа $f_l(t)$ достигается на частоте

$$\Delta\omega_l = \frac{C}{T_0^2} \frac{T}{2} (m + 1 - 2l). \quad (3)$$

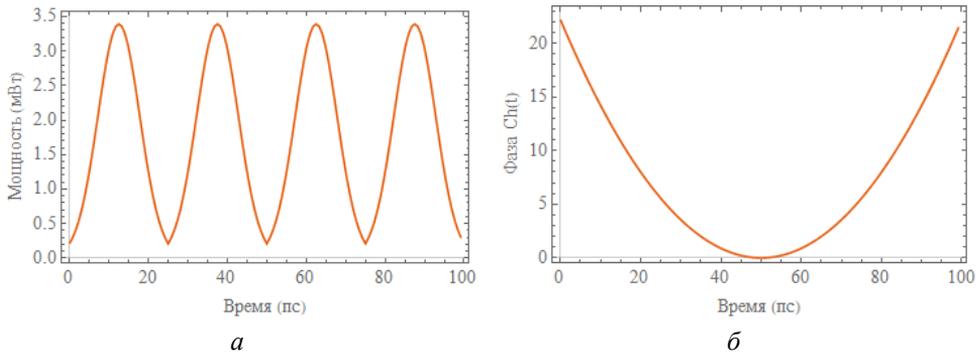


Рис. 1. Профиль мощности импульсов, $m = 4$, $T = 25$ пс, $T_0 = 7,5$ пс (а) и функция чирпа (б)

Рассмотрим последовательность импульсов объемом Mm , которой соответствует случайная последовательность коэффициентов модуляции $c_1, \dots, c_m, c_{m+1}, \dots, c_{Mm}$. Эта последовательность состоит из M участков чирпирования, которым присвоим номера $1, \dots, M$. Период чирпирования с номером k содержит импульсы с коэффициентами $c_{(k-1)m+1}, c_{(k-1)m+2}, \dots, c_{km}$.

Импульсы, расположенные на битовых интервалах с номером $l + (k - 1)m$, $k = 1, \dots, M$, где l фиксированное целое число и $l \leq m$, образуют канал с частотой $\Delta\omega_l$ (3).

На рис. 2, а показано, как канал преобразовался в четыре канала (рис. 2, б) в результате кратного чирпирования. Таким образом происходит уширение частотной области канала. При многоканальной передаче информации каналы могут перекрываться.

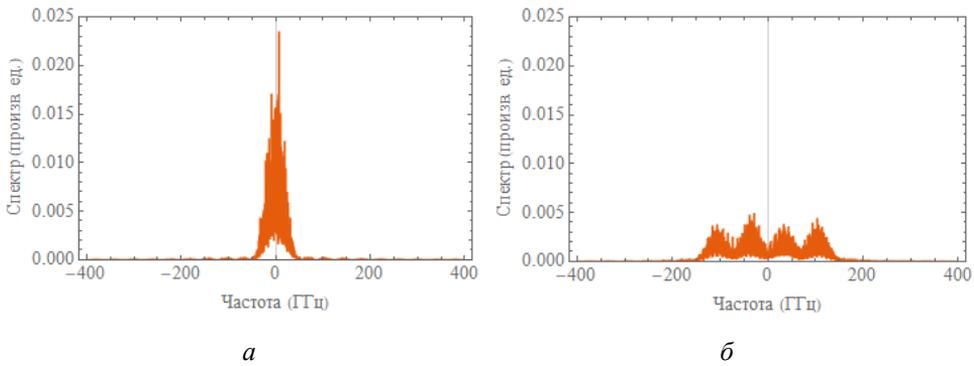


Рис. 2. Профиль мощности импульсов, $m=4$, $T=25$ пс, $T_0=7,5$ пс: $C = 0$ (а), $C = 1$ (б)

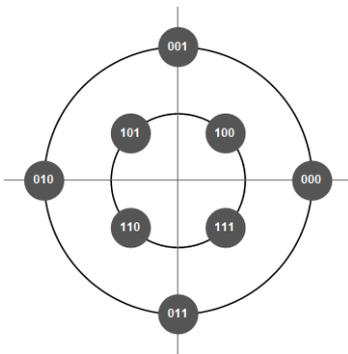


Рис. 3. Схема 8-QAM формата на плоскости комплексной амплитуды; каждая 3-битовая последовательность кодируется значениями амплитуды и фазы, обозначенными кружками

Во временной области импульсы с разным сдвигом чирпа смещаются относительно друг друга при распространении сигнала [6]. Вместе с дисперсионным уширением дрейф импульсов, вызванный кратным чирпированием, способствует перемешиванию сигнала. Таким образом, информация передается на многих частотах без привязки к определенному каналу, а импульсы занимают несколько битовых интервалов. Это сглаживает профиль мощности во временной и частотной областях. Мы численно показали, что использование кратного чирпирования подавляет нелинейный шум и повышает качество сигнала для формата 8-QAM. На рис. 3 приведено схематическое изображение формата 8-QAM.

Численное моделирование

Было проведено численное моделирование 8-QAM распространения сигнала для гауссовых импульсов с битовым интервалом $T=25$ пс и chirпом, смещенным от точки пика мощности импульса. Моделирование осуществлялось в рамках нелинейных уравнений Шредингера с учетом поляризации.

Линия связи длиной 500 км состояла из 10 участков вида:

$$\text{SMF}(50 \text{ км}) + \text{EDFA},$$

где SMF – стандартное одномодовое волокно, EDFA – волоконный эрбиевый усилитель с шум-фактором 4,5 дБ, полностью компенсирующий затухание сигнала на участке. В конце линии связи выполнялась компенсация дисперсии.

Для описания шума усилителей ASE (amplified spontaneous emission) была использована модель белого гауссова шума. Искажения, вызванные поляризационной модовой дисперсией, не учитывались. Параметры линии приведены ниже. Для выделения каналов мы использовали супергауссов оптический фильтр восьмой степени с шириной 90 ГГц. Моделирование выполнялось для пяти каналов с частотной разницей 100 ГГц. Мы использовали связанные нелинейные уравнения Шредингера. Длительность периода chirпирования равнялась 200 пс и содержала $m=8$ битовых интервалов $T = 25$ пс.

Параметры стандартного одномодового волокна (SMF).	
Затухание на $\lambda = 1550$ нм (дБ/км)	0,2
Эффективная площадь (мкм ²)	80
Дисперсия (пс/нм/км)	17
Дисперсионный наклон (пс/нм ² /км)	0,07
Нелинейный показатель преломления (10^{-20} м ² /Вт)	2,7

Начальный сигнал центрального канала, состоящий из последовательности $N = 8k$ битов, для поляризаций A_x и A_y задается формулами:

$$A_x(0, t) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{8}-1} \sum_{l=1}^8 c_{x(8k+l)} f_l(t - 8kT);$$

$$A_y(0, t) = \sum_{k=0}^{\frac{N}{8}-1} \sum_{l=1}^8 c_{y(8k+l)} f_l(t - 8kT),$$

где c_x и c_y – коэффициенты модуляции формата 8-QAM, пиковая мощность импульсов составляла 3,4 и 13,6 мВт, параметр ширины гауссовых импульсов был равен 7,5 пс. Параметр chirпирования C был равен 1.

Мы сравнили качество сигнала формата 8-QAM для двух вариантов: 1) без chirпирования, $C=0$ и 2) с кратным chirпированием $C=1, m=8$. Применение chirпирования заметно меняет спектр сигнала. На рис. 4 приведен график спектральной мощности центрального канала для одной из поляризаций до chirпирования и после.

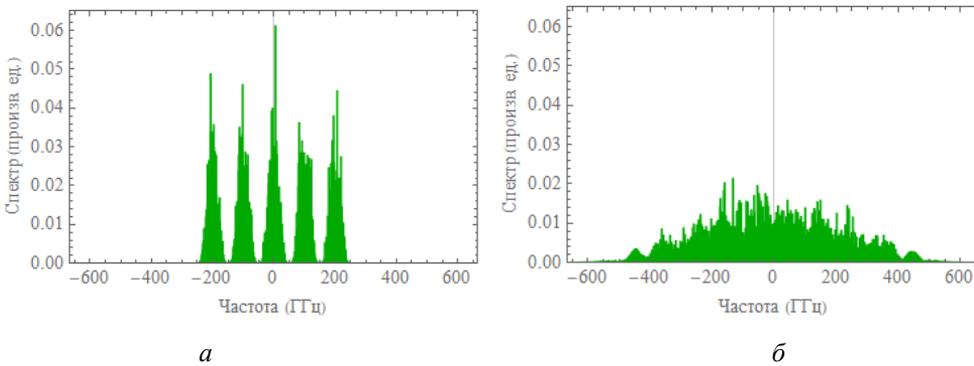


Рис. 4. Спектр мощности до (а) и после chirпирования (б) при $C=1, m=8$

Видно, что chirпирование приводит к стиранию границ между каналами и уменьшению максимальных значений частотных мощностей.

После распространения сигнала необходимо убрать искажения, вызванные хроматической дисперсией, и выделить начальные каналы. Цифровая обработка позволяет компенсировать дисперсию разделить сигнал на каналы. Математически кратное chirпирование означает умножением комплексной амплитуды сигнала на периодическую функцию, которая на периоде $0 - mT$ задается формулой $\exp(iCh(t))$, см. (2). Обратное chirпирование, т.е. умножение на $\exp(-iCh(t))$, восстанавливает сигнал.

На рис. 5, а приведена спектральная мощность в центральном канале в конце линии после компенсации дисперсии и до обратного chirпирования. Видно, что рис. 5, а и 4, б похожи. На рис. 5, б изображена спектральная мощность сигнала после компенсации дисперсии и обратного chirпирования.

Далее приведем сигнальные диаграммы для варианта без chirпирования ($C = 0$) и для chirпирования с параметром $C = 1, m = 8$. На рис. 6, а

показан график для распространения сигнала без чирпирования. Видно, что качество сигнала низкое, а вероятность ошибки 0,1. На рис. 6, б видно, что искажения значительно меньше, если использовать кратное чирпирование. Здесь вероятность ошибки 5×10^{-3} .

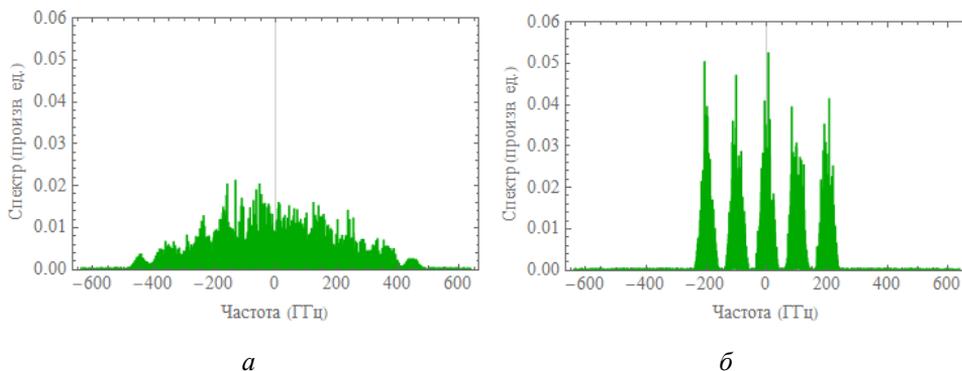


Рис. 5. Спектр мощности до (а) и после (б) обратного чирпирования

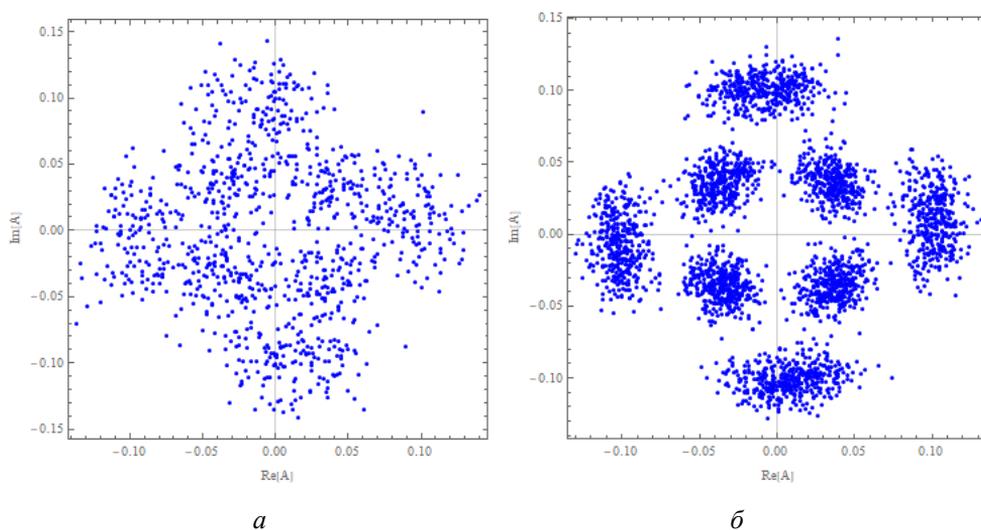


Рис. 6. Сигнальная диаграмма при $C=0$, вероятность ошибки 0,1 (а) и $C=1$, вероятность 5×10^{-3} (б)

Заключение

Предложен способ чирпирования, который уменьшает нелинейные искажения сигнала для амплитудно-фазовой модуляции на примере формата 8-QAM. Нецентральное чирпирование сигнала позволяет управлять частотной областью: сдвигать сигнал, дробить канал на

несколько. Центральное chirпирование обеспечивает управление центральными частотами сигнала, тогда как нецентральное chirпирование предоставляет больше возможностей для контроля всей частотной области, что особенно полезно для управления фазой отдельных компонент.

Список литературы

1. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации / В.А. Коньшев [и др.] // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 12. – С. 1102–1113.
2. Capacity limits of optical fiber networks / R.J. Essiambre [et al.] // *Journal of Lightwave technology*. – 2010. – Т. 28, no. 4. – P. 662–701.
3. Kikuchi, K. Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation / K. Kikuchi // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2006. – Vol. 12, no. 4. – P. 563–570.
4. Choyon, A.K.M.S.J. Nonlinearity compensation and link margin analysis of 112-Gbps circular-polarization division multiplexed fiber optic communication system using a digital coherent receiver over 800-km SSMF link / A.K.M.S.J. Choyon, R. Chowdhury // *Journal of Optics*. – 2021. – Vol. 50, no. 3. – P. 512–521.
5. Шапиро, Е.Г. Управление спектром высокоскоростного канала с помощью нецентрального chirпирования сигнала / Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Квантовая электроника. – 2024. – Т. 54, № 3. – С. 156–161.
6. Шапиро, Е.Г. Фазово-модулированный формат передачи данных с нецентральным chirпированием по высокоскоростной оптической линии связи без компенсации дисперсии / Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53, № 6. – С. 510–514.

References

1. Konyshev V. A. et al. Trends of and prospects for the development of fiber-optic communication systems. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. suppl 4, pp. S435-S450.
2. Essiambre R.J. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 4, pp. 662-701.
3. Kikuchi K. Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical modulation with digital carrier phase estimation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, vol. 12, no. 4, pp. 563-570.
4. Choyon A.K.M.S.J., Chowdhury R. Nonlinearity compensation and link margin analysis of 112-Gbps circular-polarization division multiplexed fiber optic communication system using a digital coherent receiver over 800-km SSMF link. *Journal of Optics*, 2021, vol. 50, no. 3, pp. 512-521.

5. Shapiro E.G., Shapiro D.A. Control of a high-speed channel spectrum using an off-center signal chirp. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2024, vol. 51, no. suppl 6, pp. S458-S466.

6. Shapiro E.G., Shapiro D.A. Phase-modulated format of off-center chirped data transmission over a high-speed optical link without dispersion compensation. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, no. suppl 10, pp. S1156-S1162.

Сведения об авторах

About the authors

ШАПИРО Е.Г.

e-mail: elena.shap@gmail.com

E.G. SHAPIRO

e-mail: elena.shap@gmail.com

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Senior researcher, PhD in Physics and Mathematics, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

ШАПИРО Д.А.

e-mail: shapiro@iae.nsk.su

D.A. SHAPIRO

e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Заведующий лабораторией фотоники, доктор физико-математических наук, профессор, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Head of the Photonics Laboratory, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

Финансирование. Работа поддержана Министерством высшего образования и науки РФ, тема FWNG-2024-0013.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 22.09.2024

Одобрена: 26.09.2024

Принята к публикации: 30.09.2024

Financing. The work was supported by the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, topic FWNG-2024-0013.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equal.

Received: 22/06/2024

Approved: 26/09/2024

Accepted for publication: 30/09/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Шапиро, Е.Г. Спектральный дизайн сигнала с кратным нецентральным чирпированием /
Е.Г. Шапиро, Д.А. Шапиро // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 75–84.

Please cite this article in English as: Shapiro E.G., Shapiro D.A. Spectral design of the signal
with multiple non-central chirping. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, pp. 75-84.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА (APPLIED PHOTONICS)»

1. Общие положения

- 1.1. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» является рецензируемым периодическим научным изданием с открытым доступом. За публикацию статей плата с авторов не взимается. Все публикуемые статьи проходят обязательное рецензирование членами редколлегии и (или) независимыми внешними экспертами.
- 1.2. Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), Пермь, Россия.
Журнал основан в 2014 году.
С 2014 года журнал издается под названием «Прикладная фотоника (Applied Photonics)».
Полное официальное название: Прикладная фотоника (Applied Photonics)
Краткое название на русском языке: Прикладная фотоника
Название журнала на английском языке: Applied Photonics
Аббревиатура журнала на английском языке (согласно ISO-4): Appl. Ph.
- 1.3. Редакция журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» при осуществлении своей деятельности опирается на Закон Российской Федерации от 27 декабря 1991 г. № 2124-1 «О средствах массовой информации», Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 № 273-ФЗ, Устав Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Устав редакции журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)», Политику научного журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в части соблюдения этических норм при опубликовании статей.
- 1.4. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-59184 от 03 сентября 2014 г., ISSN (Print): 2411-4367 ISSN (Online): 2411-4375.
- 1.5. Язык публикации: русский, английский.
- 1.6. Периодичность выхода: 4 раза в год.
- 1.7. Территория распространения: Российская Федерация.
- 1.8. Редакция журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» кроме печатного издания организует формирование полнотекстовых электронных версий статей, доступных на сайте Журнала и научной электронной библиотеке eLibray.ru.
- 1.9. Интернет адрес сайта Журнала: <http://applied.photonics.pstu.ru>

2. Аудитория

- 1.10. Журнал «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» адресован научным сотрудникам, инженерам, системным программистам, руководителям промышленных предприятий и научно-исследовательских организаций, аспирантам, соискателям учёных степеней, преподавателям и студентам старших курсов технических вузов и классических университетов.
- 1.11. Подписной индекс журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в каталоге «Пресса России»: 43042.
- 1.12. Контент доступен по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» («Атрибуция — Некоммерческое использование») 4.0 Всемирная. (CC BY-NC 4.0). Редакция журнала разрешает читателям читать, скачивать, копировать, распространять, распечатывать, искать или давать ссылки на полные тексты своих статей и позволяет читателям использовать их в любых других законных целях в соответствии с определением открытого доступа, данным Будапештской инициативой открытого доступа.

3. Представление материалов и их рассмотрение

- 1.13. Приём статей осуществляется через обращение по электронной почте: photonics.appl.jrn@gmail.com. Для этого автору необходимо подать статью, и прикрепив все необходимые материалы (п. 3.2).
Представленные в редакцию материалы первоначально рассматриваются на предмет выполнения требований соответствия пакета предоставленных документов (см. п. 3.2)
- 1.14. В редакцию Журнала должны быть представлены:
 - 1.14.1. Текст статьи, оформленный согласно требованиям, с которыми можно ознакомиться, скачав шаблон оформления статей, доступный по ссылке <http://applied.photonics.pstu.ru/toauthors/>
 - 1.14.2. Акт экспертизы о возможности публикации статьи в открытой печати.
- 1.15. Материалы, удовлетворяющие требованиям соответствия пакета предоставленных документов и требованиям к оформлению, передаются для рецензирования.
- 1.16. К рецензированию привлекаются учёные, имеющие признанный авторитет и работающие в области знаний, к которой относится содержание рукописи.
- 1.17. Рецензенты обязаны следовать принятой Политике научного журнала «Прикладная фотоника (Applied Photonics)» в части соблюдения этических норм при опубликовании статей, с которой можно ознакомиться по ссылке: <http://applied.photonics.pstu.ru/polit/>
- 1.18. Рецензия составляется по стандартной предлагаемой редакцией форме.
- 1.19. Авторы извещаются о результатах независимого рецензирования.

4. Редакция журнала

- 1.20. Состав редакции:
Главный редактор: Семенов Сергей Львович;
Заместители главного редактора: Первадчук Владимир Павлович;
Заведующий редакцией: Алексеев Александр Олегович;

Ответственный секретарь: Владимирова Дарья Борисовна;
Выпускающий редактор: Афанасьева Марьяна Николаевна;
Верстальщики: Богданова Ксения Николаевна, Акчурина Юлия Шарифовна,
Кирышева Александра Николаевна;
Председатель комиссии по экспертизе выпуска: Белозеров Владимир Анатольевич;
Секретарь комиссии по экспертизе выпуска: Краснянская Татьяна Ивановна.

1.21. Контакты редакции:

Адрес: Редакция журнала «Прикладная фотоника», Россия, Пермь, 614990,
Комсомольский пр-кт, 29;
Телефон: +7 (342) 219-81-91; +7 (342) 219-85-87;
Эл. почта: photonics.appl.jrn@gmail.com

5. Графическое оформление журнала

- 1.22. На лицевой стороне обложки расположены название журнала Прикладная фотоника, а также миниатюра с одним из ученых, прославивших свое имя в области фотоники. Обложка выполнена в бело-зеленых тонах.
Автор концепции обложки журнала Прикладная фотоника: Первадчук Владимир Павлович.

Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 11, № 3

Выход в свет 08.10.2024. Формат 70×100/16.

Усл. печ. л. 6,45. Тираж 21 экз. Заказ № 173.

Свободная цена

Издательство Пермского национального
исследовательского политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.

Отпечатано в типографии Издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.