



Школа молодых ученых «НЕЛИНЕЙНАЯ И МИКРОВОЛНОВАЯ ФОТОНИКА»

6-9 октября

2025 г. —————> г. Пермь

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СО РАН
УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

НЕЛИНЕЙНАЯ И МИКРОВОЛНОВАЯ ФОТОНИКА

Материалы международной школы молодых ученых

6-9 октября 2025 года

Пермь 2025

Программный комитет

чл.-корр. РАН, проф. *С.А. Бабин*, ИАиЭ СО РАН
канд. физ.-мат. наук *Д.С. Харенко*, ИАиЭ СО РАН
канд. физ.-мат. наук, проф. *А.А. Фотиади*, УлГУ
д-р. физ.-мат. наук, проф. *С.Л. Семенов*, НЦВО РАН
д-р. физ.-мат. наук, проф. *В.П. Драчёв*, Сколтех
канд. физ.-мат. наук *А.В. Достовалов*, ИАиЭ СО РАН
В.А. Рибенек, УлГУ

С 6 по 9 октября 2025 года в г. Пермь проходит ежегодная международная школа молодых ученых «Нелинейная и Микроволновая фотоника», в которой принимают участие ведущие российские эксперты в области нелинейной оптики, радиофотоники, смежных дисциплин и приложений. Школа с новым названием объединяет и продолжает традиции школ «Нелинейная фотоника» и «Микроволновая фотоника» проводимые, соответственно, с 2017 и с 2023 года.

Программа школы охватывает широкий спектр проблем – от фундаментальной науки до актуальных практических применений, а также включает более двадцати докладов и обзорных лекций от ведущих российских экспертов о передовых экспериментальных и теоретических работах в этих областях.

Сборник тезисов опубликован при поддержке Российского научного фонда в рамках проектов “Развитие элементной базы микроволновой фотоники” (№23-79-30017) и “Фундаментальные задачи и новые технологии фотоники многомодовых волоконных световодов с регулярными и случайными 3-мерными структурами” (№21-72-30024-П), Ульяновским государственным университетом и Институтом автоматики и электрометрии СО РАН.

Корректор *Д. С. Харенко*
Верстка *В. М. Волоси*
Дизайн обложки *Е. С. Махмутова*

СОДЕРЖАНИЕ

Абанин А. И., Кицюк Е. П. Оптимизация геометрических параметров кольцевых микрорезонаторов из нитрида кремния	4
Василевская Ю. О., Кицюк Е. П., Сибатов Р. Т. Возможности создания оптоэлектронного мемристивного устройства на основе серебряных наночастиц	6
Василевский П. Н., Савельев М. С., Герасименко А. Ю. Нелинейно-оптический отклик в жидких средах с углеродными нанотрубками для управления логическим сигналом.....	8
Завалишина Л. Д., Хунцюнь Ю., Шелеметьев А. М., Маркварт А. А., Лиокумович Л. Б., Ушаков Н. А. Генерация яркого излучения с супер-пуассоновской статистикой в одномодовом оптическом волокне.....	10
Лебедева Я. С., Будаговский И. А., Смаев М. П., Сибатов Р. Т., Лазаренко П. И. Формирование кристаллических областей на поверхности аморфного Sb_2Te_3 с помощью структурированных лазерных пучков.....	12
Прибылов М. В., Коробко Д. А., Рибенек В. А., Итрин П. А., Фотиади А. А. Применение последовательно соединенных одномодового и многомодового волокон в качестве насыщающегося поглотителя в кольцевом волоконном лазере.....	13
Рибенек В. А., Коробко Д. А., Итрин П. А., Тертышникова Г. В., Фотиади А. А. Гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере с сохранением поляризации на основе нелинейного усиливающего петлевого зеркала	15
Рибенек В. А., Коробко Д. А., Тертышникова Г. В., Фотиади А. А. Оптимизация положения SESAM в кольцевом солитонном лазере на основе РМ волокон.....	17
Сауров М. А., Рязанов Р. М. Зависимость характеристик эпитаксиальных p-i-n диодов от параметров высокотемпературных обработок.....	19
Смирнов П. А., Кункель Т. С., Ромашкин А. В., Воробьев Ю. В., Смаев М. П., Рязанов Р. М., Лазаренко П. И. Индуцированная лазерным излучением аморфизация в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для формирования устройств фотоники	21
Судьин А. В., Волков И. А., Ушаков С. Н., Нищев К. Н. Шумоподобные импульсы с бифуркацией удвоения периода в эрбиевом кольцевом волоконном лазере.....	22
Федянина М. Е., Кицюк Е. П., Рязанов Р. М. Термоциклические исследования изменения оптических и электрофизических свойств аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$	24
Юдин Н. А., Волков И. А., Судьин А. В., Ушаков С. Н. Наблюдение длиннопериодических пульсаций в Yb волоконном лазере, работающим в режиме генерации диссипативных солитонов	26

Оптимизация геометрических параметров кольцевых микрорезонаторов из нитрида кремния

А. И. Абанин^{1,2,3*}, Е. П. Кицюк¹

¹НПК «Технологический центр», Москва, Россия

²Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³Московский институт электронной техники, Москва, Россия

*e-mail: aai-2000@mail.ru

Низкий уровень оптических потерь в планарных волноводах на основе нитрида кремния, наряду с совместимостью с существующим КМОП процессом в интегральной электронике, открывает возможность для создания компактных фотонных интегральных схем (ФИС) с микрорезонаторами высокой добротности на данной платформе. Объединение таких ФИС с другими фотонными и электронными устройствами как на одном кристалле, так и методами гетероинтеграции открывает возможность создания чипов для оптической обработки информации, спектроскопии, генераторов оптических гребенок и радиофотонных генераторов.

В данной работе представлены результаты оптимизации геометрических параметров (величины зазора в области связи и длины резонатора) кольцевых микрорезонаторов из нитрида кремния с целью увеличения добротности. Структуры кольцевых микрорезонаторов изготавливались методом электронно-лучевой литографии на подложках Si/SiO₂/Si₃N₄ с толщиной слоев SiO₂ и Si₃N₄ 2,7 мкм и 450 нм соответственно.

Оптические характеристики кольцевых резонаторов рассчитывались из их спектров пропускания, полученных в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 нм с использованием специализированной экспериментальной установки. Свет от узкополосного перестраиваемого лазерного источника через контроллер поляризации и массив оптических волокон направлялся на вход (дифракционную решетку) изготовленного нами кольцевого резонатора, расположенного на подвижном столике. Перемещение между элементами вариационной матрицы кольцевых микрорезонаторов осуществлялось при помощи пьезопозиционера, управляемого драйвером и контролировалось визуально посредством. Мощность излучения на выходе кольцевого резонатора измерялась фотодетектором, что в совокупности с перестройкой длины волны лазерного источника позволило измерить спектральную характеристику образцов.

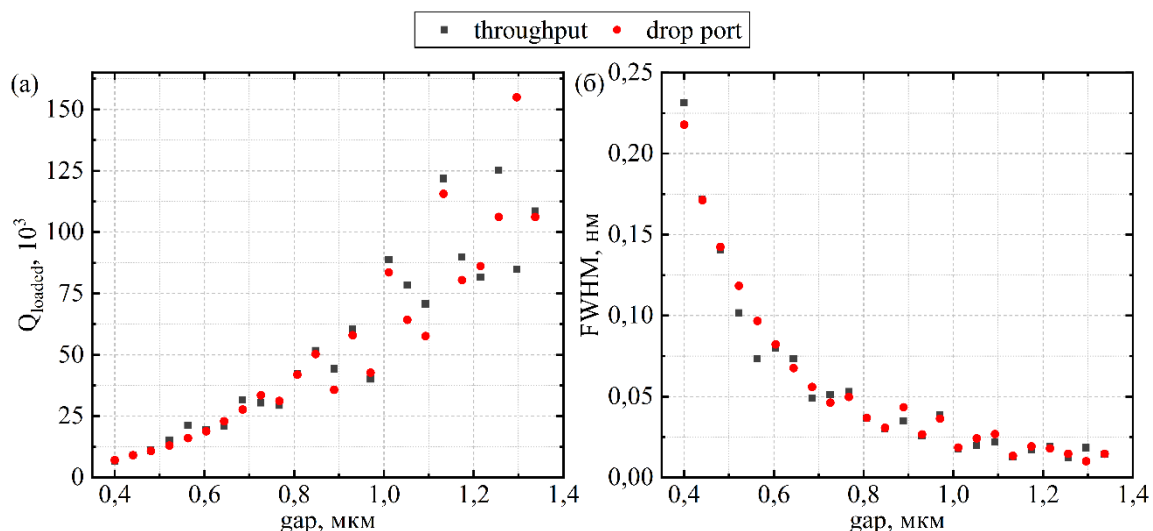


Рис. 1. Зависимости нагруженной добротности Q_{loaded} (a) и полной ширины на половине высоты (FWHM) резонанса (b) от величины зазора между кольцом и волноводом МКР

По исследованиям спектральных характеристик и определению параметров кольцевых резонаторов (Рис. 1) было установлено, что увеличение величины зазора между кольцом резонатора и волновода приводит к уменьшению FWHM и, соответственно, увеличению добротности резонатора.

Таким образом, установлена оптимальная величина зазора между кольцом и волноводом $gap = 1.3$ мкм кольцевого резонатора, что обеспечивает наивысшую добротность (более 10^5), при сохранении достаточной глубины резонанса.

Полученные результаты согласуются с физической моделью кольцевого резонатора и открывают возможность к дальнейшей оптимизации геометрии структур кольцевых микрорезонаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRМ-2025-0014).

Возможности создания оптоэлектронного мемристивного устройства на основе серебряных наночастиц

Ю. О. Василевская^{1*}, Е. П. Кицюк¹, Р. Т. Сибатов¹

¹*Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Зеленоград, Россия*

**e-mail: yul.vasilevskaya@gmail.com*

Мемристоры считаются одними из самых перспективных элементов для нейроморфных вычислений благодаря своей простой структуре [1, 2]. По сути, мемристор – это двухтерминальный элемент, проводимость которого нелинейно меняется под внешним воздействием и который может «запоминать» своё состояние. Актуальность исследований в данной области напрямую связана с попыткой преодоления фундаментального ограничения классической архитектуры фон Неймана, в которой модули памяти и обработки данных разделены. Это «узкое место» (англ. von Neumann bottleneck) снижает общую эффективность вычислений и приводит к высокому энергопотреблению [3], что предполагается решить переходом на нейроморфные системы, реализующие принцип «in-memory computing» (вычисления в памяти).

За последние годы на основе мемристоров было создано множество устройств, которые успешно воспроизводят ключевые функции биологических нейронных сетей [4, 5]. Однако большинство существующих систем основаны на электрическом управлении процессами изменения проводимости и алгоритмом считывания состояния. Оптоэлектронные нейроморфные системы интересны тем, что объединяют в себе сильные стороны как фотоники, так и электроники. Их ключевое отличие заключается в возможности использования света как в качестве входного управляющего сигнала, так и сигнала считывания состояния устройства, что заметно повышает скорость работы и общую энергоэффективность [6]. Растущий интерес к фотонно-управляемым нейроморфным системам закономерен: оптоэлектронные мемристоры, как ключевые элементы таких систем, открывают путь к интеграции функций памяти и вычисления в одном устройстве, что крайне важно для развития технологий искусственного интеллекта.

Серебряные наночастицы активно изучаются на предмет создания мемристивных систем нового поколения: во-первых, на сегодняшний день имеются отработанные технологии синтеза наночастиц заданного размера, чему во многом способствовали глубокие исследования SERS-активных материалов, и во-вторых, демонстрация наночастицами серебра выраженного поверхностного плазмонного резонанса в УФ-видимой области спектра, что в перспективе позволит обеспечить сочетание плазмонных и мемристивных характеристик и реализовать эффективное двойное управление напряжением и светом.

В данной работе исследовались планарные двухтерминальные устройства с вакуум-термически осажденными наночастицами серебра (Рис. 1а). Была подготовлена серия экспериментальных образцов с разным средним диаметром наночастиц от ~ 15 нм до ~ 100 нм.

Контроль морфологии наночастиц осуществлялся как по спектрам оптической плотности, так и по РЭМ-изображениям. Также изучались мемристивные свойства и особенности проводимости в массиве наночастиц серебра методом циклической вольтамперометрии (Рис. 1б). Каждый экспериментальный образец проходил этап «формовки», который подразумевает процесс формирования замкнутого проводящего пути между частицами при постоянном напряжении. Оценивались напряжения «включения» и рабочие напряжения для каждого образца.

Установлено, что размер и расстояния между серебряными наночастицами влияют на мемристивную динамику, а рабочие напряжения значительно снижаются при увеличении среднего размера частиц. При этом со временем было зафиксировано изменение морфологии и структурных особенностей в массиве серебра за счет процессов агрегации, что снижает стабильность работы устройства и ухудшают воспроизводимость рабочих характеристик.

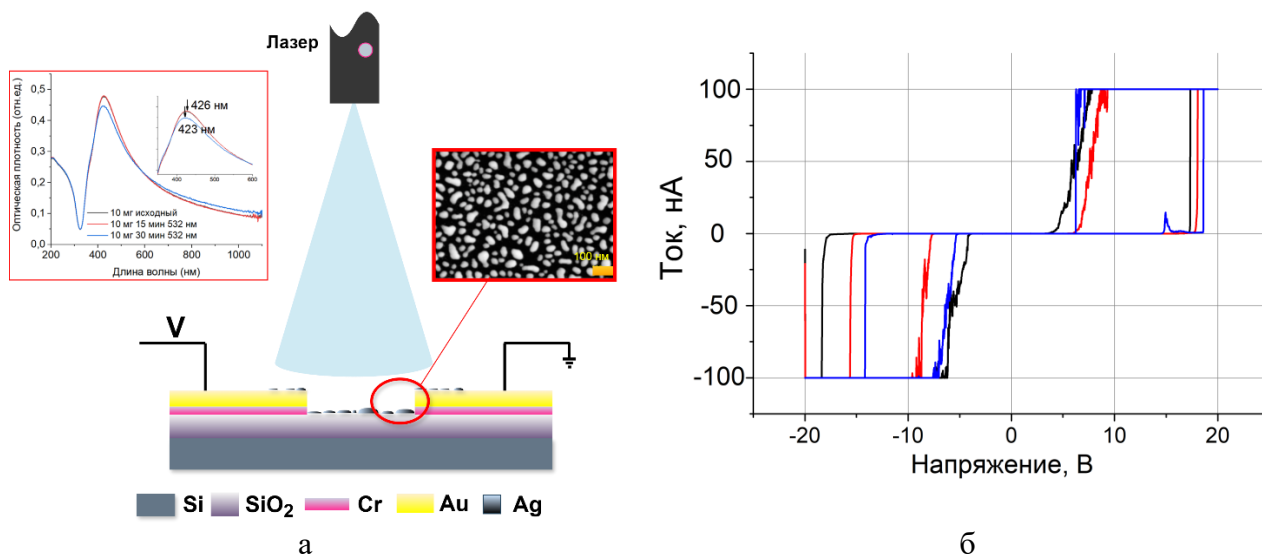


Рис.1. Схема измерения экспериментального образца (а) и вольтамперограммы при облучении лазером 532 нм (б). Цвета линий: черный – без света, красный и синий – повтор при непрерывном облучении

Также было рассмотрено воздействие непрерывного лазерного излучения с длиной волны 400 нм и 532 нм на мемристивное поведение и динамику проводимости. Данные длины волн выбраны исходя из близости к максимуму поглощения. Предположительно, облучение наночастиц серебра при одновременной подаче разности потенциалов на электроды устройства вызывает усиление локального поля вблизи наночастиц и ускоряет формирование проводящих контактов между ними за счет фотоиндуцированной ионизации серебра. Эффективность лазерного воздействия зависит от близости длины волны излучения к максимуму пика плазмонного резонанса. Полученные результаты предполагают дальнейшее широкое исследование возможности реализации комплексной оптоэлектронной системы для задач нейроморфных вычислений и оптической обработки информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRМ-2025-0014).

Литература

1. Duan X., Cao Z., Gao K., Yan W., Sun S., Zhou G., Sun B., Memristor-based neuromorphic chips. *Advanced materials*, vol. 36, no. 14, pp. 2310704, 2024.
2. Sung C., Hwang H., Yoo I. K., Perspective: A review on memristive hardware for neuromorphic computation. *Journal of Applied Physics*, vol. 124, no. 15, 2018.
3. Seok H., Lee D., Son S., Choi H., Kim G., Kim T., Beyond von Neumann architecture: Brain-inspired artificial neuromorphic devices and integrated computing. *Advanced Electronic Materials*, vol. 10, no. 8, pp. 2300839, 2024.
4. Hu L., Yang J., Wang J., Cheng P., Chua L. O., Zhuge F., All-optically controlled memristor for optoelectronic neuromorphic computing. *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 4, pp. 2005582, 2021.
5. Li Y., Wang Z., Midya R., Xia Q., Yang J. J., Review of memristor devices in neuromorphic computing: materials sciences and device challenges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 51, no. 50, pp. 503002, 2018.
6. Shan X., Zhao C., Wang X., Wang Z., Fu S., Lin Y., Liu, Y., Plasmonic optoelectronic memristor enabling fully light-modulated synaptic plasticity for neuromorphic vision. *Advanced Science*, vol. 9, no. 6, pp. 2104632, 2022.

Нелинейно-оптический отклик в жидких средах с углеродными нанотрубками для управления логическим сигналом

П. Н. Василевский^{1*}, М. С. Савельев¹, А. Ю. Герасименко¹

¹Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Россия

Фазовая модуляция представляет собой нелинейный эффект, возникающий вследствие зависимости показателя преломления от интенсивности излучения и состоящий в возникновении наведенного набега фазы, который приобретает световой импульс при распространении через оптическую среду с нелинейным показателем преломления [1, 2]. При распространении луча, имеющего пространственную форму в виде распределения Гаусса, в среде будет наблюдаться градиентное изменение показателя преломления, так как интенсивность в центре луча выше, чем по краям. Это приводит к искажению первоначально плоского волнового фронта, а лучи, распространяющиеся по нормали к фронту, искривляются. Явление пространственной фазовой самомодуляции является перспективным нелинейно-оптическим процессом для создания полностью оптических переключателей или модуляторов света [3]. Изменение пространственной формы луча с его преобразованием в форму колец позволяет создавать устройства для передачи логических «нулей» и «единиц», что является основой вычислений в фотонных системах передачи и преобразования информации. Также к преимуществам данного метода можно отнести возможность предсказания формы луча после прохождения через образец с использованием дифракционного интеграла Френеля-Кирхгоффа [4].

В работе исследована возможность передачи логических «нулей» и «единиц» при разной мощности излучения при прохождении через кювету с жидкой нанодисперсной средой с одностенными углеродными нанотрубками. Для генерации лазерного излучения использован титан-сапфировый импульсный фемтосекундный лазер Coherent Chameleon Ultra (рисунок 1). Частота повторения импульсов составляла 80 МГц, длительность импульса – 140 фс, длина волны – 800 нм. Длина оптического пути в нанодисперсной среде составляла 2 мм. Мощность излучения варьировалась с помощью оптического ослабителя с призмой Глана. Регистрирующая CCD-камера находилась на расстоянии 4 см за образцом. Градиентное изменение показателя преломления приводит к изменению скорости распространения луча в среде, что приводит к появлению интерференционной картины на экране.

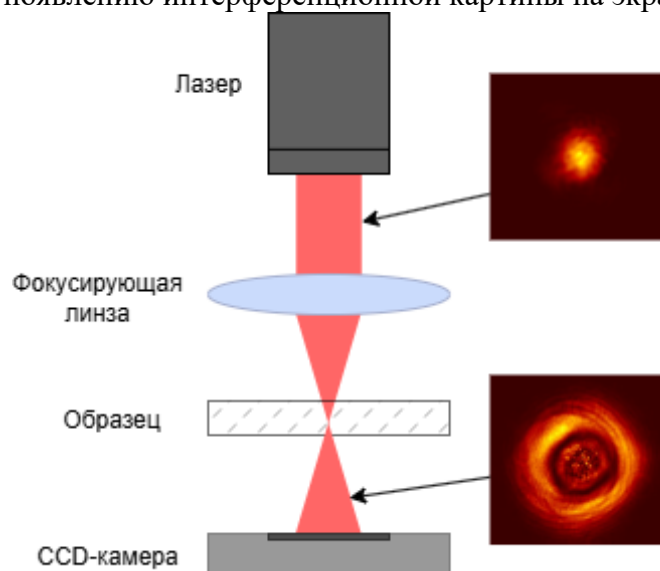


Рис.1. Схема эксперимента

На рисунке 2 показана зависимость мощности излучения в отмеченной области (зеленый круг) от мощности излучения, воздействующего на образец. При малой мощности

излучения, прошедший луч соответствует гауссовой форме падающего луча. Повышение мощности приводит к расширению луча с образованием кольцевидной структуры. При этом в зеленую область начинают падать светлые полосы и темные полосы, которые соответствуют логическим «нулям» (красная линия) и «единицам» (зеленая линия).

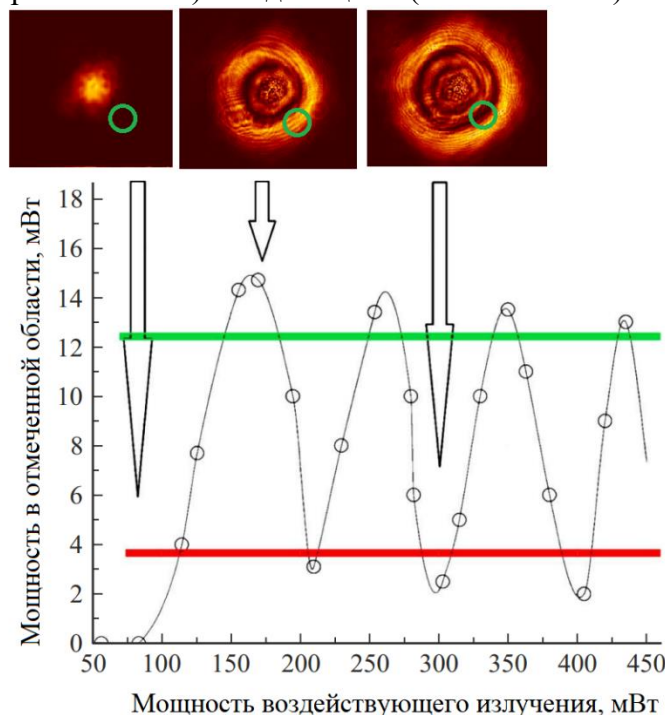


Рис. 2. Возможность передачи логических «нулей» и «единиц» при разной мощности излучения

Стоит отметить, что при дальнейшем увеличении мощности, в отмеченную область начинает попадать центральная часть луча, в которой интерференционные полосы слабо различимы, что требует дополнительных исследований. Полученные результаты подтверждают возможность переключения логических состояний при изменении мощности лазерного излучения, которое выступает в качестве управляющего сигнала.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Tsang H. K., Wong C. S., Liang T. K., Day I. E., Roberts S. W., Harpin A., Asghari M, Optical dispersion, two-photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at 1.5 μ m wavelength, *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 3, p.416-418, 2002.
2. Forbes A., Dudley A., McLaren M, Creation and detection of optical modes with spatial light modulators, *Advances in Optics and Photonics*, vol. 8, no. 2, p. 200-207, 2016.
3. P. Dong, Y.K. Chen, G.H. Duan, D.T. Neilson, Silicon photonic devices and integrated circuits, *Nanophotonics*, vol. 3, no. 4-5, p. 215, 2014.
4. Vasilevsky P. N., Savelyev M. S., Tolbin A. Y., Ryabkin D. I., Gerasimenko A. Y. Spatial self-phase modulation of light in liquid dispersions based on conjugates of phthalocyanines and carbon nanotubes // *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*, vol. 68, no. 3.1, p. 31-35, 2023.

Генерация яркого излучения с супер-пуассоновской статистикой в одномодовом оптическом волокне

Л. Д. Завалишина, Ю. Хунцунь, А. М. Шелеметьев, А. А. Маркварт, Л. Б. Лиокумович,
Н. А. Ушаков*

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

**e-mail: l.zavalishina9121@mail.ru*

Классическая спектральная интерферометрия имеет широкое применение во многих областях науки и техники, например, в метрологии, дистанционном зондировании и оптической когерентной томографии. Однако, несмотря на универсальность, этот метод имеет ряд недостатков, таких как конечная разрешающая способность, ограниченная длиной волны излучения и отношением сигнал-шум, а также наличие паразитных интерференционных компонент. Частично эти ограничения снимаются с применением методов квантовой оптики [1], а именно бифотонной интерферометрии, однако такие измерительные устройства сложны в реализации и обладают высокой стоимостью. Перспективным подходом для решения данных проблем и повышения точности измерений является использование квантово-вдохновленной интерферометрии, использующей излучение с супер-пуассоновской статистикой [2-4]. Целью данной работы является реализация супер-пуассоновского источника, легко интегрируемого с волоконно-оптическими схемами. Такой источник может быть образован посредством амплитудной модуляции классического лазерного излучения при помощи широкополосного электрооптического модулятора. Стоит отметить, что типовые источники шума имеют нормальное распределение, поэтому необходимо исследовать влияние положения рабочей точки на передаточной характеристике модулятора на статистику выходного излучения. Критерием супер-пуассоновской статистики излучения является наличие пика в корреляционной функции второго порядка, измеряемой путем оценки вероятности совместного детектирования фотонов на выходе интерферометра.

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Излучение с источника поступает на модулятор, амплитуда которого модулируется управляющим сигналом с генератора шума, в качестве которого был использован генератор специальной формы АКИП-3420/2 с рабочей полосой частот 120 МГц. В качестве источника когерентного излучения был использован лазер NP Photonics ROCK. Промодулированный сигнал подавался на вход интерферометра Хенбури Брауна и Твисса (ХБТ) с двумя плечами разной длины. Для регистрации отраженного света в одном плече интерферометра и прошедшего света в другом были использованы однофотонные детекторы (ДОФ) ID Quantique ID Qube и контроллер времени ID900, с помощью которых регистрировалась гистограмма времен прихода фотонов. В случае супер-пуассоновской статистики выходного излучения на гистограмме наблюдается интерференционный пик, максимум которого соответствует количеству одновременных срабатываний ДОФ, а положение – временной задержке между плечами интерферометра. Дополнительно в процессе эксперимента на экране осциллографа наблюдалась форма распределения интенсивности излучения, регистрируемого при помощи фотоприемника Thorlabs PDA10CF-EC, что позволяло контролировать текущее положение рабочей точки. Оцениваемой величиной для каждой гистограммы являлось отношение максимума интерференционного пика, то есть количества одновременных срабатываний, к среднему значению постоянного уровня $\text{max}(H)/\langle H \rangle$. Для корректного определения этих параметров каждая гистограмма была аппроксимирована функцией Гаусса с дополнительным постоянным слагаемым.

За счет изменения положения рабочей точки на передаточной характеристике амплитудного модулятора, имеющей косинусоидальную форму, можно управлять статистикой фотонов, изменение которой влияет на количество одновременных срабатываний и, следовательно, на амплитуду интерференционного пика на гистограмме. Положение рабочей точки в минимуме передаточной характеристики модулятора преобразует исходное

пуассоновское распределение фотонов в супер-пуассоновское, что подтверждается экспоненциальным видом распределения интенсивности. При увеличении напряжения смещения рабочая точка сдвигается в линейную область, где распределение близко к гауссовому и перестает подчиняться супер-пуассоновской статистике, в связи с этим отношение максимума интерференционного пика к значению постоянного уровня снижается, как видно из рис. 2а, на котором представлен график зависимости $\max(H)/\langle H \rangle$ от напряжения смещения при постоянной амплитуде шума равной 3 В. Однако, на форму распределения интенсивности влияет не только положение рабочей точки, но и величина амплитуды шума. Так, если установить напряжение смещения равным 4.4 В, что соответствует середине линейного участка и постепенно увеличивать амплитуду шума, распределение из гауссового преобразуется к двухмодовому виду, при этом увеличивается дисперсия интенсивности, что приводит к большой вероятности совместного детектирования фотонов. Результаты этого эксперимента показаны на рисунке 2б, зависимость на котором подтверждает первоначальное предположение, при амплитуде шума 1.6 В максимум на гистограмме практически исчезает.

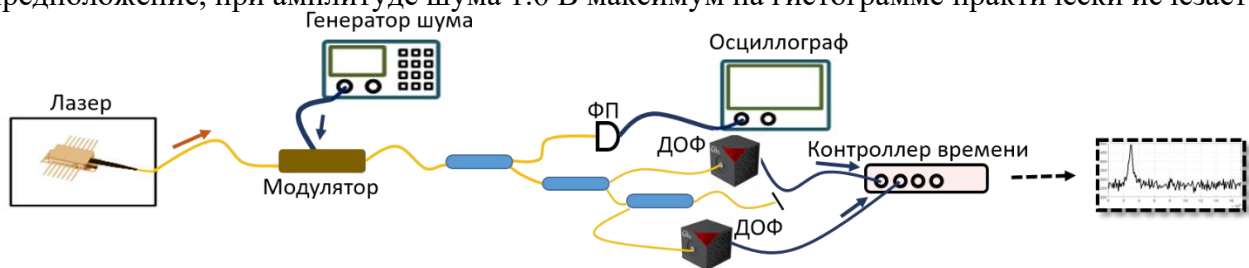


Рис. 1. Экспериментальная установка

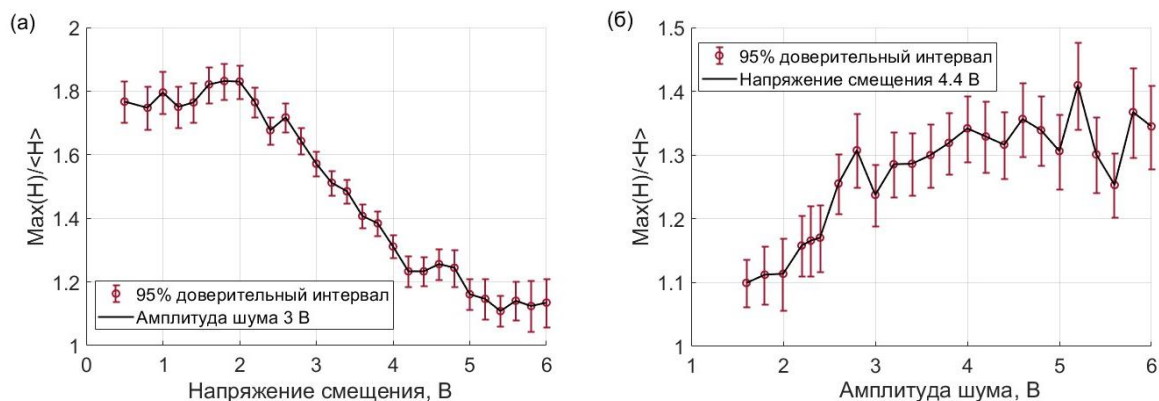


Рис. 2. Графики зависимостей (а) $\max(H)/\langle H \rangle$ от напряжения смещения при амплитуде шума 3 В, (б) $\max(H)/\langle H \rangle$ от амплитуды шума при напряжении смещения 4.4 В

В данной работе получены полезные с практической точки зрения результаты. С одной стороны, ожидаемым является достижение наибольшего контраста интерференции второго порядка при расположении рабочей точки в минимуме передаточной характеристики, однако привлекательным решением может быть использование рабочей точки в середине линейного участка с достаточно большой амплитудой модуляции, что позволит увеличить соотношение сигнал-шум и обеспечит более стабильную работу схемы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095.

Литература

1. Shih, Y., *An Introduction to Quantum Optics: Photon and Biphoton Physics*. Boca Raton: CRC Press, 2011.
2. Treussart, F., Alleaume, R., Le Floch, V., Xiao, L.T., Courty, J.-M. and Roch, J.-F., Direct Measurement of the Photon Statistics of a Triggered Single Photon Source. *Physical Review Letters*, vol. 92, 2018.
3. Xiao, L., Jiang, Y., Zhao, Y., Yin, W., Zhao, J. and Jia, S., Photon statistics measurement by use of single photon detection. *Chinese Science Bulletin*, vol. 49, pp. 875–878, 2004.
4. Arecchi, F.T., Measurement of the Statistical Distribution of Gaussian and Laser Sources. *Physical Review Letters*, vol. 15, pp. 912–916, 1965.

Формирование кристаллических областей на поверхности аморфного Sb_2Te_3 с помощью структурированных лазерных пучков

Я. С. Лебедева^{1*}, И. А. Будаговский², М. П. Смаев², Р. Т. Сибатов³, П. И. Лазаренко¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН)

³НПК «Технологический центр», Москва, Россия

*e-mail: generalova97@gmail.com

Перспективные халькогенидные материалы с фазовым переходом, такие как Sb_2Te_3 , требуют эффективных методов наноструктурирования. Применение различных мод и поляризаций (структурированных пучков) открывает новые возможности для контроля фазовых переходов и способствует равномерной кристаллизации тонких пленок фазопеременных материалов [1].

Тонкие пленки аморфного материала Sb_2Te_3 толщиной 130 нм были получены методом магнетронного распыления на стеклянные подложки. Для исследования порогов кристаллизации и абляции использовали непрерывный лазер с длиной волны 532 нм и линзу с фокусным расстоянием 25 мм. Поляризацию и профиль распределения интенсивности формировали с помощью двойного ромба Френеля, S-конвертера, четвертьволновой пластинки и дихроичного поляризатора, что позволило получать структурированные пучки, представленные на Рис. 1. Лазерную модификацию всех серий облучений проводили в фокальной плоскости линзы при мощностях от 10 до 200 мВт и экспозиции 100 мс.

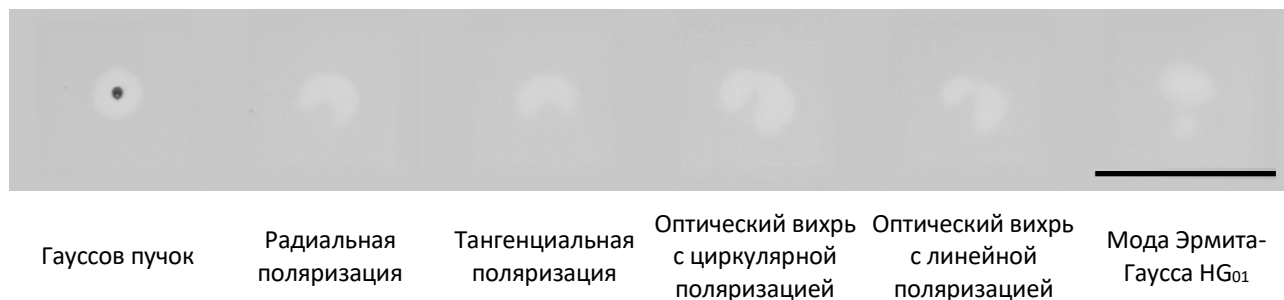


Рис.1. Закристаллизованные области, сформированные при мощности облучения 20 мВт.
Размерная черта соответствует 40 мкм

В результате облучения были сформированы матрицы из закристаллизованных областей с помощью пучков различной структуры. Как видно из Рис. 1, порог абляционного режима для структурированных пучков является более высоким – абляция поверхности пленки наблюдается при большей мощности лазерного излучения, чем при облучении гауссовым пучком (20 мВт). Таким образом, использование структурированных лазерных пучков позволяет увеличить рабочий диапазон мощностей для лазерной кристаллизации Sb_2Te_3 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRМ-2025-0014).

Литература

1. Zhang Xu., Lv J., Xu J., Xie L., Zhang G., Zhang Zh., Li S. and Cheng G. Crystallization behavior of amorphous GST films under an ultrafast laser irradiation. Optics & Laser Technology, vol. 182, 2025.

Применение последовательно соединенных одномодового и многомодового волокон в качестве насыщающегося поглотителя в кольцевом волоконном лазере

М. В. Прибылов^{1*}, Д. А. Коробко¹, В. А. Рибенек¹, П. А. Итрин¹, А. А. Фотиади^{1,2}

¹ *Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск*

² *Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*

**e-mail: hks14865@gmail.com*

Разработка лазерных источников ультракоротких импульсов на протяжении многих лет остается важнейшей задачей лазерной физики и актуальна для применения в широком ряду приложений современной фотоники, в частности, в задачах оптической связи, спектроскопии, метрологии, высокоточной обработки и тд. Одним из источников таких импульсов являются волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод, которая может обеспечиваться специальными нелинейными элементами – насыщающимися поглотителями (НП), изменяющими свое пропускание в зависимости от мощности проходящего излучения. В настоящее время на практике используется большое число НП с различными рабочими механизмами. Одни из них, такие как полупроводниковые зеркала с насыщаемым поглощением (semiconductor saturable-absorber mirror, SESAM) и двумерные слоистые материалы (например, углеродные нанотрубки, графен, топологические изоляторы и черный фосфор) относятся к категории “материальных” НП, нелинейное пропускание которых связано с процессами переизлучения в указанных структурах. Другой тип НП, обычно относящийся к «искусственным» НП, обычно использует нелинейную Керровскую зависимость фазы распространяющегося излучения от его мощности и длины пути в волоконном световоде. К таким механизмам относятся нелинейное вращение поляризации, нелинейное оптическое петлевое зеркало и нелинейное усиливающее петлевое зеркало и тп. Привлекательным свойством НП второго типа является возможность создания лазеров с полностью волоконной архитектурой, исключаяющей объемные элементы резонатора – зеркала, дополнительные волоконные сочленения и тп. В то же время лазеры, реализуемые на основе таких НП (особенно в конфигурации, не сохраняющей поляризацию), очень чувствительны к возмущениям окружающей среды (изгибу или скручиванию волокна, вибрациям, температурным флуктуациям), характеризуются низкой долговременной стабильностью, не всегда обеспечивают самозапуск, зачастую, требуют постоянного внимания оператора. Рассматривая недостатки НП первого типа, стоит отметить то, что как SESAM, так и 2D-материалы требуют для своего изготовления весьма сложных и дорогостоящих процессов, при этом отличаются низким порогом повреждения, сложной упаковкой и ограниченной спектральной полосой применения.

Таким образом, для развития и расширения практических приложений импульсных волоконных лазеров весьма актуальной является разработка цельноволокнистых НП, простых и экономичных в изготовлении, обладающих высоким порогом разрушения и способных обеспечить высокие характеристики выходных импульсов, для чего необходимо демонстрация большой глубины модуляции в сочетании с различной мощностью насыщения.

В данном контексте в последние годы активно исследуются полностью волоконные НП на основе структуры последовательно соединенных одномодового (SMF)-многомодового (MMF)-одномодового волокон, использующие для демонстрации НП механизм нелинейной межмодовой интерференции в MMF с градиентным профилем показателя преломления. Ряд реализаций данного механизма привели к эффективной демонстрации НП с глубиной модуляции ~ 10% и была успешно применена в различных волоконных лазерах с пассивной синхронизацией мод [1, 2]. Полностью волоконные НП этого типа свободны от указанных выше недостатков, т.е. помимо цельноволокнистой структуры, обладают такими неотъемлемыми преимуществами, как высокий порог повреждения, простой процесс

изготовления, долговременная стабильность и широкий спектральный диапазон.

Целью данной работы было создание нового, легко изготавливаемого и интегрируемого НП, обеспечивающего в кольцевом волоконном лазере солитонного типа генерацию импульса минимальной длительности, и таким образом, обладающего максимально широким спектром. Спецификой нашего подхода при этом стала разработка на основе указанного НП солитонного лазера с гармонической синхронизацией мод, способного к генерации стабильной импульсной последовательности с высокой (> 1 ГГц) частотой следования.

В ходе работ нами были изготовлены образцы структур из последовательно соединенных SMF – MMF – SMF волокон, в которых длина MMF отрезка варьировалась от 15 до 40 см с шагом в 5 см. На первом этапе работ для каждого образца были проведены стандартные измерения основных характеристик НП.

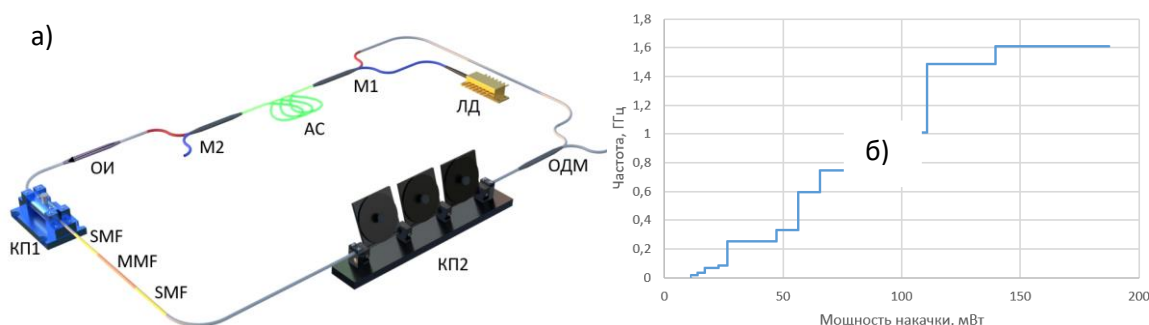


Рисунок 1. (а) Схема волоконного кольцевого лазера; (б) Зависимость частоты следования импульсов от мощности накачки.

Далее каждый образец поочередно встраивался в экспериментальную конфигурацию эрбиевого волоконного кольцевого лазера (Рис. 1(б)). При использовании каждого из образцов удалось достичь стабильной генерации импульсов на фундаментальной частоте. При увеличении мощности накачки наблюдалась гармоническая синхронизация мод с постепенным повышением частоты следования импульсов. Была получена максимальная частота следования 1,6 ГГц с выходной мощностью 4,87 мВт. Зависимость частоты следования импульсов от мощности накачки представлена на рис. 1(в).

Таким образом, в работе продемонстрирован полностью волоконный НП на основе структуры из последовательно соединенных SMF – MMF – SMF волокон, с помощью которой в экспериментальной схеме солитонного волоконного лазера удалось достичь стабильной гармонической синхронизации мод с максимальной частотой следования импульсов 1,6 ГГц.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 23-79-30017).

Литература

1. Yaoyao Qi, et al. Tunable all fiber multi-wavelength mode-locked laser with a large dynamic range using polarization controller coiled SMF-GIMF-SMF structure as both saturable absorber and comb filter // *Optical Fiber Technology*. – 2022. – Vol. 74, – P. 103055.
2. Teng Wang, Yongmin et al. All-fiber saturable absorber based on nonlinear multimode interference with enhanced modulation depth // *Applied Optics*. – 2021. Vol. 60, № 29. – P.9007-9011.
3. Sudin, A., Volkov, I., Ushakov, S. et al. Enhancing high-order harmonic mode-locking in Er/Yb-Doped fiber lasers with sub-MHz fundamental frequency via optoacoustic resonance // *Optical Fiber Technology*. – 2024. – Vol. 88. –P.104028.
4. Korobko, D. A., Ribenek, V. A., & Fotiadi, A. A. Gain depletion and recovery as a key mechanism of Long-Range pulse interactions in soliton fiber laser // *Journal of Lightwave Technology*. – 2024. – Vol. 42, №17. – P. 6049.

Гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере с сохранением поляризации на основе нелинейного усиливающего петлевого зеркала

В. А. Рибенек¹, Д. А. Коробко¹, П. А. Итрин¹, Г. В. Тертышников^{1}, А. А. Фотиади^{1,2}*

¹Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

*e-mail: tertyshnikovag@mail.ru

В настоящее время широко распространены волоконные лазеры, легированные эрбием, работающие в телекоммуникационном диапазоне длин волн ~ 1.55 мкм. Благодаря возможности получить высокочастотные последовательности сверхкоротких солитонных импульсов с помощью гармонической синхронизации мод (ГСМ), дешевизне и доступности волоконных компонентов, подобные лазерные источники нашли применение в спектроскопии, микроволновой фотонике, метрологии, системах телекоммуникации и т. д. [1]. Существуют различные методы ГСМ, например, нелинейное вращение плоскости поляризации (НВП), использование полупроводниковых насыщающихся поглотителей, нелинейных оптических петлевых зеркал (НОПЗ) или нелинейных усиливающих петлевых зеркал (НУПЗ). Перспективным является осуществление ГСМ в схеме с сохранением поляризации на основе НУПЗ, позволяющей исключить влияние внешних факторов на работу лазера, а также не требующей использования дополнительных не волоконных элементов.

Для проведения исследования был собран волоконный лазер (Рис.1), состоящий из резонатора (левый контур), представляющего собой однонаправленный кольцевой волоконный генератор, и нелинейного петлевого усиливающего зеркала (правый контур), соединенных между собой переменным каплером. Накачка осуществляется лазерными диодами с максимальной мощностью 900 мВт и с длиной волны излучения 980 нм. Мощность накачки в НУПЗ установлена на уровне 200 мВт и поддерживается постоянной на протяжении всех экспериментов. При создании схемы использовалось волокно с сохранением поляризации. Общая длина резонатора составляет ~ 77 м, что соответствует фундаментальной частоте $f_0 = 2.6$ МГц.

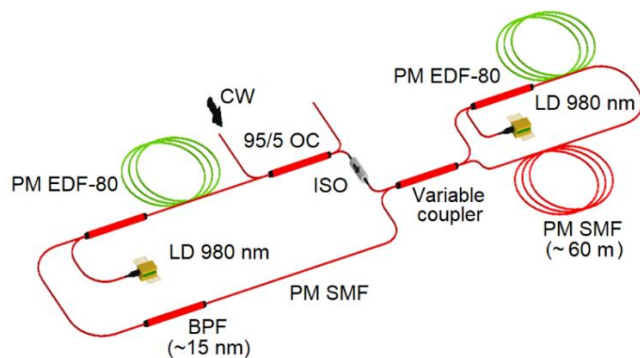


Рис.1. Экспериментальная установка волоконного лазера в форме восьмерки на основе НУПЗ. EDF - волокно, легированное эрбием; LD - лазерный диод накачки; PM SMF — одномодовое волокно, сохраняющее поляризацию; ISO - оптоволоконный изолятор; OC - оптический ответвитель; BPF — полосовой фильтр. Стрелка указывает способ внешней инъекции непрерывного излучения.

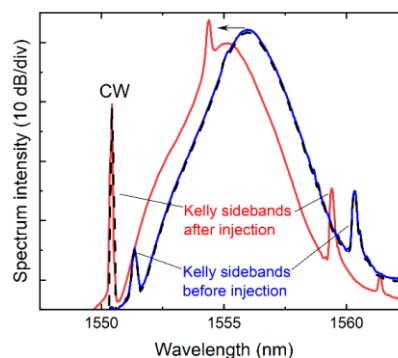


Рис.2. Изменение оптического спектра лазера для ЧСИ 228 МГц вследствие внешней непрерывной инъекции. Оптический спектр до инъекции показан синей линией, оптический спектр в начале процесса непрерывной инъекции – черная линия, оптический спектр в конечном состоянии – красная линия.

При мощности накачки в однонаправленном кольце ~ 80 мВт лазер начинает работать в импульсном режиме на основной частоте, дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к переходу в многоимпульсный режим работы. Максимальная частота следования импульсов (ЧСИ) достигла 630 МГц, она соответствует 242-ой гармонике и запускается при мощности накачки ~ 600 мВт.

Также были проведены исследования воздействия непрерывного узкополосного оптического излучения на работу лазера [2]. Непрерывное излучение лазера Santec TSL с шириной линии ~ 100 кГц, перестраиваемое в диапазоне 1480–1630 нм, вводится в волоконный резонатор через выходной ответвитель (Рис.1). Необходимым условием снижения уровня шума и повышения стабильности работы лазера является близость длины волны инжектируемого излучения с боковой полосой Келли оптического солитонного спектра (Рис.2). Под воздействием непрерывного излучения, мощность которого на протяжении всего эксперимента составляет 0.5 мВт, центральная длина волны излучения смещается, а уровень подавления супермод (SSL) возрастает (Рис.3). По РЧ-спектрам лазера, работающего в ГСМ-режиме, можно оценить уровень подавления супермод, для данной конфигурации. Для ЧСИ 630 МГц, значения SSL составляют 23 дБ до инжекции и 39 дБ – после. Уменьшение уровня шума свидетельствует о повышении устойчивости импульсной последовательности лазера с гармонической синхронизацией мод.

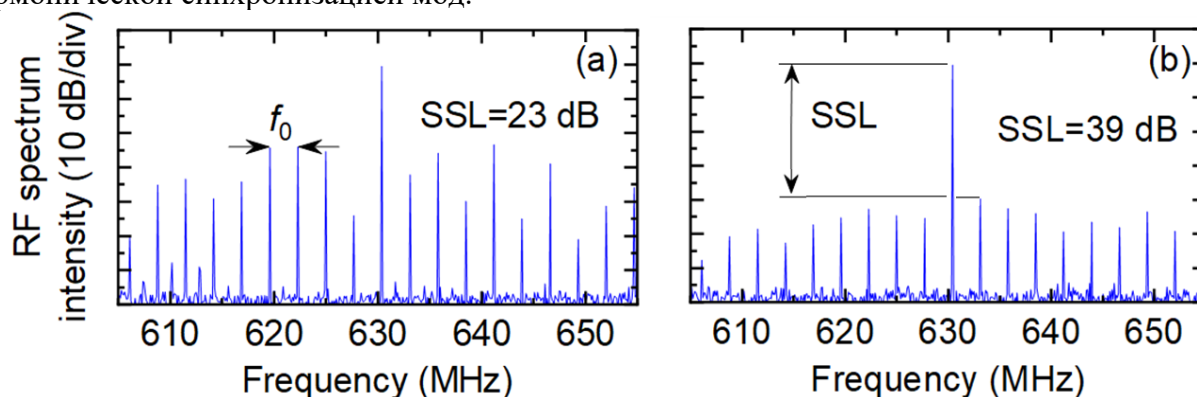


Рис.3. РЧ-спектры лазера, зарегистрированные с разрешением 100 кГц для ЧСИ ~ 630 МГц (242-я гармоника резонатора). (а) до взаимодействия с непрерывным излучением, (б) – после SSL уровни подавления супермод.

Таким образом, в волоконном лазере на основе НУПЗ был продемонстрирован режим гармонической синхронизации мод и достигнута ЧСИ 630 МГц, при этом импульсная последовательность отличается устойчивостью к возмущениям окружающей среды. Также был успешно применен метод повышения стабильности работы лазера с помощью инжекции внешнего постоянного узкополосного излучения в резонатор, что позволило значительно снизить уровень супермодового шума. Эта новая конструкция лазера обеспечивает надежную работу лазера в ГСМ-режиме без необходимости регулировки для высокочастотной работы с исключительной стабильностью, отвечая требованиям точности и надежности, необходимым для современных приложений.

Работа поддержана Минобрнауки РФ (проект FEUF-2023-0003).

Литература

1. Martinez, A., Yamashita, S. Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes. *Optics Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6155-6163, 2011.
2. Korobko, D.A., Ribenek, V.A., Stoliarov, D.A., Mégret, P. and Fotiadi, A.A. Resonantly induced mitigation of supermode noise in a harmonically mode-locked fiber laser: revealing the underlying mechanisms. *Optics Express*, vol. 30, no. 10, pp. 17243-17258, 2022.

Оптимизация положения SESAM в кольцевом солитонном лазере на основе РМ волокон

В. А. Рибенек^{1*}, Д. А. Коробко¹, Г. В. Тертышникова¹, А. А. Фотиади^{1,2}

¹ Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

*e-mail: ribl98@mail.ru

Современные волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод на основе насыщаемых поглотителей (SESAM - Semiconductor saturable-absorber mirrors) занимают важное место в спектроскопии, телекоммуникациях и микроволновой фотонике благодаря своей компактности, низкому уровню шума и широкой полосе усиления. Особый интерес представляют солитонные лазеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR, 1,4-3 мкм) на основе волокон, легированных эрбием (Er) или тулием (Tm), которые демонстрируют отличные характеристики для генерации ультракоротких импульсов [1,2]. Однако такие системы сталкиваются с фундаментальным ограничением — при увеличении мощности накачки они проявляют склонность к переходу в многоимпульсный режим, что существенно снижает качество генерируемого излучения. Проведенное нами исследование сочетает методы численного моделирования с экспериментом для решения этой проблемы путем оптимизации положения SESAM в полностью РМ волоконном лазере.

Моделирование, основанное на нелинейном уравнении Шрёдингера, учитывало все ключевые параметры системы, включая дисперсионные характеристики волокна с коэффициентами β_2 от -0,018 до 0,03 ps²/м, нелинейные эффекты с $\gamma=0,002$ Вт⁻¹м⁻¹, а также динамику насыщаемого поглотителя с временем релаксации 2 пс. Результаты показали (Рис.1), что расположение SESAM вблизи выходного ответвителя (на расстоянии 8,5 м от EDF) позволяет достичь значительно лучших характеристик по сравнению с традиционной конфигурацией. В оптимальном положении система демонстрировала сохранение одноимпульсного режима до мощности накачки 215 мВт, увеличение энергии импульса на 50%, существенное расширение оптического спектра и уменьшение длительности импульса более чем в два раза. При этом наблюдался интересный эффект возврата к одноимпульсной генерации после первоначального перехода в многоимпульсное состояние. Физический механизм этих улучшений связан с эффективным подавлением фонового континуума и усиленным нелинейным сжатием импульса благодаря оптимальному расположению элементов резонатора.

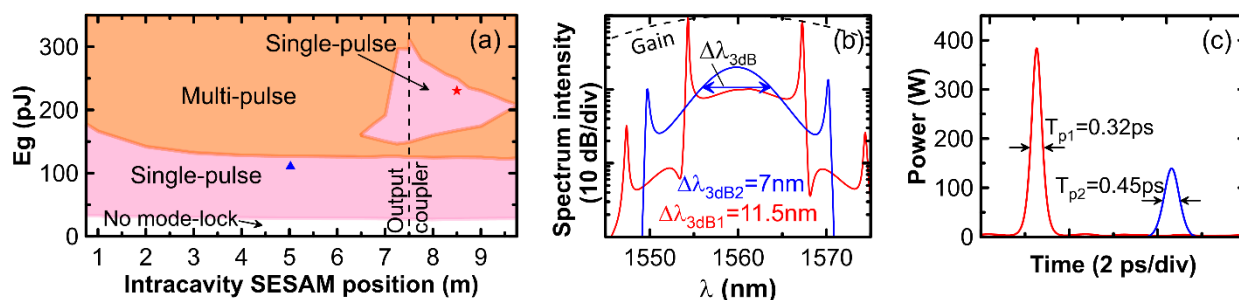


Рис.1. Режимы работы лазера в зависимости от положения SESAM и энергии E_g насыщения для случая неравномерного распределения дисперсии. (b) Оптические спектры и (c) формы импульсов, соответствующие состояниям лазера, отмеченным в (a): красный (звездочка) и синий (треугольник).

Данные результаты также были подтверждены в эксперименте. Экспериментальная установка (Рис.2.) представляла собой кольцевой резонатор длиной 11 м (частота повторения

18,9 МГц) на основе РМ-волокна с регулируемым положением SESAM. Были исследованы две принципиальные конфигурации: в первой (Конфигурация А) SESAM располагался ближе к середине резонатора (на расстоянии 5 м от EDF), во второй (Конфигурация В) — вблизи выходного ответвителя (8,5 м от EDF). Обе системы использовали циркулятор для подключения SESAM с глубиной модуляции 15% и ненасыщаемыми потерями 30%.

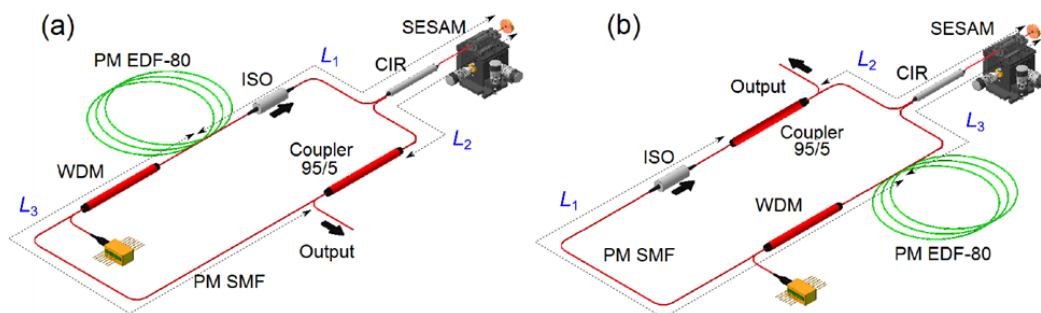


Рис. 2. Экспериментальная установка. (а) Конфигурация А. (б) Конфигурация В.

Конфигурация В продемонстрировала исключительную стабильность работы, сохраняя одноимпульсный режим генерации вплоть до мощности накачки 215 мВт, что существенно превышает показатель в 140 мВт, характерный для Конфигурации А (Рис.3). В оптимальных условиях работы удалось достичь увеличения энергии импульса на впечатляющие 50%, что соответствует выходной мощности 0,38 мВт, сопровождающегося существенным расширением оптического спектра с четко выраженными боковыми полосами Келли и уменьшением длительности импульса более чем в два раза по сравнению с традиционной конфигурацией.

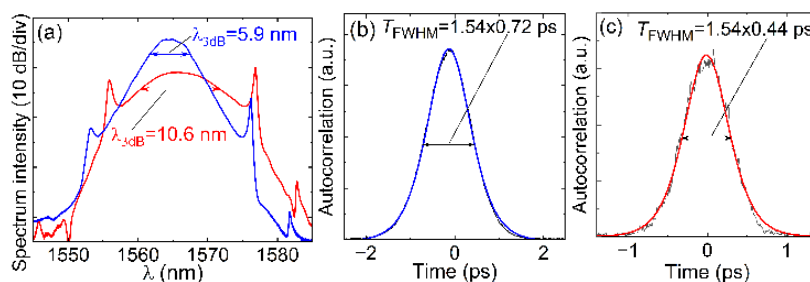


Рис. 3. (а) оптические спектры и (b, c) автокорреляционные функции лазера, соответствующие наилучшей одноимпульсной характеристике для двух экспериментальных конфигураций: “А” (синяя) и “В” (красная).

Полученные результаты существенно расширяют возможности проектирования высокопроизводительных волоконных лазеров и открывают новые перспективы для их применения в передовых технологических решениях. Особенно важно, что предлагаемый метод оптимизации не требует значительных затрат и может быть легко реализован в существующих лазерных системах.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 23-79-30017, проект №25-19-00821).

Литература

1. Hudson D. D. Short pulse generation in mid-IR fiber lasers // Optical Fiber Technology. – 2014. – Vol. 20, № 6. – P. 631-641.
2. Korobko D., Ribenek V., Itrin P., Fotiadi A. Flat-topped optical spectrum as a specific marker of multi-pulse grouping in soliton fiber laser // Optics Letters. – 2024. – Vol. 49, № 17. – P. 4983.

Зависимость характеристик эпитаксиальных р-і-п диодов от параметров высокотемпературных обработок

М. А. Сауров^{1}, Р. М. Рязанов¹*

¹НПК «Технологический центр», Зеленоград, Россия

*e-mail: michael15-52@mail.ru

Эпитаксиальные р-і-п диоды являются одними из ключевых компонентов современной силовой и высокочастотной электроники. Благодаря наличию собственной (і) области большой толщины, данные приборы способны выдерживать высокие обратные напряжения, обеспечивая при этом малое прямое падение напряжения и высокое быстродействие. Широкое применение они находят в преобразователях энергии, системах управления питанием, а также в качестве коммутационных элементов и фотодетекторов. Качество и воспроизводимость характеристик таких приборов напрямую определяются совершенством используемой технологии их изготовления, где эпитаксиальный рост слоев играет основополагающую роль. Одним из неотъемлемых и критически важных этапов в технологическом маршруте создания полупроводниковых приборов, включая р-і-п диоды, являются такие процессы, как отжиг после ионной имплантации для активации примесей, формирование омических контактов или диффузионное создание р-п переходов, требуют нагрева структуры до высоких температур. Проведение процессов высокотемпературной обработки приводит к перераспределению легирующих примесей, генерации или отжигу структурных дефектов, а также к изменению времени жизни неосновных носителей заряда, особенно в высокоомной і-области, которая наиболее чувствительна к любым изменениям. Эти изменения, в свою очередь, напрямую влияют на конечные электрофизические характеристики диодов: вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, величину токов утечки, напряжение пробоя и время обратного восстановления. В связи с этим, установление четких корреляций между параметрами высокотемпературных обработок (температурой, временем, средой отжига) и характеристиками р-і-п диодов представляет собой актуальную научную и практическую задачу, решение которой необходимо для оптимизации технологических процессов и создания приборов с заданными свойствами [1-3]. Целью настоящей работы являлось исследование зависимости ключевых электрофизических характеристик эпитаксиальных р-і-п диодов от температуры и длительности высокотемпературных обработок, проводимых на этапах их изготовления. В рамках исследования проведен анализ влияния режимов отжига на прямые и обратные вольт-амперные характеристики для определения оптимальных технологических параметров, обеспечивающих наилучшее сочетание статических и динамических свойств приборов.

Была изготовлена партия эпитаксиальных кремниевых р-і-п диодов с размером кристаллов 9х9 мм. В центре кристалла находится область перехода, а на краях расположена металлизация с контактными площадками. р⁺ область формировалась с помощью ионной имплантации бора с энергией 30кВ и дозой 700 мкКл/см². Активация примеси осуществлялась с помощью отжигов, параметры которых варьировались для различных пластин по температурам от 850 до 950 °С и от 30 до 60 минут по длительности. В качестве пассивации использовался термический оксид кремния толщиной 50 нм, получаемый двумя различными стандартными процессами, различающимися температурой, составом газовой смеси и длительностью.

Металлизация формировалась из Al-Si толщиной 0.5 мкм. Для улучшения контакта между кремниевой подложкой и алюминием производился отжиг при температуре 420°С длительностью 30 мин. Изображение пластины с готовыми кремниевыми ріп диодами представлено на Рис. 1.



Рис. 1. Пластина с изготовленными p-i-n диодами.

Разрез диода с обозначенными основными слоями схематично представлен на Рис. 2.

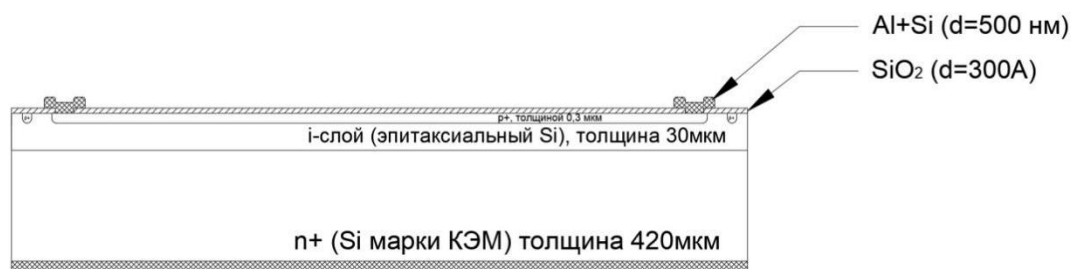


Рис. 2. Разрез кремниевого pin диода

Глубина p-n перехода измерялась методом шар-шлифа. Электрофизические характеристики полученных образцов измерялись на измерителе полупроводниковых приборов Agilent B1500 на экранированной зондовой станции. Исследования показали значительное влияние комбинаций обработок, проводимых на пластинах, на толщину p⁺ слоя, проводимость, утечки и пробивные напряжения диодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRМ-2025-0014).

Литература

1. G. Kissinger, J. Dabrowski, T. Sinno, Y. Yang, D. Kot, A. Sattler, Ab initio calculations and rate equation simulations for vacancy and vacancy-oxygen clustering in silicon. Journal of Crystal Growth, vol. 468, pp. 424-432, 2017.
2. A Hossion, S. S. Khatavkar, B. M. Arora, Fabrication of NIP diode using hot wire chemical vapor deposition technique, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Volume 23, 2021.
3. G. Cesare, A. Nascetti, D. Caputo, Amorphous Silicon p-i-n Structure Acting as Light and Temperature Sensor, Sensors, vol. 15, pp. 12260-12272, 2015.

Индукцированная лазерным излучением аморфизация в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для формирования устройств фотоники

***П. А. Смирнов^{1,2*}, Т. С. Кункель³, А. В. Ромашкин¹, Ю. В. Воробьев³,
М. П. Смаев^{1,4}, Р. М. Рязанов⁵, П. И. Лазаренко¹***

¹Национальный исследовательский университет “МИЭТ”, Зеленоград, Москва, Россия

²ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Зеленоград, Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», Рязань, Россия

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

⁵Научно-производственный комплекс «Технологический центр», Зеленоград, Москва, Россия

*e-mail: petr-smirnov-00@yandex.ru

Соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) активно исследуется для создания устройств фотоники для передачи, записи и хранения информации благодаря возможности циклического переключения между кристаллической и аморфной фазами в результате лазерного воздействия, которое сопровождается существенным изменением оптических и структурных свойств. Лазерная аморфизация тонких пленок GST225 ультракороткими импульсами является малоизученным процессом в отличие от процесса кристаллизации, однако именно аморфизация будет определять энергопотребление фотонного устройства. В данной работе исследовалась возможность аморфизации тонких пленок GST225 воздействия ультракороткими одиночными лазерными импульсами.

Образцы аморфных пленок были сформированы на стеклянных подложках с помощью магнетронного распыления и отжигались при температуре 200 °С в течение 15 минут для получения кристаллического состояния. Облучение образцов проводилось лазерным источником с длиной волны 1030 нм в одноимпульсном режиме с длительностью воздействия 233 фс. Фазовое превращение модифицированных областей контролировалось методом спектроскопии комбинационного рассеяния света, а морфология с помощью атомно-силовой микроскопии.

По полученным экспериментальным данным была подтверждена возможность аморфизации закристаллизованных пленок GST225 с помощью одиночного импульса фс-длительности. Определена пороговая энергия лазерной аморфизации тонких пленок GST225 лазерным источником с ультракороткими импульсами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRМ-2025-0014).

Шумоподобные импульсы с бифуркацией удвоения периода в эрбиевом кольцевом волоконном лазере

А. В. Судьин^{1*}, И. А. Волков^{1,2}, С. Н. Ушаков^{1,3}, К. Н. Нищев¹

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск

²Ульяновский государственный университет, Ульяновск

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

*e-mail: alexander.sudin1999@yandex.com

Благодаря широкому оптическому спектру и короткой длине когерентности, лазерные источники шумоподобных импульсов привлекательны в спектроскопии, метрологии и генерации суперконтинуума. Известно, что в волоконных лазерах могут наблюдаться бифуркации, пульсации и хаос [1]. Их появление зависит от параметров резонатора и условий накачки активной среды, причем в некоторых системах можно наблюдать переходы из одного состояния в другое при изменении какого-либо параметра [2]. Исследования нелинейной динамики волоконных лазеров актуальны для разработки стабильных коммерческих лазерных систем.

Схема волоконного лазера шумоподобных импульсов изображена на Рис. 1. Лазер представляет собой однонаправленное кольцо, в котором самосинхронизация мод реализуется через механизм нелинейной эволюции поляризации. Регулируя мощность накачки и ориентацию пластин контроллеров поляризации, можно получать различные режимы генерации. Длина резонатора 321 м, а его чистая дисперсия -7.2 пс^2 . Фундаментальная частота следования импульсов 635,7 кГц (f_0).

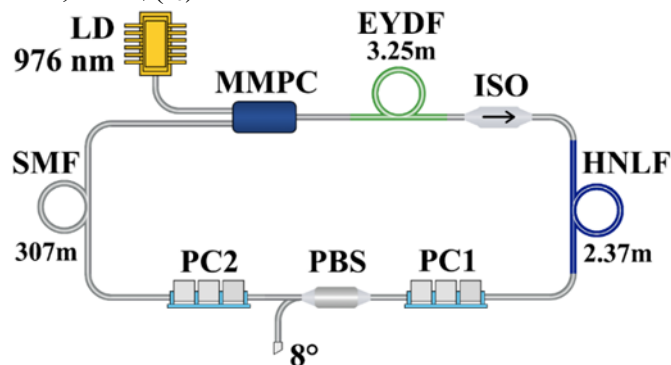


Рис. 1. Схема волоконного лазера: EYDF – активное оптическое волокно с двойной оболочкой, легированное ионами Er^{3+} и Yb^{3+} ; HNLF – высоконелинейное волокно; ISO – волоконно-оптический изолятор; LD – многомодовый диод накачки; MMPC – объединитель накачки и сигнала; PC1&PC2 – контроллеры поляризации; PBS – делитель поляризации; SMF – пассивное одномодовое волокно.

Режим генерации шумоподобных импульсов получали при мощности накачки 1.1 Вт. Его спектральные и временные характеристики показаны на Рис. 2. Оптический спектр имел гладкую форму и полную ширину 37 нм на уровне -3 дБ. При этом оптический спектр испытывал сильное уширение за счет совместного действия нелинейных эффектов. На вставке Рис. 2а изображена автокорреляционная функция когерентного пика шумоподобного импульса. Его длительность при аппроксимации импульсом с формой sech^2 оценивается в 27 фс. Диапазон сканирования автокоррелятора не позволял зарегистрировать пьедестал шумоподобного импульса. На осциллограмме на Рис. 2б наблюдается последовательность пачек импульсов. Видно, что амплитуда пачек импульсов меняется с периодом, равным двум обходам резонатора. В литературе это явление известно как бифуркация удвоения периода [3]. При сравнении шумоподобных импульсов на разных обходах резонатора было обнаружено, что амплитуда и ширина импульсов на нечетных и четных обходах резонатора различаются (Рис. 2в). Ширина пачек импульсов составляла 10.3 и 7.4 нс для нечетных и четных обходов резонатора, соответственно. Бифуркация удвоения периода дополнительно подтверждается

радиочастотным спектром (Рис. 2д), на котором появилась частота равная половине от фундаментальной (f_2).

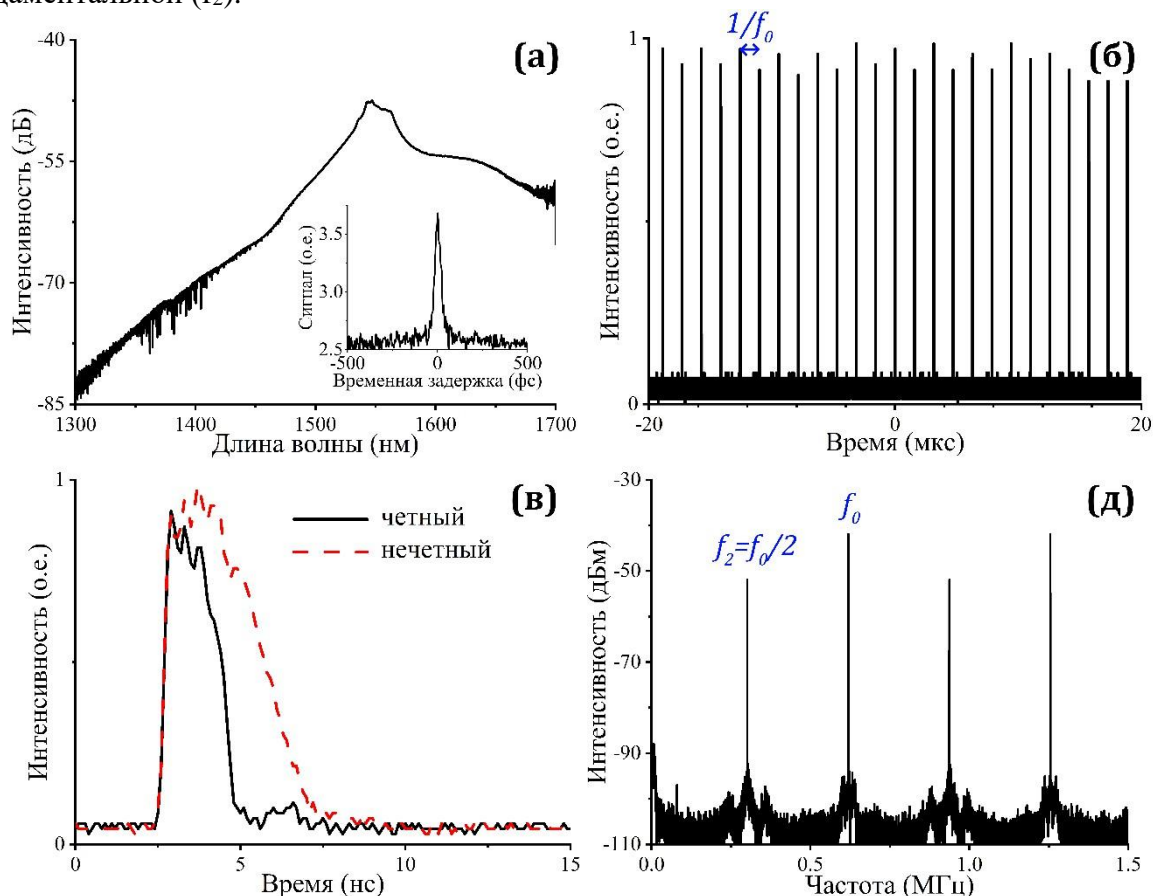


Рис. 2. (а) Оптический спектр (вставка: автокорреляционная функция когерентного пика). (б) Осциллограмма в диапазоне 40 мкс. (в) Осциллограмма в диапазоне 15 нс. Сплошной линией изображены импульсы для четных обходов резонатора, а штриховой – для нечетных. (д) Радиочастотный спектр.

Экспериментально продемонстрирована генерация шумоподобных импульсов с бифуркацией удвоения периода в эрбиевом кольцевом волоконном лазере с длиной резонатора более 300 м. Результаты работы могут быть полезны для общего понимания нелинейной динамики волоконных лазеров.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00821).

Литература

1. Akhmediev, N., Soto-Crespo, J.M. and Town, G., Pulsating solitons, chaotic solitons, period doubling, and pulse coexistence in mode-locked lasers: Complex Ginzburg-Landau equation approach. *Physical Review E*, vol. 63, pp. 056602-1 – 056602-13, 2001.
2. Zhang, X., Zou, D., Liu, R., Lv, J., Hu, M., Shum, P.P. and Song, Y., From breather solitons to chaos in an ultrafast laser: The scenario of cascading short and long-period pulsations. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 182, pp. 114841-1 – 114841-8, 2024.
3. Wang, Z., Coillet, A., Hamdi, S., Zhang, Z., and Grelu, P., Spectral Pulsations of Dissipative Solitons in Ultrafast Fiber Lasers: Period Doubling and Beyond. *Laser & Photonics Reviews*, vol. 17, pp. 2200298-1 – 2200298-14, 2023.

Термоциклические исследования изменения оптических и электрофизических свойств аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

М. Е. Федянина^{1,2*}, Е. П. Кицюк², Р. М. Рязанов²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград, Россия

²НПК «Технологический центр», г. Зеленоград, Россия

*e-mail: mahamaha1996@gmail.com

Халькогенидные тонкие пленки системы Ge-Sb-Te, в частности пленки соединения $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), под действием лазерного импульса, электрического тока или температурного воздействия способны обратимо изменять фазовое состояние между аморфным и кристаллическим состояниями. В процессе изменения фазового состояния материала возникает существенный контраст оптических, электрических и структурных свойств [1]. Благодаря скачкообразному изменению оптических и электрических параметров формируемых халькогенидных пленок между состояниями были предложены идеи по формированию ячеек памяти с промежуточными фазовыми состояниями. Однако стоит учитывать, что на работу подобных устройств будет оказывать влияние стабильность как получаемых промежуточных состояний, их повторяемость, но и свойства исходных аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, поскольку данное состояние материала является метастабильным. В научно-технической литературе наблюдались результаты наличия изменений характеристик тонких пленок в процессе длительной выдержки в исходном аморфном состоянии при комнатной температуре. При этом изменение свойств для аморфных пленок может усиливаться при воздействии низкотемпературного нагрева существенно ниже температуры фазового перехода (150-180 °C) [2]. В связи с этим целью данной работы было определить изменения оптических и электрических свойств аморфных тонких пленок GST225 в процессе многократного термоциклирования между комнатной температурой и 100 °C.

Тонкие пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ были сформированы методом магнетронного распыления поликристаллической мишени на установке МАГНА-01. Давление аргона во время напыления составляло $5,6 \cdot 10^{-1}$ Па, мощность, подаваемая на мишень, равнялась 25 Вт. Анализ изменения свойств исходных аморфных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ проводился методом одновременного измерения температурных зависимостей удельного сопротивления и эллипсометрии в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм. Температурный профиль эксперимента, а также измерение температурной зависимости удельного сопротивления в *in situ* режиме был выполнен с применением температурного нагревательного элемента Linkam HFS600E-PB4. Нагрев образцов осуществлялся от комнатной температуры до 100 °C, количество выполненных циклов нагрева/охлаждения составляло 8. Для анализа изменения оптических свойств в процессе термоциклирования был использован эллипсометр Эллипс-1881А, моделирование значений показателя преломления (*n*) и коэффициента экстинкции (*k*) выполнено с применением четырехслойной модели образца и математической модели Форохи-Блумера. Оценка изменения оптической ширины запрещенной зоны выполнена с применением модели Тауца.

В процессе температурного нагрева от комнатной температуры до 100 °C в первом цикле измерений удельное сопротивление (*ρ*) тонкой пленки GST225 начинает падать, что соответствует поведению полупроводниковых материалов при термическом нагреве, при этом значения падают почти на порядок. Возврат к начальной температуре приводит к увеличению значений, при этом *ρ* при 40 °C после цикла оказывается выше, чем удельное сопротивление исходной пленки. Наибольшие различия в значениях *ρ* при 40 °C между участками нагрева и охлаждения образца наблюдаются в первом цикле эксперимента. В последующих циклах удельное сопротивление после отжига также оказывается выше, однако разница в значениях *ρ* при 40 °C становится меньше, пока не выходит на постоянное значение. Для оценки изменения электрофизических характеристик были рассчитаны значения энергии активации

проводимости (E_a). На участках нагрева значения E_a увеличиваются, выходя на стабильное значение на 6 цикле, на участке охлаждения значения E_a уменьшаются, при этом разница в значениях существенно меньше и выход на стабильное значение наблюдается раньше, на 4 цикле.

По аналогии с температурными зависимостями удельного сопротивления была проведена оценка изменения оптических свойств тонкой пленки GST225 по температурным зависимостям показателя преломления и коэффициента экстинкции. Построение температурных зависимостей $n(T)$ и $k(T)$ было выполнено на длине волны 650 нм. В процессе нагрева от комнатной температуры до 100 °C наблюдается уменьшение значений n , а также увеличение значений k . Охлаждение приводит к обратимому поведению зависимостей, при этом значения показателя преломления и коэффициента экстинкции при всех измеренных температурах между 40 и 100 °C на участке охлаждения оказываются выше. С каждым последующим циклом значения n незначительно увеличиваются, при этом значения k также увеличиваются, однако изменения более существенны. В связи с этим по значениям коэффициента экстинкции была проведена оценка измерения оптической ширины запрещенной зоны ($E_g^{\text{опт}}$). Установлено, что в процессе нагрева до 100 °C значения $E_g^{\text{опт}}$ падают на ~0,03 эВ. Термоциклирование образца приводит к изменению значений оптической ширины запрещенной зоны при 40 °C на ~0,03 эВ, при этом скорость изменения значений $E_g^{\text{опт}}$ также падает с каждым последующим циклом нагрева/охлаждения с выходом на стабильное значение в 7 цикле.

Таким образом, в работе было продемонстрировано влияние термоциклирования в диапазоне температур от 40 до 100 °C на электрофизические и оптические свойства аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, которые приводят к необратимым изменениям. Было выявлено, что наибольшие изменения свойств наблюдаются при 1 цикле нагрева/охлаждения с выходом на стабильные значения после 6-7 циклов. Данный результат свидетельствует о необратимом изменении свойств аморфных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, что является важным этапом оценки стабильности работы устройств на халькогенидных тонких пленках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRM-2025-0014). Тонкие пленки GST225 были сформированы в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).

Литература

1. Redaelli An., Phase change memory. Device physics, reliability and applications. New York: Springer, 342 p, 2018.
2. Rutten M., Kaes M., Albert A., Wuttig M., Salanga M., Relation between bandgap and resistance drift in amorphous phase change materials. Scientific Reports, vol. 5, pp. 17362, 2015.

Наблюдение длиннопериодических пульсаций в Yb волоконном лазере, работающим в режиме генерации диссипативных солитонов

Н.А. Юдин^{1*}, И. А. Волков¹, А.В. Судьин¹, С.Н. Ушаков^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

*e-mail: udinnikita642@gmail.com

Современные технологии волоконной оптики и лазерной физики критически важны для прогресса в таких областях, как телекоммуникации, медицина, спектроскопия и обработка материалов. Здесь особое место занимают иттербиевые волоконные лазеры, которые ценятся за высокую эффективность, компактность, надежность и широкий диапазон длин волн. Дальнейшее развитие этих технологий вызывает потребность в изучении динамики работы импульсных лазеров, что необходимо для понимания физических основ формирования импульсов. К одному из центральных явлений в этой области относятся длиннопериодические пульсации [1, 2]. В настоящей работе сообщается о генерации таких длиннопериодических пульсаций и достижении режима диссипативных солитонов в Yb волоконном лазере.

Схема экспериментальной установки представлена на Рис.1. В качестве источника накачки использовался п/п лазерный диод с длиной волны излучения 976 нм и мощностью до 1 Вт. Резонатор волоконного лазера представляет кольцевую архитектуру, состоящую из мультиплексора (WDM) 976/1064, активного Yb волокна с квадратным сечением и поглощением на длине волны 976 нм – 1,3 дБ/мм, волоконного изолятора (iso), двух контроллеров поляризации (PC1,2) и делителя поляризации (PBS). Синхронизация мод достигается за счет регулировки параметров мощности накачки и положения контроллеров поляризации.

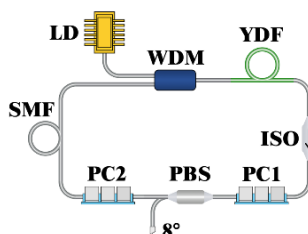


Рис.1. Схема волоконного иттербиевого лазера с кольцевым резонатором

При обеспечении мощности накачки 350 мВт и длине активного волокна в резонаторе 17 см был достигнут импульсный режим, характеристики которого представлены на Рис 2 (а-в). В осциллограмме (Рис.2, а) данного режима наблюдается изменение амплитуды с периодом 14 мкс. При этом в РЧ-спектре (Рис.2, б) наблюдаются симметрично расположенные боковые пики на расстоянии 71 кГц от центрального пика, что хорошо сходится с периодом в осциллограмме. Такая структура характерна для длиннопериодических пульсаций. Основной пик на РЧ-спектре находится на 12,51 МГц, что согласуется с периодом обхода резонатора 80 нс и указывает на достижение пассивной синхронизации мод. При этом соотношение сигнал/шум (SNR) ~ 70 дБ. Оптический спектр (Рис. 2, в) с шириной 8,6 нм на уровне -3дБ имеет характерную для диссипативных солитонов структуру: форма близка к прямоугольной с резкими краями [3]. При увеличении мощности накачки до 400 мВт произошло увеличение периода пульсаций до 37 мкс (Рис. 2, г). На РЧ-спектре (Рис.2, д) относительно центрального пика с частотой 12,51 МГц симметрично расположены 2 порядка равноудаленных симметричных пиков на расстоянии 26 кГц, соответствующих периоду пульсаций. Соотношение сигнал/шум (SNR) составило ~ 70 дБ. В форме оптического спектра не

наблюдалось значительных изменений: ширина составила 8,6 нм, центральная длина волны – 1036 нм. При последующем увеличении мощности накачки не удалось достигнуть устойчивого импульсного режима генерации.

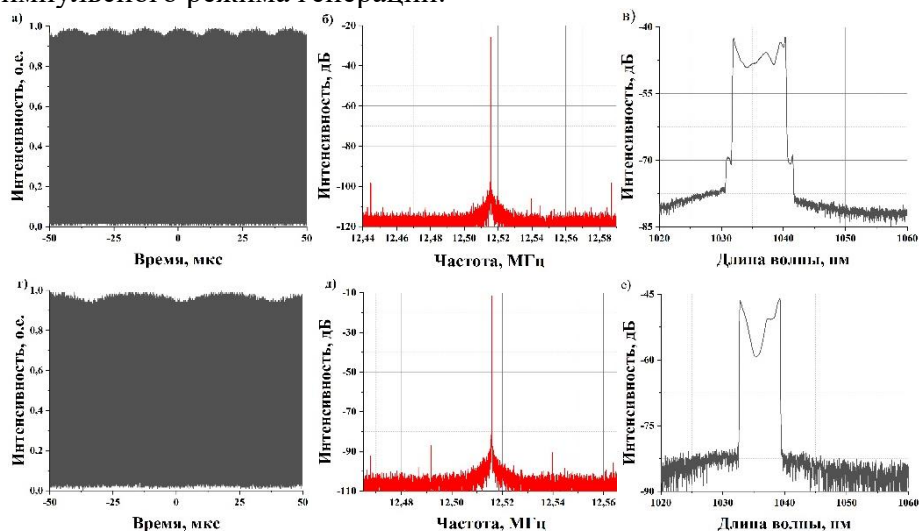


Рис.2. Спектральные и временные характеристики волоконного иттербиевого лазера с длиной активного волокна 17 см. (а – осциллограмма б – РЧ спектр, в – оптический спектр при мощности накачки 350 мВт, г – осциллограмма д – РЧ спектр, е – оптический спектр при мощности накачки 400 мВт)

Для получения импульсной генерации без длиннопериодических пульсаций была уменьшена длина активного оптического волокна до 15 см. При мощности накачки 320 мВт был получен импульсный режим генерации, спектрально-временные характеристики которого представлены на Рис.3. В осциллограмме импульса (Рис.3, а) отсутствует явно выраженная модуляция амплитуды, характерная для длиннопериодических пульсаций. На РЧ-спектре также отсутствуют симметрично расположенные пики, а основной пик находится на частоте 12,56 МГц, что соответствует периоду обхода резонатора и подтверждает фундаментальную пассивную синхронизацию мод. SNR составил ~ 70 дБ. Ширина оптического спектра на уровне -3 дБ составила 8,8 нм, а центральная длина волны – 1032 нм.

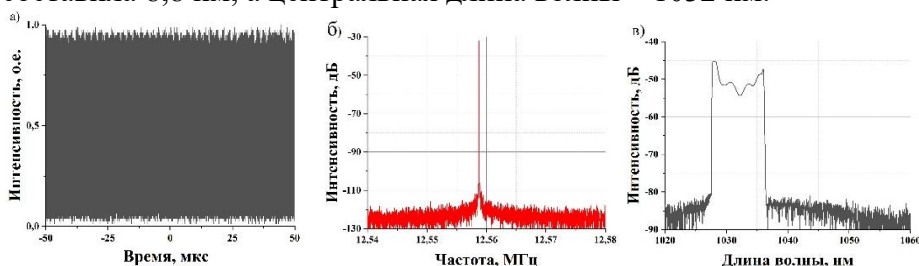


Рис.3. Спектрально-временные характеристики импульсного режима при длине активного волокна 15 см (а – осциллограмма, б – РЧ спектр, в – оптический спектр).

В работе представлена генерация длиннопериодических пульсаций с различными периодами в волоконном иттербиевом лазере с пассивной синхронизацией мод. Было показано, что в такой системе возможна устойчивая генерация диссипативных солитонов. Эти результаты важны для исследования сложных нелинейных процессов в лазерном резонаторе.

Литература

1. J. M. Soto-Crespo, M. Grapinet, P. Grelu, and N. Akhmediev, Bifurcations and multiple-period soliton pulsations in a passively mode-locked fiber laser. *Phys. Rev. E* 70 (6), 066612 (2004).
2. A.V. Sudin, I.A. Volkov, S.N. Ushakov, K.N. Nishchev, Observation of Multiwavelength Generation and Long-Period Pulsations in a Fiber Laser Passively Mode-Locked by Nonlinear Polarization Rotation. *Nonlinear Optics – 2025*. - № 33. – С. 283-290.
3. Jiaqi Zhou, Weiao Qi, Weiwei Pan, Yan Feng, Dissipative soliton generation from a large anomalous dispersion ytterbium-doped fiber laser. *Optics Letters*. – 2020. – № 45. – С. 5768-5771.