ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ решение диссертационного совета от 15.05.2024 №36

О присуждении Киселеву Алексею Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Лазерно-индуцированная модуляция оптических свойств фазоизменяемых материалов GeTe и Ge2Sb2Tе5 для фотонных приложений» в виде рукописи по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» принята к защите 27 февраля 2024 года, протокол № 33, диссертационным советом 24.2.326.07, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человека приказом от 26.01.2023 (№ 86/нк).

Соискатель Киселев Алексей Владимирович 1985 года рождения. В 2015 году в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" окончил магистратуру по направлению подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» (диплом 103304 №0000056).

В 2023 году закончил очную аспирантуру «Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН) с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» (диплом 107724 №1121595) по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», направленность образовательной программы - 05.27.03 «Квантовая электроника».

Диссертация выполнена в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиале Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (в настоящее время – Отделение ИПЛИТ-Шатура Курчатовского комплекса «Кристаллографии и фотоники»)

Начиная с 2019 года А.В. Киселев работает в должности научного сотрудника лаборатории нанофотоники и наноплазмоники Института проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (в настоящее время – Отделении ИПЛИТ-Шатура Курчатовского комплекса «Кристаллографии и фотоники»).

Научный руководитель – Лотин Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Отделения ИПЛИТ-Шатура Курчатовского комплекса «Кристаллографии и фотоники».

Официальные оппоненты:

1. Кучерик Алексей Олегович, доктор физико-математических наук, проректор по научной работе и цифровому развитию Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»;

2. Лазаренко Петр Иванович, кандидат технических наук, начальник лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ);

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) в своем положительном отзыве, подписанном д.ф.-м.н., главным научным сотрудником лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов Асеевым Сергеем Анатольевичем и утвержденном директором ИСАН, д.ф.-м.н., профессором Задковым Виктором Николаевичем указала, что диссертационная работа Киселева А.В. по критериям актуальности, научной новизне, значимости, обоснованности и достоверности выводов удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

В обсуждении диссертационной работы приняли участие: Юрасов А.Н. и Битюков В.К., Пасечник С.В., Блантер М.С., Китаева Г.Х.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 8 работ опубликовано в научных журналах и изданиях, рецензируемых РИНЦ, Scopus, Web of Science и рекомендованных ВАК. Результаты работы были апробированы на 15 всероссийских и международных конференциях. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем А.В. Киселевым работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации: Основные результаты опубликованы в научных журналах:

1. A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, **A.V. Kiselev**, N.N. Eliseev, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, A.A. Lotin Controlling optical properties of GST thin films by ultrashort laser pulses series impact // Optical Materials. 2023. Т. 141. С. 113925. **(WoS, Scopus).**

2. Kiselev A.V., Ionin V.V., Burtsev A.A., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A., Arkharova N.A., Khmelenin D.N., Lotin A.A. Dynamics of reversible optical properties switching of Ge2Sb2Tе5 thin films at laser-induced phase transitions // Optics & Laser Technology. 2022. Т. 147. С. 107701. **(WoS, Scopus).**

3. Kiselev A.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Ionin V.V., Eliseev N.N., Lotin A.A. Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced reamorphization // Optics & Laser Technology. 2021. Т. 143. С. 107305 **(WoS, Scopus).**

4. Ionin V.V., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Mikhalevsky V.A., Eliseev N.N., Asharchuk I.M., Sokolov V.I., Lotin A.A. An optical synapse based on a polymer waveguide with a GST225 active layer // Applied Physics Letters. 2021. Т. 119. № 8. С. 081105. **(WoS, Scopus).**

5. A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, N.N. Eliseev, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, D.N. Khmelenin, and A.A. Lotin. Discrete thermokinetic computational model of laser-induced phase transitions in phase-changing materials // Applied Physics Letters. 2023. Т. 122. № 19. **(WoS, Scopus).**

6. A.A. Nevzorov, V.A. Mikhalevsky, N.N. Eliseev, A.V. Kiselev, A.A. Burtsev, V.V. Ionin, A.M. Maliutin, D.N. Khmelenin, V.N. Glebov and A.A. Lotin, Two-stage conductivity switching of GST thin films induced by femtosecond laser radiation // Optics & Laser Technology. 2023. Т. 157. С. 108773 **(WoS, Scopus).**

7. Burtsev A. A., Kiselev A. V., Ionin V. V., Eliseev N. N., Fedyanina M. E., Mikhalevsky V. A., Nevzorov A. A., Novodvorsky O. A., Lotin A. A. Controlled Optical Contrast Caused by Reversible Laser-Induced Phase Transitions in GeTe and Ge2Sb2Tе5 Thin Films in the Spectral Range from 500 to 20,000 nm // Journal of Russian Laser Research. 2023. Vol. 44. No. 6. pp. 700-706. **(WoS, Scopus, РИНЦ).**

8. Eliseev N.N., Kiselev A.V., Ionin V.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Pankov M.A., Karimov D.N., Lotin A.A. Wide range optical and electrical contrast modulation by laser-induced phase transitions in GeTe thin films // Results in Physics. 2020. Т. 19. С. 103466. **(WoS, Scopus).**

Получены патенты:

1. Полезная модель «Адаптивное зеркало на основе фазоизменяемых материалов» Ионин В.В., **Киселев А.В.**, Лотин А.А., Панков М.А., Притоцкий Е.М. Патент на полезную модель RU 203240 U1, 29.03.2021. Заявка № 2020137320 от 13.11.2020.
2. Полезная модель «Составной интерференционный фильтр» **Киселев А.В.**, Лотин А.А., Панков М.А., Притоцкий Е.М. Патент на полезную модель RU 203242 U1, 29.03.2021. Заявка № 2020139813 от 04.12.2020.
3. Изобретение «Оптический синапс» Ионин В.В., **Киселев А.В.**, Лотин А.А., Минаев Н.М., Бурцев А.А. RU 2788438 C1 19.01.2023, Заявка №2021133121 от 09-12-2021

На автореферат поступило 4 отзыва:

1. От Г.М. Михеева, доктора физико-математических наук, профессора, г.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» – отзыв положительный, замечания, касаются оформления автореферата в части краткости подписей к иллюстрациям.

2. От В.Н. Храмова, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры радиофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет» – отзыв положительный. Серьезных замечаний по содержанию и оформлению автореферата диссертации нет, в качестве замечаний отмечается:

а) Тепловые модели на базе уравнений теплопроводности при описании взаимодействия лазерного излучения с материалами хорошо работают только при достаточно длинных лазерных импульсах (микро- и миллисекундный диапазон). Уже в наносекундном диапазоне длительностей лазерных импульсов с применимостью таких моделей возникают трудности. А в фемтосекундном диапазоне их применение может привести к некорректным результатам, сильно отличающимся от экспериментальных.

б) На стр. 12 автореферата есть отсылка к спектральным зависимостям показателей преломления и коэффициентов экстинкции исследуемых образцов. Но ни графика, ни результатов измерений и анализа в автореферате не приведено.

3. От А.С. Кузьминой, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». В целом, отзыв положительный, как замечания отмечено что:

а) Временная шкала на рисунках 3 и 4 представлена на английском языке и имеет размерность не в системе СИ.

б) При описании актуальности работы автор допускает речевые ошибки (необоснованный повтор слова «таких»), а также пунктуационные ошибки, связанные с повторяющимся союзом «или».

4. От М.П. Смаева, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела оптики низкотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева» Российской академии наук (ФИАН). Отзыв положительный, как замечания отмечено что:

а) В автореферате не приводится расшифровки чрезвычайно часто используемой в тексте аббревиатуры “ФИМ” (подразумеваются фазоизменяемые материалы);

б) В разделе практическая значимость, п. 1 (стр. 6) указаны различные пороги фазовых переходов для одной и той же халькогенидной пленки Ge2Sb2Te5;

в) В тексте присутствует некоторое количество опечаток (например “как- видно и рисунка” (стр. 12), “упраления оптичисчкими” (стр. 17)) и других недостатков (например, после соотношения (2) на стр. 19 приведено объяснение физического смысла параметра у на английском языке).

В каждом из отзывов отмечается, что сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался тем, что официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации широко известны своими достижениями в соответствующей области науки и способны критически оценить научную и практическую значимость результатов, полученных и представленных Киселевым А.В. в его диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

Экспериментально **изучено** изменение оптических параметров тонкопленочных образцов GeTe и Ge2Sb2Tе5 при фазовых переходах, вызванных воздействием импульсного лазерного излучения нано- и фемтосекундной длительности.

**Продемонстрирован** максимально возможный диапазон лазерно-управляемой модуляции оптических свойств тонкопленочных образцов ФИМ в широком диапазоне длин волн от 500 нм до 20 мкм. Для образца Ge2Sb2Tе5 область максимального контраста совпадает с телекоммуникационным С-диапазоном 1550 нм.

**Определены** пороговые значения энергий воздействия для кристаллизации и аморфизации по динамике интегральной интенсивности Брегговских пиков и по динамике Рамановских спектров. Для Ge2Sb2Tе5 процесс кристаллизации начинается с плотностей энергии 10 мДж/см2 и продолжается до уровня 40 мДж/см2 после которого начинаются процессы аморфизации вплоть до достижения порога абляции при плотности энергии выше 80 мДж/см2. Для Ge2Sb2Tе5 эти значения составляют 7, 30 и 70 мДж/см2 соответственно.

**Обнаружена и исследована** временная задержка между началом изменения коэффициента пропускания и началом изменения коэффициента отражения при аморфизации тонкопленочных образцов GeTe, вызванной воздействием лазерного импульса наносекундной длительности. Задержка связана с быстрым охлаждением и аморфизацией приповерхностного слоя. Такая задержка зависит от толщины образца и для 100 нм составляет 24 нс, а для 50 нм пленки – 13 нс.

**Показано**, что при воздействии лазерными импульсами 532 нм 20 нс лазера изменение оптических коэффициентов тонких пленок GeTe и Ge2Sb2Tе5 происходит за время 20-30 нс для кристаллизации и 45-60 нс для аморфизации, характерное для термических процессов. Для образцов Ge2Sb2Tе5 получено до 4-х уровней переключения.

**Показано**, что при воздействии лазерных импульсов фемтосекундной длительности (800 нм 45 фс) изменение оптических коэффициентов тонких пленок Ge2Sb2Tе5 происходит за времена порядка 300-700 пс. При этом обеспечивается до 16 уровней модуляции оптических свойств.

Экспериментально **установлено**, что в результате импульсного лазерного воздействия на тонкопленочные образцы Ge2Sb2Tе5 образуется кристаллический слой, толщина и положение которого определяются длительностью и плотностью энергии возбуждающего импульса.

В результате **экспериментальных исследований,** при воздействии на активный элемент в виде 50 нм пленки Ge2Sb2Tе5 расположенной поверх полимерного интегрального волновода, 15 нс 532 нм лазерными импульсами получена модуляция оптического сигнала C-телекоммуникационного диапазона (1,55 мкм), проходящего через волновод. Степень модуляции достигает 40% при переходе материала активного элемента из полностью аморфного в полностью кристаллическое состояние.

**Научная ценность полученных результатов** обусловлена получением новых научных знаний, представляющих интерес для фундаментальных и прикладных исследований,в работе впервые:

**Обнаружено и исследовано** явление временной задержки между началом изменения коэффициента оптического пропускания и началом изменения коэффициента оптического отражения при лазерно-инициированной аморфизации пленки GeTe толщиной 100 нм и 50 нм.

Экспериментально **исследовано** изменение как коэффициента оптического отражения, так и коэффициента оптического пропускания тонких пленок Ge2Sb2Tе5 при воздействии лазерных импульсов фемтосекундной длительности.

**Показано**, что изменение оптических коэффициентов тонких пленок Ge2Sb2Tе5 происходит за времена порядка 300-700 пс.

**Показано**, что в результате импульсного лазерного воздействия на тонкопленочные образцы Ge2Sb2Tе5 образуется кристаллический слой, толщина и положение которого определяются длительностью и плотностью энергии возбуждающего импульса.

**Экспериментально реализована** 40% модуляция оптического сигнала телекоммуникационного диапазона (1,55 мкм) в полимерном волноводе, покрытом оптически активной пленкой Ge2Sb2Tе5 толщиной 50 нм.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что научные результаты по численному моделированию и экспериментальному исследованию процессов фазовых переходов и динамики оптических свойств фазоизменяемых материалов могут быть использованы при проектировании различных устройств фотоники и оптоэлектроники: элементов оптической логики, оптических модуляторов и переключателей, динамически управляемых устройств управления оптическими сигналами на основе мета-поверхностей, а также устройств на основе интегральной волноводной оптики.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты** получены в собственных физических экспериментах;

результаты **согласуются** с результатами, приведенными другими авторами в литературе по теме данного исследования;

**установлен** систематический характер проведенных исследований; **использована** современная аппаратура и методы исследования.

Результаты работы опубликованы в международных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также были доложены и обсуждены на семинарах и на международных конференциях.

Личный вклад автора состоит в разработке, создании и отладке лазерных экспериментальных установок, планировании и проведении экспериментов по исследованию динамики лазерно-инициированных фазовых переходов, проведении исследований спектров комбинационного рассеяния, участии в моделировании процессов лазерно-инициированных фазовых переходов, обработке и интерпретации полученных результатов. Также автором проведена основная часть экспериментов, связанных с исследованием модуляции оптических сигналов в полимерных волноводах.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель А.В. Киселев дал аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета Юрасова А.Н., Пасечника С.В., Китаевой Г.Х., Битюкова В.К., Е.Д., Блантера М.С., а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 15.05.2024 диссертационный совет принял решение присудить Киселеву Алексею Владимировичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя

диссертационного совета А.Н. Юрасов

Учёный секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

15.05.2024 г.