ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
МОЛДАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
У.Д.К. 621.315.592.539.213

МЕШАЛКИН АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

ФОТО- И ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ КАРБАЗОЛ-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ И ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ

134.01 ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени доктора физических наук

КИШИНЕВ, 2025

Научная работа выполнена в Институте Прикладной Физики Молдавского Государственного Университета.

Научный руководитель:
АКИМОВА Елена, доктор хабилитат физических наук, доцент

Официальные оппоненты:
ЦИУЛЕАНУ Думитру, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор, член-корреспондент АНМ
КУЛЯК Ион, доктор физико-математических наук, доцент

Состав Специализированного Ученого Совета:
УРСАКИ Вячеслав, председатель, доктор хабилитат физико-математических наук, доцент, член-корреспондент АНМ
КОЖОКАРУ Ион, учёный секретарь, доктор физико-математических наук
РУСУ Емиль, доктор хабилитат технических наук, доцент
НЕДЕОГЛО Думитру, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор
ЗАЛАМАЙ Виктор, доктор физико-математических наук, доцент
БУЗДУГАН Артур, доктор хабилитат технических наук, профессор
КАРАМАН Михаил, доктор хабилитат физико-математических наук, профессор

Защита диссертации состоялась «17» сентября 2024, в 15:00 на заседании Специализированного Ученого Совета D 134.01-24-28 Института Прикладной Физики Молдавского Государственного Университета по адресу: MD-2028, Республика Молдова, г. Кишинев, ул. Академией 5, каб. 230.
Апробация изменённого автореферата и диссертации была проведена тем же составом Специализированного Ученого Совета D 134.01-24-28 29 мая 2025 года.

С текстом диссертации и автореферата можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Молдавского Государственного Университета и на веб-сайте Национального Агентства по Обеспечению Качества в Области Образования и Исследований (www.anacec.md)

Учёный секретарь Специализированного Ученого Совета:
КОЖОКАРУ Ион, доктор физико-математических наук

Научный руководитель:
АКИМОВА Елена, доктор хабилитат физических наук, доцент

Автор:
МЕШАЛКИН Алексей

© Мешалкин Алексей Юрьевич, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ 4

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ 9

1. ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ И ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ИЗ КАРБАЗОЛ-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ 9

2. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР 9

3. СКАЛЯРНЫЕ ФОТО- И ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ И В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ИЗ КАРБАЗОЛ-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ 12

4. ВЕКТОРНЫЕ ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ И В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ИЗ КАРБАЗОЛ-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ 19

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ 24

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА 26

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ 29

АННОТАЦИЯ 32

ADNOTARE 33

SUMMARY 34

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность и важность исследования.

Разработка новых активных и пассивных элементов фотоники, являющейся новой областью науки и техники, появившейся на стыке двух классических направлений: оптики и электроники, базируется на создании и применение новых оптических материалов и новых методов изготовления оптических элементов [1]. Среди основных преимуществ дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в сравнении с объемными оптическими элементами являются, во-первых, поскольку ДОЭ тонкие и плоские, возможность сделать оптические системы более компактными, во-вторых, в одном ДОЭ можно объединить несколько элементов, выполняющих сложные функции, которые часто невозможно выполнить с помощью объемного оптического элемента. Эти элементы обеспечивают множество уникальных фотонных применений и становятся эффективным способом минимизации и интеграции оптических компонентов [2]. Несмотря на наличие большой потребности в многофункциональных ДОЭ, т.е. обладающих и скалярными и векторными свойствами, проблема выбора материалов и соответствующих им методов записи, остается открытой. Халькогенидные стекла (ХС) являются важным классом аморфных материалов, используемых в качестве регистрирующих сред [3]. Их применение основано на их чувствительности к различным видам облучения, приводящее к стимулированным структурным изменениям в материале [4], что важно для более глубокого понимания природы этих стимулированных изменений и существенно расширит область их применения в качестве многофункциональных оптических материалов [5].

Большая исследовательская работа была сосредоточена на формировании наноструктур, подходящих для приложений микро/наноэлектроники и фотоники. Многослойные структуры представляют собой искусственные наноструктуры, которые изготавливаются с контролируемыми геометрическими параметрами и исследуются в виде тонких пленок. Это важно, поскольку изменения оптических параметров (сдвиг края фундаментального поглощения, изменение показателя преломления), а также проводимости и температуры плавления являются характерными фотоиндуцированными свойствами, которые изучаются в наноструктурах. В целях дальнейшего улучшения оптических характеристик данная работа направлена на разработку наноструктур из ХС, сочетая, таким образом, преимущества различных видов аморфных материалов ХС и

наноструктурные свойства пленки. Кроме того, наноструктурирование ХС позволяет использовать не только оптические, но и их поляризационные свойства, созданные искусственным структурированием. Это расширяет возможности голографического применения ХС, поскольку продвигает скалярную голографию в поляризационную область. Поляризационная голография обладает многими уникальными свойствами по сравнению со скалярной голографией, такими как высокая эффективность (до 100%), ахроматичность и особые поляризационные свойства.

Другой класс материалов, широко используемый для регистрации ДОЭ, это светочувствительные полимеры. Полимеры являются пластичными материалами и, следовательно, могут относительно легко демонстрировать фотоиндуцированные смещения атомов и соответствующие изменения свойств. Карбазолсодержащие полимеры (КП) вызвали широкий интерес благодаря их потенциальному применению в таких областях, как оптическое хранение данных и обработка информации. В последнее десятилетие проблеме голографической записи в полимерах уделялось особое внимание, главным образом для защиты документов от фальсификации или подделки, и рельефографические методы оказались одним из решений этой проблемы.

Существует много общего в фотоструктурном поведении ХС и фотополимеров. Фотоиндуцированное двулучепреломление возникает в ХС и полимерах при освещении поляризованным светом, сопровождающееся также изменением объема материала, анизотропными деформациями, текучестью и механическими движениями. Другим аспектом, объединяющим ХС и легированные КП, является чувствительность как к оптическому, так и к электронному воздействию, а также способность прямой деформации поверхности под действием этих излучений.

Цель работы: исследование роли скалярных и векторных процессов, возникающих в многослойных наноструктурах на основе халькогенидных стекол и в тонких пленках карбазольных полимеров под воздействием фото- и электронного облучения в создании многофункциональных дифракционных оптических элементов.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **научные задачи**:

1. Разработка и создание носителей записи на основе многослойных наноструктур (МНС) структур из халькогенидных стекол (ХС) и тонкопленочных карбазолсодержащих полимеров (ТКП) для записи ДОЭ;

2. Исследование скалярных фотоиндуцированных явлений в МНС ХС и ТКП;

3. Исследование векторных фотоиндуцированных явлений в МНС ХС и ТКП;

4. Исследование применимости скалярных и векторных фотоиндуцированных явлений в МНС ХС и ТКП для регистрации многофункциональных ДОЭ.

Научная новизна и оригинальность полученных результатов:

Разработана технология получения многослойного наноструктурированного носителя на основе ХС различного состава. Получен новый фотополимерный тонкопленочный носитель на основе ПЭПК-матрицы сенсибилизированной йодоформом CHI_3 и азокрасителем Дисперсный Оранжевый (ДО). Показано, что оба разработанных носителя являются эффективными средами, как для скалярной, так и векторной голографической записи. Предложен метод измерения величины фотоотклика голографического материала по структурированной дифракционной картине.

Основная научная задача, решенная в диссертации, заключается в установлении роли скалярных и векторных фотоиндуцированных процессов записи многофункциональных ДОЭ в многослойных наноструктурированных носителях на основе ХС и тонкопленочных азополимерах ПЭПК-ДО.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Разработан метод и технологические режимы компьютерно-управляемого последовательного термического испарения в вакууме наномногослойных структур из халькогенидных стекол различного состава в одном цикле напыления. Технология позволяет наносить тонкие пленки с нанометровой толщиной монослоя от 0,005 мкм до общей толщины образца многослойной наноструктуры ~3,0 – 4,0 мкм.

2. Синтезирован ряд новых карбазол-содержащих соединений (ПЭПК, ПЭТПК, ПЭТПК:ГБ) на основе N-эпоксипропилкарбазола (ЭПК), в которые для повышения чувствительности были добавлены различные сенсибилизаторы: йодоформ (до 10 масс.%), метил-красный (до 50 масс.%) и дисперс-оранжевый (до 50 масс.%). Для получения тонких пленок оптического качества из исследуемых фотополимеров были разработаны технологические карты полива тонких пленок из растворов на установке SCS Spincoat G3P8.

3. Показано, что при скалярной голографической записи в тонких пленках ХС, ДР являются амплитудными, обусловленными фотоиндуцированными изменениями коэффициента поглощения и скалярного изменения показателя преломления в объеме

материала. В тонких пленках исследуемых фотополимеров скалярная голографическая запись приводит к образованию амплитудных ДР в объеме полимерной пленки. Для получения рельефа необходимо дополнительное травление.

4. Показано, что как при растровом, так и при графическом облучении электронным лучом МНС ХС-Se и тонких пленок фотополимеров, образуются амплитудно-фазовые дифракционные решетки, обусловленные образованием электронно-дырочных пар в объеме образцов и “вспучивания”, т.е. изменения объема материала за счет большой энергии и глубины проникновения электронного облучения.

5. Предложен способ измерения величины фотоотклика голографического материала по структурированной дифракционной картине. Для гауссовых голограмм максимально достижимая ДЭ ограничивается эффектом формактора, который присущ как тонким, так и толстым решеткам.

6. Показано, что, как аналоговые, так и цифровые методы поляризационной голографической записи, формирующие сингулярные световые пучки (оптические вихри) с различными топологическими зарядами, позволяют создавать многофункциональные ДОЭ на разрабатываемых регистрирующих средах.

Теоретическая значимость работы состоит в выяснении физических процессов взаимодействия материалов с оптическим и электронно-лучевым излучением. Исследован механизм скалярного и векторного взаимодействия света с материалом.

Прикладная значимость работы. На разработанных средах были получены дифракционные оптические элементы для формирования оптических вихрей с высокой дифракционной эффективностью и световых пучков заданной пространственной структуры. Показано, что метод поляризационной голографической записи, при котором формируются сингулярные световые пучки (оптические вихри) с различными топологическими зарядами, позволяет создавать многофункциональные ДОЭ на разрабатываемых регистрирующих средах. Это открывает новые перспективы для разработки и/или оптимизации широкого спектра практических приложений ДОЭ из данных материалов в оптоэлектронике и фотонике (дифракционная оптика, медицина, защитные технологии, голографические методы неразрушающего контроля, изобразительная голография и т. д.).

Апробация результатов работы. Результаты исследования были представлены на научных семинарах Института прикладной физики Молдавского Государственного Университета, а также на следующих конференциях:
6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, September 20-23, 2023, Chisinau, Moldova; 14th International Conference on Physics of Advanced Materials, September 8 – 15, 2022, Dubrovnik, Croatia; 5th International Conference on Nanomaterials Science and Mechanical Engineering, July 5-8, 2022, University of Aveiro, Portugal; 11th International Advances in Applied Physics &. Materials Science Congress, 17–23 October 2021, Muğla, Turkey; 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, 3–5 November, 2021, Chisinau, Moldova; XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, 8–9 сентября 2020, Москва, Россия; 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Ed. 9, 25-28 septembrie 2018, Chișinău, Moldova; 9th International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies", 23 - 26 August 2018, Constanta, Romania.

Внедрение научных результатов. Запатентован метод дифракцинного анализа величины фазового фотоотклика фоточувствительлных материалов. Метод нашел применение в научно-исследовательской деятельности Лаборатории материалов для фотовольтаики и фотоники Института прикадной физики.

Публикации по теме диссертации. Результаты исследования опубликованы в 28 научных работах, в том числе 18 статей в рецензируемых журналах, индексированных в Web of Science и SCOPUS, 3 статьи в признанных зарубежных журналах, и 6 трудов научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, 4 главы, общие выводы и рекомендации, библиографию из 221 наименований, 130 страниц основного текста, 104 рисунков, 9 таблиц.

Ключевые слова: халькогенидные стекла, азополимер, наноструктуры, голографическая скалярная и поляризационная запись, дифракционная эффективность, поверхностный рельеф.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** формулируются актуальность и значимость темы исследования, определяется объект исследования, формулируются цель и задачи исследования, определяются методы исследования, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации.

В **Главе I «Фотостимулированные процессы в халькогенидных стеклообразных полупроводниковых наноструктурах и тонких пленках из карбазол-содержащих полимеров»** представлен подробный анализ проблем фото- и электронно-стимулированных процессов в ХС и карбазол-содержащих полимерах и их применения в качестве регистрирующих сред для записи информации. Приведен обзор литературных данных о многослойных наноструктурах на основе ХС и полимеров, сенсибилизированных различными красителями.

В **Главе II «Получение и исследование тонкопленочных микро- и наноструктур»** описан метод получения многослойных наноструктур на основе As_2S_3 и Se с помощью компьютерно-управляемого последовательного термического испарения в вакууме ХС в одном технологическом цикле с возможностью вариации толщины каждого монослоя в пределах нескольких нанометров [6]. Технология позволяет наносить тонкие пленки с нанометровой толщиной монослоя от 0,005 мкм до общей толщины образца многослойной наноструктуры ~3,0 – 4,0 мкм. Благодаря специфической форме масок (рис. 1) на подложке формируется как многослойная структура As_2S_3-Se, состоящая из последовательно нанесенных слоев As_2S_3 и Se с толщиной каждого слоя порядка 5-20 нм, количеством слоев около 100, и толщиной общей структуры около 2-3 мкм, так и отдельных слоев As_2S_3 и Se. Поперечное сечение получаемых многослойных структур As_2S_3-Se показано на рис. 2.

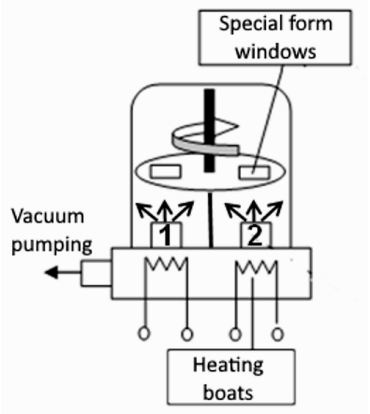


Рис. 1. Приставка для нанесения многослойной структуры на основе ХС с двумя испарителями: 1 - As_2S_3 испаритель; 2 – Se испаритель [6].

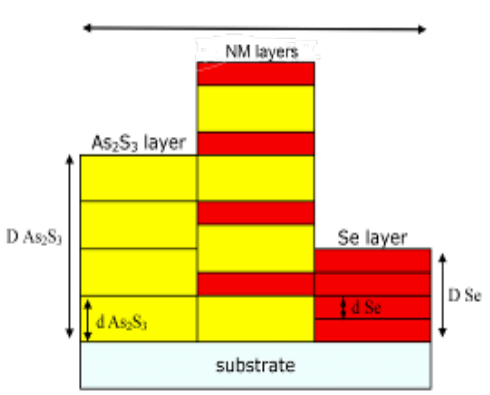


Рис. 2. Поперечное сечения образца с 4 слоями As_2S_3 и 4 слоями Se, D As_2S_3 и D Se – общая толщина слоев As_2S_3 и Se соответственно, d As_2S_3 и d Se – толщина отдельного нанослоя As_2S_3 и Se в многослойной структуре [6].

Также в главе приводятся результаты по синтезу ряда новых карбазол-содержащих соединений на основе N-эпоксипропилкарбазола (ЭПК), в которые для повышения чувствительности были добавлены йодоформ (до 10 масс.%) и дисперс-оранжевый (до 50 масс.%). На рисунке 3 показаны химические структуры синтезированных полимеров [7]. Для получения тонких пленок оптического качества из исследуемых фотополимеров были разработаны технологические карты полива тонких пленок из растворов на установке SCS Spincoat G3P-8. Химическую структуру синтезированных карбазол-содержащих полимеров подтвердили с помощью ИК спектров данных веществ путем идентификации частот, характерных для данных соединений и подтверждающих структуру полученных соединений.

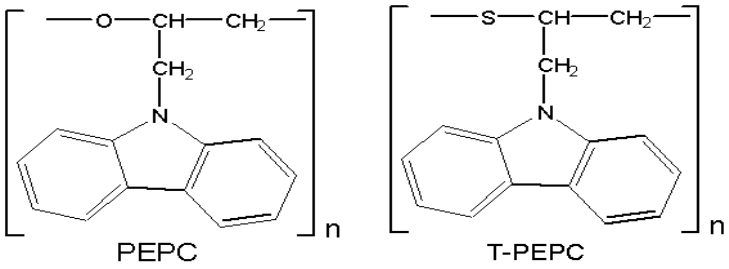


Рис. 3. Химические структуры синтезированных полимеров полиэпоксипропилкарбазол (ПЭПК) и полиэпитиопропилкарбазол (ПЭТПК) [7].

Для получения карбазол-содержащего азополимера использовался мономер на основе карбазола (N-эпоксипропилкарбазол, ЭПК) и азокраситель Дисперсный Оранжевый 3 (ДО)

[8,9]. Молекула ДО была химически присоединена к мономеру ЭПК по схеме поликонденсации при температуре 120º С в течение 4 часов. Полученный азополимер очищали осаждением в гексане, а затем в метаноле. Схема химического синтеза и структура азополимера ЭПК:ДО представлена на рис. 4.

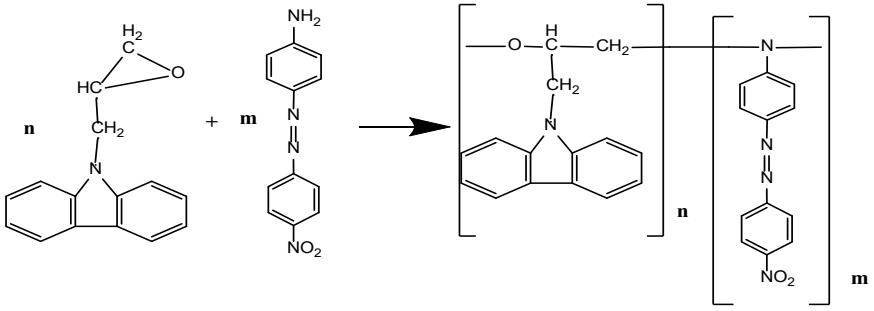


Рис. 4. Схема химического синтеза и структура ЭПК:ДО [8]

Также в главе II приводятся методики измерения и анализа оптических и физических параметров полученных тонких пленок и наноструктур. Известно, что край оптического поглощения в ХС характеризуется коэффициентом поглощения α, который растет с увеличением энергии фотонов (спектральное правило Урбаха) [10]. Оптические фотоны с энергией меньше оптической ширины запрещённой зоны (E_g^{opt}) поглощаются слабо, и для них материал является более прозрачным.

На рис. 5 представлен спектр поглощения для многослойной структуры As_2S_3:Mn-Se [11], характерный для ХС [12,13], и условно поделенный на 3 области [14]. В области сильного поглощения ($\alpha>10^4$ см$^{-1}$), по зависимости $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от $h\nu$, путем экстраполяции линейного участка кривой на рисунке 6, была получена ширина «оптически» запрещенной зоны многослойной структуры As_2S_3:Mn-Se $E_g^{opt}\approx$1,93 эВ.

Зависимость показателя преломления n от длины волны для многослойных наноструктур As_2S_3-Se была проанализированна с помощью дисперсионной модели, основанной на одноосцилляторном подходе. Согласно этой модели [6], показатель преломления n связан с энергией падающего фотона hν уравнением (1)

$$(n^2-1)=\frac{E_d E_0}{E_0^2-(h\upsilon)^2} \qquad (1),$$

где E_0 - определяет энергию одиночного осциллятора, связанного со средней энергетической щелью, т. е. с энергией химической связи между атомами, входящими в

аморфную матрицу, и E_d дисперсионная энергия, характеризующая силу межзонных переходов.

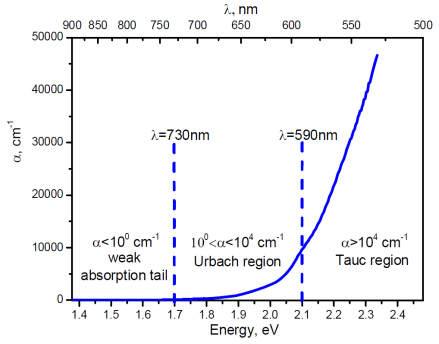


Рис. 5. Спектр оптического поглощения As_2S_3:Mn-Se с тремя основными областями [11].

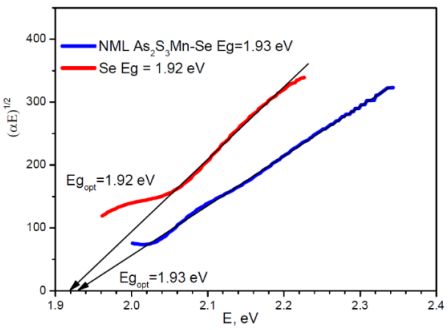


Рис. 6. График зависимости $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от hν для многослойной структуры As_2S_3:Mn-Se и слоя Se [11].

Используя спектры пропускания тонких пленок, были вычислены значения E_0 и E_d. и представленные в таблице 1. Полученные данные находятся в хорошем согласии с результатами авторов [15,16].

Таблица 1. Оптические параметры полученных слоев.

Состав пленки	d, нм	$n(0)$	E_d, эВ	E_0, эВ	E_g^{opt}, эВ
монослой As_2S_3	1400	2.221	18.594	4.730	2.32
монослой Se	1000	2.250	13.897	3.414	1.92
многослойная структура As_2S_3-Se	2400	2.282	16.522	3.928	1.94

Из данных, приведенных в этой таблице, видно, что E_0 хорошо согласуется по теории с оптической шириной запрещенной зоны ($E_0 \approx 2E_g$) только для слоев As_2S_3. E_0 для слоев Se на ~ 11 % меньше $2E_g$, а E_0 для ННС As_2S_3–Se примерно на 4 % больше.

В Главе **III «Скалярные фото- и электронно-стимулированные процессы в халькогенидных стеклообразных полупроводниковых наноструктурах и в тонких пленках из карбазол-содержащих полимеров»** приводятся результаты скалярной голографической записи в тонких пленках ХС, где сформированные дифракционные решетки обусловлены фотоиндуцированными изменениями коэффициента поглощения и скалярного показателя преломления в объеме материала. Одним из новых направлений исследований в области, посвященной регистрирующим материалам для задач голографии, является изучение фоточувствительных сред с возможностью прямого рельефообразования

в процессе экспонирования [17-19]. При этом высокие значения ДЭ, определяемые глубиной и формой рельефа, достигаются как выбором подходящей регистрирующей среды, так и условий голографической записи [20]. Для оценки ДЭ симметричных дифракционных решеток применялась классическая схема записи в сходящихся пучках (Рис. 7) [21], предложенной Лейтом и Упатниексом [22].

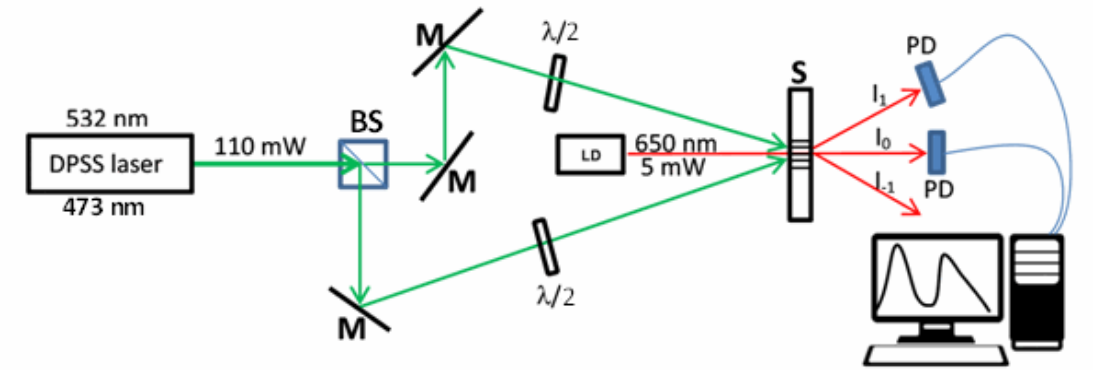


Рис. 7. Голографическая схема записи голографических решеток. DPSS laser - одномодовый (TEM_{00}) твердотельный лазер с диодной накачкой, BS – поляризационный светоделительный кубик, M – зеркала, λ/2 – полуволновые фазовые пластинки, LD - лазерный диод, S – регистрирующая среда, PD – кремниевые фотодиоды [21].

В качестве источника света использовали поляризованное излучение одномодового DPSS лазера (λ=473 или 532 нм). Расширенный лазерный пучок амплитудно делили с помощью неполяризованного светоделительного кубика в пропорции 50:50. Далее два пучка сводили на образце с помощью зеркал. Для анализа глубины и формы модуляции оптических параметров в зависимости от экспозиции тонкие слои As_2S_3 толщиной 1.0 мкм, полученные методом термического испарения в вакууме, были использованы в качестве регистрирующей среды для записи ДР с периодом 20 мкм. В процессе записи ДР вели контроль ДЭ в режиме пропускания при нормальном падении луча лазерного диода (λ=650 нм, P=1 мВт). Для исследования влияния дозы облучения на модуляцию оптических параметров были выбраны три ДР с различными дозами облучения: 1 – недо-экспонированная ДР, т.е. решетка, ДЭ которой еще продолжает расти (время записи 4 мин, доза облучения 28 Дж/см^2); 2 – нормально-экспонированная ДР, т.е. решетка, ДЭ которой дошла до максимума (время записи 5.9 мин, доза облучения 42 Дж/см^2); 3 – пере-экспонированная решетка, т.е. решетка, ДЭ которой начинает спадать (время записи 7.6

мин, доза облучения 55 Дж/см^2). На рис. 8 показана кинетика изменения ДЭ в первом дифракционном порядке в процессе записи ДР в слоях As_2S_3 [23], в которых под действием облучения происходит модуляция коэффициента поглощения и показателя преломления с достижением максимума, т.е. насыщения.

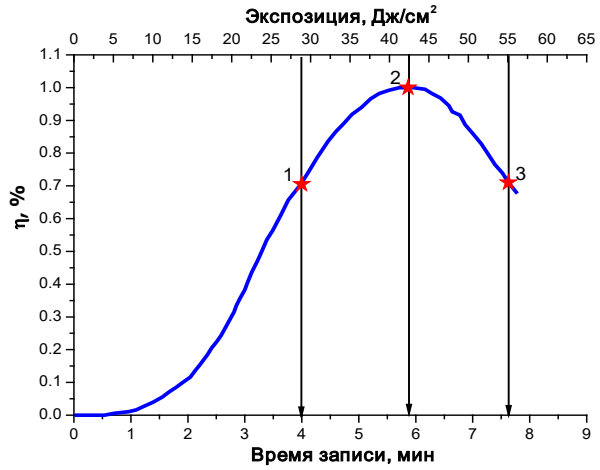


Рис. 8. Кинетика изменения ДЭ решеток, записанных в слое As_2S_3 с различными дозами: 1 – недо-экспонированная; 2 – нормально-экспонированная; 3 – пере-экспонированная [23].

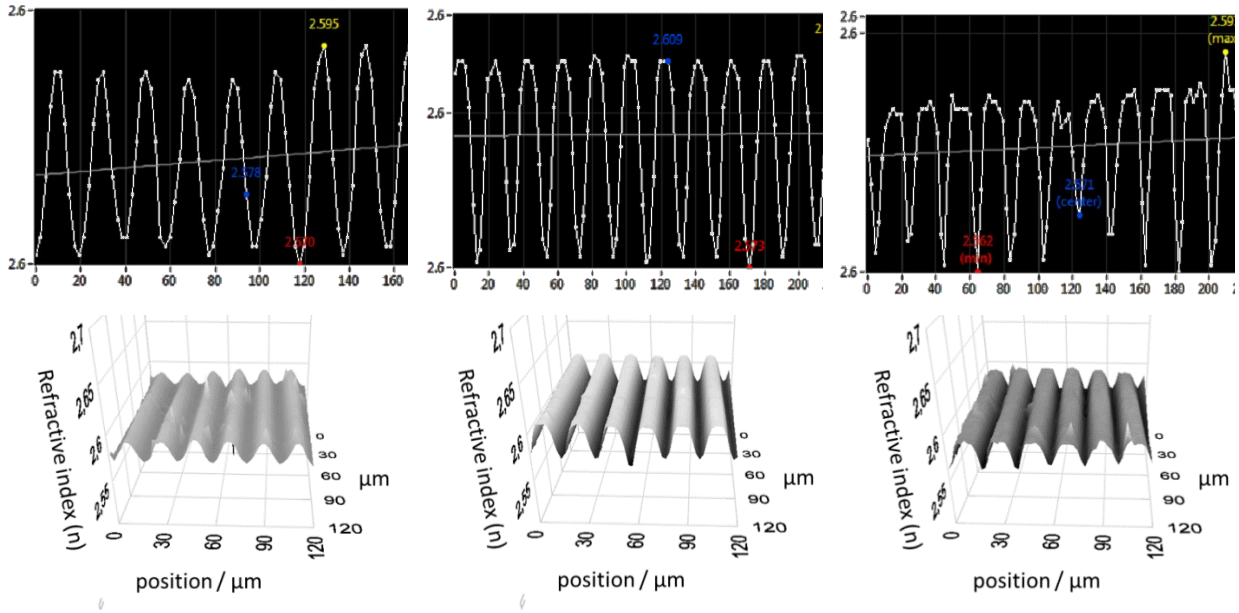
Для исследования фазового профиля и глубины модуляции параметров записанных ДР была применена изобразительная (“imaging”) спектральная эллипсометрия. Для необлученных участков слоя As_2S_3 толщина и показатель преломления были определены с помощью спектральной эллипсометрии [23]. Толщина слоя As_2S_3 составила 966 нм ± 9 нм, и показатель преломления n=2.5873 ± 0.0002 (λ=658 нм). Все измерения проводились при комнатной температуре. На рис. 9 показаны изображения ДР (а, б, в), представляющие собой изображения модуляции оптических констант пленки, а данном случае показателя преломления *n(r)* и коэффициента экстинкции k*(r)*, полученные с помощью изобразительного эллипсометра с улучшенным контрастом. Как видно, увеличение экспозиции приводит не только к изменению контраста изображений записанных ДР, но и к изменению ширины линий решетки.



а) б) в)

Рис. 9. Изображения ДР, полученные с помощью изобразительного эллипсометра с улучшенным контрастом. а) – недо-экспонированная; б) – нормально-экспонированная; в)– пере-экспонированная [23]

На рис. 10 показаны изображения показателя преломления *n(r)* для а), б) и в) ДР. Как видно из рис. 10, голографическая экспозиция интерференционной картины на слой As_2S_3 приводит к периодической модуляции показателя преломления.



а) б) в)

Рис. 10. Изображения модуляции показателя преломления *n(r)*, а также профиль и топография *n(r)* для а) – недо-экспонированной; б) – нормально-экспонированной и в)– пере-экспонированной ДР [23].

Как видно из рис. 10, при малой экспозиции профиль показателя преломления ДР близок к синусоидальному и наиболее точно передает синусоидальный профиль распределения интенсивности в интерференционной картине. При этом ширина пиков и впадин в профиле *n* отличаются незначительно, но глубина профиля относительно маленькая (~0.03). Именно этим объясняется, что при данной экспозиции величина ДЭ порядка 0.7%, что хорошо соотносится со значением ДЭ для синусоидальных решеток, полученных численно-компьютерным расчетом для модуляции показателя преломления 0.03 при толщине пленки 1 мкм. При больших экспозициях профиль показателя преломления меняется в циклоидный, вершины профиля становятся более плоскими и широкими, а впадины при этом более узкие. Глубина модуляции при этом растет для нормально-экспонированной решетки до 0.04 (λ=658 нм), обусловливающей ДЭ равной 1%, что также хорошо коррелирует со значением ДЭ, полученным расчетным методом. Для пере-экспонированной ДР характерен также циклоидный профиль *n(r)*, но глубина модуляции в этом случае падает до 0.035, что приводит к уменьшению ДЭ до 0.75%. Это можно объяснить кумулятивным действием засветки в интерференционной картине, приводящей к насыщению фото-стимулированного изменения показателя преломления.

Скалярная голографическая запись решеток проводилась также на синтезированных карбазол-содержащих полимерных слоях ПЭПК и ПЭТПК, сенсибилизированных 10% йодоформом [7,24-27]. С целью сравнения образцов в одинаковых условиях на всех образцах голографическим методом записывалась ДР с периодом 1,0 мкм (λ=488нм, освещенность E=82 мВт/см^2). Запись велась в поляризационной конфигурации интерферирующих лучей S:S, обеспечивающую наибольшую модуляцию интенсивности в интерференционной картине. Запись при ортогональных поляризациях не приводила к формированию ДР. Показано, что в тонких пленках исследуемых фотополимеров скалярная голографическая запись приводит к образованию амплитудных ДР в объеме полимерной пленки. Показано, что рельефные структуры могут быть получены с помощью дополнительного этапа обработки - жидкого травления. Результаты ДЭ решеток с периодом 1 мкм после травления проэкспонированных слоев ПЭПКа и ПЭТПКа толщиной 1.6 мкм представлены в таб. 2. [7]. Показано, что ДЭ после травления значительно (почти на порядок) увеличивается. Это объясняется фотоселективным растворением слоев, где под

действием актиничного излучения скорость растворения экспонированного участка меняется.

Таблица 2. Зависимость ДЭ решеток от времени травления слоев ПЭПКа и ПЭТПКа, сенсибилизированные 10% йодоформа [7].

Образец	Время травления, секунды			
	0	5	10	15
ПЭПК	0.5%	11%	24%	26%
ПЭТПК	0%	20%	35%	41%

Обнаружено, что как при растровом, так и при графическом облучении электронным лучом многослойных наноструктур As_2S_3-Se и тонких пленок фотополимеров, образуются амплитудно-фазовые ДР, обусловленные образованием электронно-дырочных пар в объеме образцов и “вспучивания”, т.е. изменения объема материала за счет большой энергии и глубины проникновения электронного пучка. С увеличением дозы записи (от 4.6 до 13.8 мКл/см^2) и периода решетки (от 2 до 4 мкм) глубина профиля решетки растет от 50 нм до 110 нм. На рис. 11 показаны топография поверхности и извлеченные профили графического объекта в виде слова «SECURE» записанного на многослойной структуре $Ge_5As_{37}S_{58}$-Se толщиной 3 мкм [28]. Глубина профиля зависит от дозы облучения, и составляет порядка 200 нм при дозе 30 мКл/см^2.

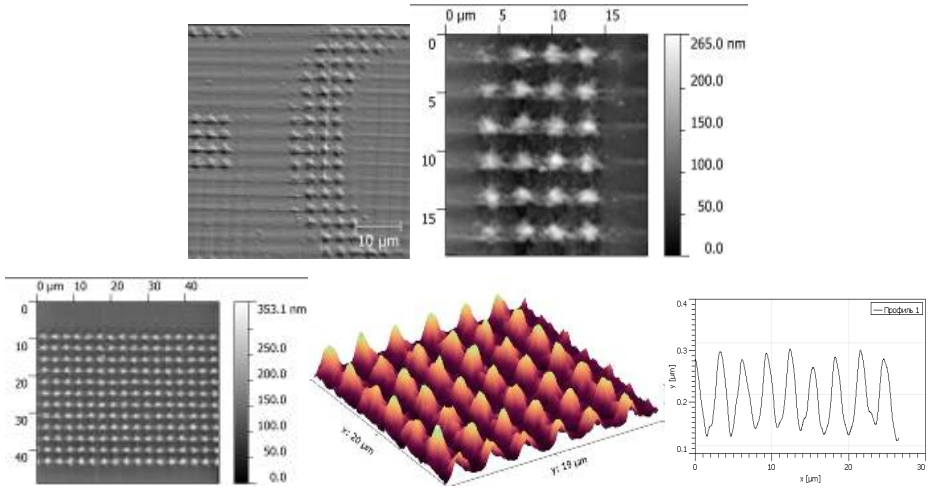


Рис. 11. Рельефные трехмерные изображения записанных структур и извлеченный профиль [28].

Предложен способ измерения величины фотоотклика голографического материала по структурированной дифракционной картине [29]. При этом эффект формфактора, который присутствует при записи голограмм неоднородными по интенсивности пучками, обычно гауссовыми, приводит к структурированию дифракционной картины, а именно к формированию чередующихся темных и светлых колец, как показано на рис. 12. Формфактор представляет из себя функцию, описывающую влияние равномерности интенсивности лазерных лучей на дифракционную эффективность записываемых голографических решеток.

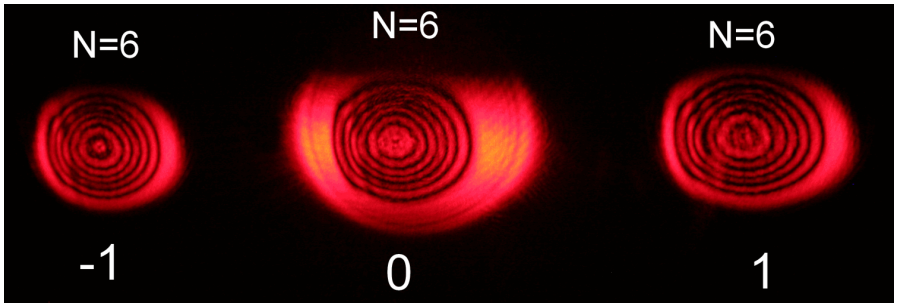


Рис. 12. Дифракционная картина нулевого и первых порядков с наблюдаемыми кольцами в каждом порядке (по 6 колец) [29]

Была определена зависимость количества колец в исследуемых порядках дифракции от фазовой модуляции решетки, что позволяет вычислить значение фотоотклика голографической среды по измеренному количеству колец. Увеличение количества рассматриваемых дифракционных порядков для анализа фазового фотоотклика позволяет увеличить точность измерения в k раз, где k – количество дифракционных порядков (от $\lambda/2$ (π радиан) для одного дифракционного порядка до $\lambda/20$ ($\pi/10$ радиан) для 10 порядков), что сравнимо или превосходит точность классических интерференционных методов [30].

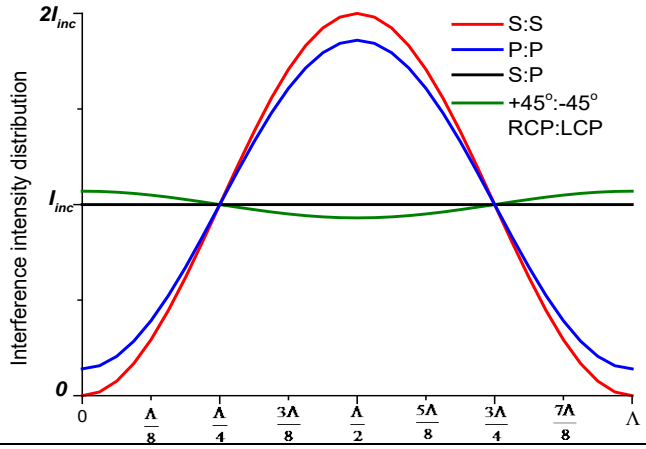
На рис. 13 показана зависимость точности измерения от количества исследуемых порядков k (от 1 до 11) [30]. Видно, что с увеличением количества исследуемых дифракционных порядков погрешность измерения, определяемая расстоянием между соседними значениями измеряемого $\Delta\varphi$ по сумме нулевых значений (колец) во всех наблюдаемых порядках дифракции уменьшается, тем самым увеличивая точность измерения.



Рис. 13. Зависимость погрешности измерения от количества исследуемых порядков k (до 11) [30].

Было выявлено, что для гауссовых голограмм максимально достижимая дифракционная эффективность ограничивается эффектом формактора, присущим как тонким, так и толстым решеткам [31].

В Главе **IV «Векторные фотостимулированные процессы в халькогенидных стеклообразных полупроводниковых наноструктурах и в тонких пленках из карбазол-содержащих полимеров»** исследованы поляризационные схемы голографической записи, приводящие к векторным взаимодействиям излучения с материалом. Был проведен теоретический расчёт модуляции интенсивности и поляризации в одном периоде Λ=1 мкм, а также контраста при интерференции лучей с поляризациями S:S, P:P, S:P, +45º:-45º и RCP:LCP представленный на рис. 14 [32]. В случае S:S и P:P, интерференция лучей приводит к максимальной амплитудной модуляции интенсивности интерференционной картины (K=100% в случае S:S поляризации и K=86% в случае P:P поляризации), в то же время результирующий вектор электрического поля интерференционной картины сохраняет свою линейную форму и направление. Для S:P и +45º:-45º модуляция интенсивности не происходит, а результирующий вектор электрического поля периодически изменяется между линейной, эллиптической и круговой формами. Для случая RCP:LCP мы имеем небольшую модуляцию интенсивности (порядка 7%), и результирующая поляризация становится линейной поляризацией с периодически изменяемым направлением.

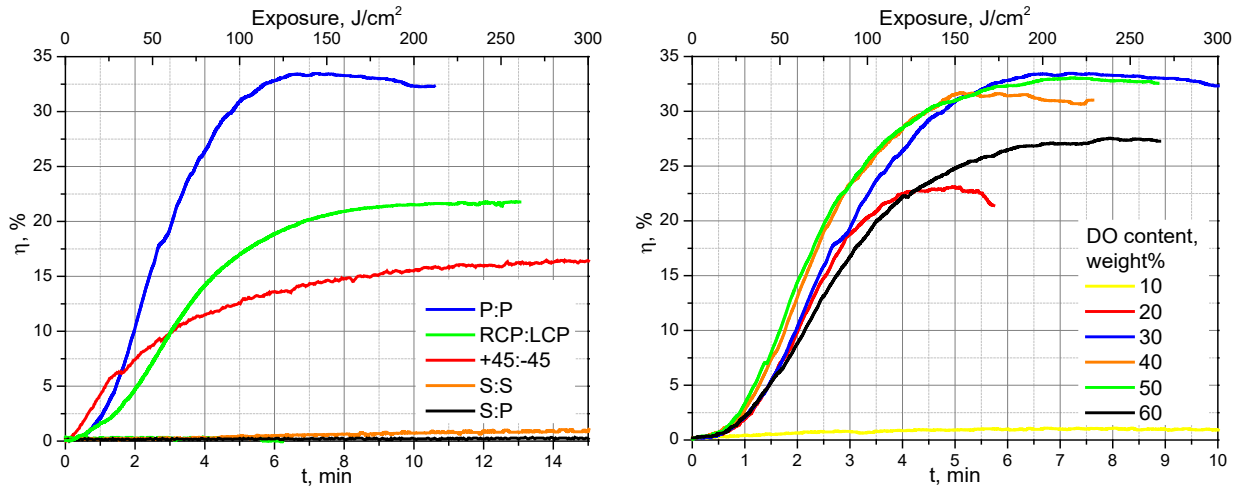


											K, %
S S	**S:S**	•	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	•	**100**
P P	**P:P**	•	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	•	**86**
S P	**S:P**	↗	⬮	◯	⬮	↘	⬮	◯	⬮	↗	**0**
+45 -45	**+45°:-45°**	↔	⬮	◯	⬮	↕	⬮	◯	⬮	↔	**7**
RCP LCP	**RCP:LCP**	↔	↗	↗	↗	↕	↘	↘	↘	↔	**7**

Рис. 14. Теоретический расчет интенсивности вектора электрического поля в пределах одного периода Λ=1 мкм интерференционной картины. K – интерференционный контраст [32].

Было показано, что новый синтезированный азополимер ПЭПК-ДО может быть использован в качестве регистрирующей среды для прямого формирования поверхностного рельефа с высокой ДЭ. Голографические решетки с высокой ДЭ более 30% записаны в ПЭПК-ДО азополимерных пленках методом поляризационной голографии. Определены оптимальная концентрация азокрасителя 30 мас. % и толщина пленки 1600 нм, как показано на рис. 15. Голографическая запись при различных конфигурациях поляризации (рис. 15а)

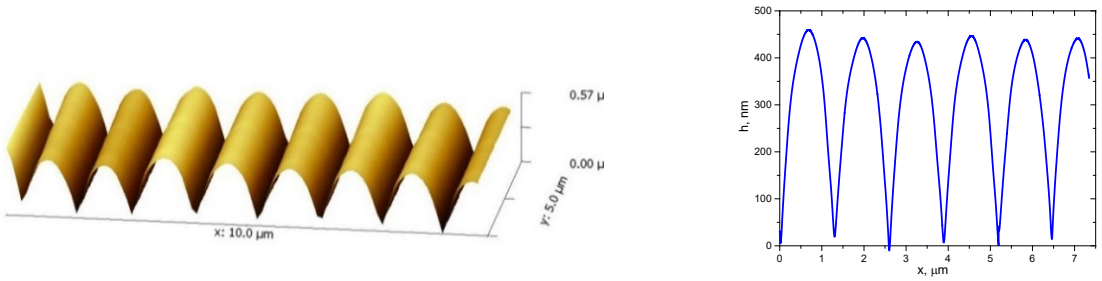
показала, что P:P поляризация обеспечивает максимум ДЭ около 33%. На рис. 15б приведена зависимость ДЭ для различных концентраций азокрасителя в полимере.



а б

Рис. 15. Зависимость дифракционной эффективности от времени записи для всех исследованных конфигураций поляризации (а) и при использовании поляризационной конфигурации P:P и концентрациях азокрасителя от 10 до 60 масс.% [32].

Облучение азополимерных пленок одиночным пучком при 473 нм в полосе поглощения трансизомера с центром ~450 нм приводит к структурному переходу в цисизомер. Исследование полученных решеток с помощью атомно-силовой микроскопии (рис. 16) показало, что величина ДЭ обусловлена в основном модуляцией рельефа поверхности, что подтверждается хорошим совпадением экспериментальных и теоретических значений ДЭ.

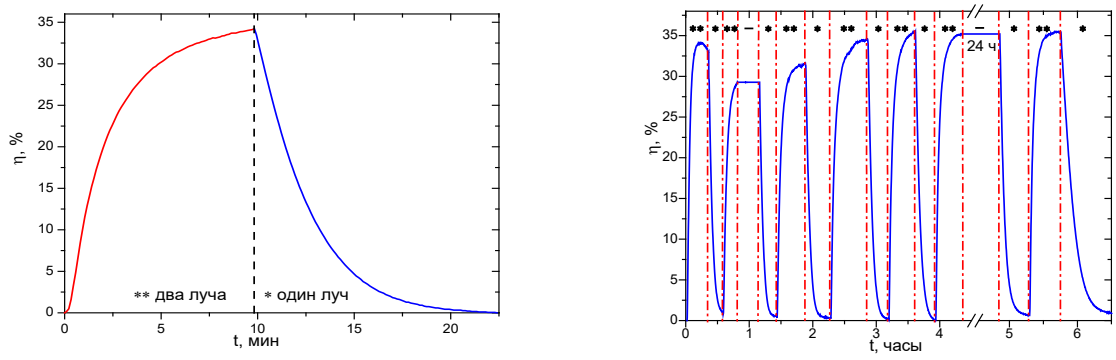


a b

Рис. 16. АСМ изображение (a) и поперечное сечение (b) поверхностной рельефной решетки, записанной на пленке ПЭПК-ДО (толщина 1600 нм, содержание азокрасителя 30 массовых %) в конфигурации поляризации P:P до значения ДЭ 30%, измеренной при 650 нм [32].

В совместных работах [33,34] на базе пленок синтезированного азополимера ПЭПК-ДО показаны результаты формирования одиночных микроструктур, где особенности анизотропного формирования объясняется поляризационными эффектами [35-39].

Была исследована реверсивность прямого формирования рельефных ДР в слоях МНС As_2S_3-Se с помощью поляризационной голографической записи [40]. Показано, что засветка МНС As_2S_3-Se актиничным светом приводит к фото-просветлению, в отличие от слоя As_2S_3, и требует намного большей экспозиции (в 15 раз). При этом предварительное облучение до насыщения фото-стимулированного просветления не влияет на величину максимально-достижимой ДЭ η=35%, но необходимая экспозиция до достижения максимума увеличивается с 2190 Дж/см^2 до 2830 Дж/см^2. Также показано, что экспозиция одним лучом приводит к стиранию записанной до максимума ДР, причем экспозиция, требуемая для стирания в два раза меньше экспозиции записи. Проведенные 10 циклов записи-стирания показали, что на МНС As_2S_3-Se возможна реверсивная голографическая запись при ортогональной круговой поляризации. На рис. 17 показана кинетика изменения ДЭ при экспозиции МНС As_2S_3-Se двумя лучами LCP:RCP поляризации до достижения максимума (на рис. 17 участок ** два луча), и дальнейшей экспозицией только одним лучом (участок * один луч) после перекрытия второго луча.



а б

Рис. 17. Кинетика изменения ДЭ при экспозиции МНС As_2S_3-Se двумя лучами LCP:RCP поляризации: (а) - до достижения максимума (участок ** два луча), и дальнейшей экспозицией только одним лучом (участок * один луч), (б) - при циклической записи и стирании ДР (7 циклов). Участки, обозначенные **, соответствуют записи ДР при экспонировании двумя лучами, * соответствует стиранию ДР при экспонировании одним лучом, и «–» соответствует хранению ДР при перекрытии обоих лучей прерывателем [40].

Исследование полученных решеток на АСМ подтвердили вывод, что основным фактором, определяющим значение ДЭ записанных решеток, является модуляция рельефа, которая составляет до 12% от толщины слоя.

Показаны как аналоговые, так и цифровые методы записи ДОЭ, формирующих сингулярные световые пучки (оптические вихри) с различными топологическими зарядами, на основе тонких голограмм, записанных в слоях разработанных азоополимеров и МНС As_2S_3-Se [41,42]. Дифракционная картина и картины интерференции пучков различных порядков дифракции (0,+1,+2) структур, записанных в слое азополимера ПЭПК-ДО, представлены на рис. 18. Видно, что нулевой порядок дифракции сохраняет топологию опорного пучка (топологический заряд l=0). В первом порядке дифракции формируется вихрь с топологическим зарядом l=1, во втором порядке дифракции наблюдается вихревой пучок с зарядом l=2.

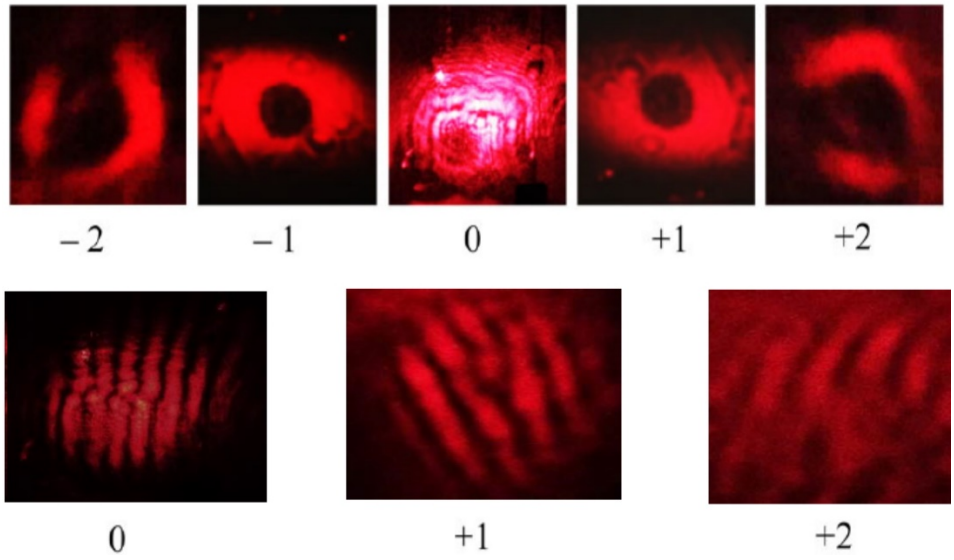


Рис. 18. Фотографии сечений световых пучков в -2 - +2 порядках дифракции (верхний ряд) и результаты интерференционного сложения 0, +1 и +2 порядков с плоской волной [42].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В ходе проведения данной работы были рассмотрены скалярные и векторные процессы в многослойных наноструктурах на основе халькогенидных стекол и в тонких пленках из карбазольных полимеров, возникающие под воздействием светового и электронного облучения, на основе которых возможно создание многофункциональных дифракционных оптических элементов. Были сформулированы следующие выводы:

1. Разработан метод компьютерно-управляемого последовательного термического испарения в вакууме для создания носителей записи на основе наномногослойных структур из халькогенидных стекол. были получены в одном технологическом цикле как отдельные многослойные образцы Se, As_2S_3, $As_{37}S_{58}Ge_5$, $As_2S_3Mn_{2\%}$, $As_2S_3Cr_{4\%}$, так и многослойные наноструктуры ХС-Se с возможностью вариации толщины каждого монослоя в пределах нескольких нанометров. Технология позволяет наносить тонкие пленки с нанометровой толщиной монослоя от десяти нм до общей толщины образца ~3,0 мкм.

2. Синтезирован ряд карбазол-содержащих соединений (ПЭПК, Т-ПЭПК) на основе N-эпоксипропилкарбазола (ЭПК), в которые для повышения чувствительности были добавлены йодоформ (до 10 масс.%), метил-красный и дисперс-оранжевый (до 50 масс.%). Для получения тонких пленок оптического качества из исследуемых фотополимеров были разработаны технологические карты полива тонких пленок из растворов на установке SCS Spincoat G3P.

3. Показано, что при скалярной голографической записи в тонких пленках ХС, ДР являются амплитудными, обусловленными фотоиндуцированными изменениями коэффициента поглощения и показателя преломления в объеме материала. В тонких пленках исследуемых фотополимеров скалярная голографическая запись приводит к образованию амплитудных ДР в объеме полимерной пленки. Для получения рельефа необходимо дополнительное травление.

4. Показано, что как при растровом, так и при графическом облучении электронным лучом МНС ХС-Se и тонких пленок фотополимеров, образуются амплитудно-фазовые ДР, обусловленные образованием электронно-дырочных пар в объеме образцов и “вспучивания” материала за счет большой энергии и глубины проникновения электронного облучения. Получено хорошее совпадение рассчитанных и экспериментально наблюдаемых дифракционных картин.

5. Экспериментально подтверждено проявление формфактора при определении динамического диапазона фотоотклика при изучении регистрирующих сред на основе многослойной структуры ХС и в азополимерах, значения которого подтвердилось с помощью других методов исследования, а именно атомно-силовой микроскопии.

6. Предложен способ измерения величины фотоотклика голографического материала по структурированной дифракционной картине. Показано, что запись голограмм неоднородными по интенсивности пучками приводит к структурированному формированию дифракционной картины. Для гауссовых голограмм максимально достижимая ДЭ ограничивается эффектом формактора, который присущ как для тонких решеток, так и для толстых.

7. Показано, что как аналоговые, так и цифровые методы поляризационной голографической записи, формирующих сингулярные световые пучки (оптические вихри) с различными топологическими зарядами, позволяют создавать многофункциональные ДОЭ на разрабатываемых регистрирующих средах.

Учитывая вышеизложенные выводы, можно сделать следующие рекомендации:

- Для решения задач формирования и обработки световых пучков заданной пространственной структуры и оптической обработки информации в реальном времени необходимо иметь среды с повышенной фото- и поляризационной чувствительностью, скоростью записи и считывания информации. Расширенные исследования влияния наноструктурирования и анизотропии, фотоиндуцированных в многослойных наноструктурах из халькогенидных стекол и азополимеров, на формирование рельефа поверхности и изменений показателя преломления будут способствовать дальнейшему пониманию взаимодействий света и материи.
- Благодаря включению ДОЭ в траекторию распространения лазерного пучка можно гибко контролировать профиль пучка и при необходимости менять его в соответствии с требованиями применения. Хотя за последние несколько лет был достигнут значительный прогресс в разработке и внедрении ДОЭ, расширение функциональных возможностей ДОЭ остается актуальной задачей.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. NAIR, R.V., WANG, F., YANG, X., JAGADISH, C. Photonic materials: from fundamentals to applications. In: Eur. Phys. J. Spec. Top., 2022, 231, 583–587. https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00541-6
2. NIKOLOVA, L., RAMANUJAM, P.S., Polarization Holography (Cambridge Univ. Press, 2009).
3. EGGLETON, B., LUTHER-DAVIES, B., RICHARDSON, K. Chalcogenide photonics. In: Nature Photon., 2011, 5, 141–148. https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.309
4. SHIMAKAWA, K., KOLOBOV A., ELLIOTT, S.R. Photoinduced effects and metastability in amorphous semiconductors and insulators, In: Advances in Physics, 1995, 44:6, 475-588, https://doi.org/10.1080/00018739500101576
5. VIJAYAKUMAR, A., BHATTACHARYA, S., Design of multifunctional diffractive optical elements, In: Opt. Eng. 2015, 54(2) 024104 https://doi.org/10.1117/1.OE.54.2.024104
6. STRONSKI, A., ACHIMOVA, E., PAIUK, O., **MESHALKIN, A.**, ABASHKIN, V., LYTVYN, O., SERGEEV, S., PRISAKAR, A., TRIDUH, G. Holographic and e-Beam Image Recording in Ge5As37S58–Se Nanomultilayer Structures. In: *Nanoscale Research Letters*, 2016, vol. 11, pp. 1-7. ISSN 1931-7573. https://doi.org/10.1186/s11671-016-1235-x
7. ANDRIES, A., ABASKIN, V., ACHIMOVA, E., **MESHALKIN, A.,** PRISACAR, A., SERGHEEV, S., ROBU, S. VLAD, L. Application of carbazole-containing polymer materials as recording media. In: Phys. Status Solidi A, 2011, 208: 1837-1840. https://doi.org/10.1002/pssa.201084040
8. **MESHALKIN, A.,** ROBU, S., ACHIMOVA, E., PRISACAR, A., SHEPEL, D., ABASHKIN, V., TRIDUH, G. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording. In: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2016, 18, 763-768. ISSN 1454-4164.
9. LOSHMANSCHII, C., ACHIMOVA, E., ABASKIN, V., BOTNARI, V., **MESHALKIN, A.** Photoinduced Anisotropy in Azopolymer Studied by Spectroscopic and Polarimetric Parameters. In: IFMBE Proceedings: 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, Ed. 5, 3-5 noiembrie 2021, Chişinău. Chişinău: Pontos, 2022, Ediția 5, Vol.87, pp. 314-321. ISSN 16800737.
10. LUKYANOV, A., GOLDEN, J.C., LUBCHENKO, V. Structural origin of the midgap electronic states and the Urbach tail in pnictogen-chalcogenide glasses, In: The Journal of Physical Chemistry B 2018 122 (33), 8082-8097, DOI: 10.1021/acs.jpcb.8b05204
11. **MESHALKIN, A.,** PAIUK, O., AKIMOVA, E., STRONSKI, A. Transmission spectra modeling for nanomultilayer chalcogenide thin films. In: Proceedings of SPIE, 2018, Vol.10977, pp. 1-8. ISSN 0277786X. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2324795
12. KOSEK, F., TAUC, J. The absorption edge of amorphous As_2S_3. In: Czech J Phys, 1970, 20, 94–100. https://doi.org/10.1007/BF01698111
13. TANAKA, K. Have we understood the optical absorption edge in chalcogenide glasses?, In: Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 431, 21-24. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.03.006
14. TANAKA, K., SHIMAKAWA, K. Amorphous Chalcogenide Semiconductors and Related Materials, 2nd edn. (Springer, New York, 2021), pp.67–97.

15. STRONSKI, A.V., VLCEK, M., TOLMACHOV, I.D., PRIBYLOVA, H. Optical characterization of As-Ge-S thin films, In: J. Optoelectron. Adv. Mater., 2009, 11(11), 1581-1585.
16. TOLMACHEV, I.D., STRONSKI, A.V. Linear and nonlinear optical properties of Ge-As-S films, In: Proc. SPIE, 2008.vol. 7138.
17. TAKATS, V., NEMEC, P., MILLER, A.C., JAIN, H., KOKENYESI, S. Surface patterning on amorphous chalcogenide nanomultilayers. In: Optical Materials, 2010, 32, 677–679.
18. PRIIMAGI, A., SHEVCHENKO, A. Azopolymer-Based Micro- and Nanopatterning for Photonic Applications, In: J. Polymer Science, part B: Polymer Physics, 2013, 01–20.
19. KRYSHENIK, V.M., AZHNIUK, Y.M., KOVTUNENKO, V.S. All-optical patterning in azobenzene polymers and amorphous chalcogenides, In: Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 512, 112-131. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.019
20. LAGUGNE LABARTHET, F.; BUFFETEAU, T.; SOURISSEAU, C. Analyses of the diffraction efficiencies, birefringence, and surface relief gratings on azobenzene-containing polymer films. In: J. Phys. Chem. B, 1998, 102, 2654-2662. DOI: 10.1021/jp980050e
21. SHOYDIN S. A., **MESHALKIN A. YU.**, KOVALEV M. S., Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer, In: Opt. Mater. Express 2020, 10, 1819-1825. https://doi.org/10.1364/OME.399017
22. Leith, E.N., Upatnieks, J. New techniques in wavefront reconstruction, In: Journal of the Optical Society of America, 1961, 51, 1469.
23. ROLING C., THIESEN P., **MESHALKIN A.**, ACHIMOVA E., ABASHKIN V., PRISACAR A., TRIDUH G., Imaging ellipsometry mapping of photo-induced refractive index in As2S3 films, In: Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 365, 93-98. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.037
24. ANDRIES, A., BIVOL, V., PRISACAR, A., SERGHEEV, S., **MESHALKIN, A.,** ROBU, S., BARBA, N., SIRBU, N. Laser and electron induced structuring of thin films on the base of carbazolyl-containing polymers and polymer-ChNs compositions. In: J Optoelectron Adv Mater. 2005; 7, 1169–1178.
25 BIVOL, V.V., ROBU, S.V., PRISACARI, A.M., **MESHALKIN, A.YU.,** VLAD, L.A., KARAMAN, M.I. Study of sensitometric and holographic properties of photoresist media based on carbazole-containing polymers sensitized with triiodomethane and pyran photochromic materials. In: High Energy Chem. 2006, 40, 178–181. https://doi.org/10.1134/S001814390603009X
26. ANDRIESH, A.M., SERGHEEV, S., TRIDUH, G., **MESHALKIN, A.Y.** Diffraction optical structures on the basis of chalcogenide glasses and polymers.In J Optoelectron Adv Mater., 2007, 9, 3007-3012.
27. АКИМОВА, Е.А., СТРОНСКИЙ, А.В., ПАЮК, А.П., **МЕШАЛКИН, А.Ю.,** БОЯРИНОВ, Ю.Ю., ПРИСАКАРЬ, А.М., РОБУ, С.В., ОЛЕКСЕНКО, П.Ф,. ЛИТВИН. О.С. Запись голограммных дифракционных решеток на карбазолсодержащих тонких полимерных пленках, В: Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 2014, 49, 31-35.
28. STRONSKI, A. ACHIMOVA, E., PAIUK, O. **MESHALKIN, A.,** ABASHKIN, V., LYTVYN, O., SERGEEV, S., PRISAKAR, A., OLEKSENKO, P.., TRIDUH, G. Optical and electron-beam recording of surface relief's using Ge5As37S58-Se nanomultilayers as

registering media. In: Journal of Nano Research, 2016, nr. 39, pp. 96-104. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.96
29. **МЕШАЛКИН А.Ю.,** ШОЙДИН С.А., Дифракционный способ измерения динамического диапазона фотоотклика голографического фазового материала, В: Тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO 2020), Москва, Россия, 8-9 сентября 2020), 2020, 235-245. ISBN 978-5-7038-5516-4.
30. **МЕШАЛКИН, А. Ю.**, ШОЙДИН С. А. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора. В: Тезисы докладов XIX Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO 2022, Санкт-Петербург, Россия, 20–22 сентября 2022)), 2022, 306–312. ISBN 978-5-00202-182-6
31. **MESHALKIN A.YU.,** SHOYDIN S.A. Diffraction efficiency and form factor effect of holograms. In: J. Opt. Technol. 2023, 90, 254-261. https://doi.org/10.1364/JOT.90.000254
32. **MESHALKIN, A.;** LOSMANSCHII, C.; PRISACAR, A.; ACHIMOVA, E.; ABASHKIN, V.; POGREBNOI, S.; MACAEV, F. Carbazole-based azopolymers as media for polarization holographic recording. In: Advanced Physical Research. 2019, 1 (2), 86-98. ISSN: 2663-8436.
33. PODLIPNOV, V., IVLIEV, N., KHONINA, S., NESTERENKO, D., **MESHALKIN, A.,** ACHIMOVA, E. Formation of microstructures on the surface of a carbazole-containing azopolymer by the action of laser beams. In: Journal of Physics: Conference Series, 2019, nr. 2(1368), pp. 1-7. ISSN 1742-6588. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/2/022069
34. PODLIPNOV, V., IVLIEV, N., KHONINA, S., NESTERENKO, D., LOSHMANSCHII, C., **MESHALKIN, A.,** ACHIMOVA, E., ABASKIN, V. Nonlinear effects in photoinduced nanomovement of carbazole-based azo-polymers. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Ed. 16, 20-22 noiembrie 2018, Ufa. Washington USA: SPIE, 2019, Ediția 16, Vol.11146, p. 0. ISBN 978-151062989-9. ISSN 0277786X. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2527431
35. KHONINA, S.N., GOLUB I. Optimization of focusing of linearly polarized light, In: Optics Letters, 2011, 36(3), 352-354. DOI: 10.1364/OL.36.000352.
36. KHONINA, S.N., GOLUB I. Time behavior of focused vector beams. In: Journal of the Optical Society of America A., 2016, 33(10), 1948-1954. DOI: 10.1364/JOSAA.33.001948.
37. SEKKAT, Z., KAWATA, S. Laser nanofabrication in photoresists and azopolymers. In: Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1), 1-26.
38. ISHITOBI, H., TANABE, M., SEKKAT, Z., KAWATA S. The anisotropic nanomovement of azo-polymers. In: Optics Express, 2007, 15(2), 652-659.
39. Khonina, S.N., Karpeev, S.V., Alferov, S.V., Savelyev, D.A., Laukkanen, J., Turunen, J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams, In: Journal of Optics, 2013, 15(8), 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
40. **MESHALKIN, A.Y.** Reversible polarization recording in As_2S_3–Se multilayer nanostructures. In: Surf. Engin. Appl. Electrochem., 2018, 54, 407–414. https://doi.org/10.3103/S1068375518040129

41. CAZAC, V., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., PRISAKAR, A., LOSHMANSKY, C., **MESHALKIN, A.,** EGIAZARIAN, K. Polarization holographic recording of vortex diffractive optical elements on azopolymer thin films and 3D analysis via phase-shifting digital holographic microscopy. In: Optics Express, 2021, 6(29), 9217-9230. ISSN 1094-4087. https://doi.org/10.1364/OE.415639
42. MELNIKOVA, E., GORBACH, D., RUSHNOVA, I., KABANOVA, O., SLUSARENKO, S., TOLSTIK, A., LOSMANSCHII, C., **MESHALKIN, A.,** AKIMOVA, E. Optical vortices generation by azopolymeric relief gratings. In: Nonlinear Phenomena in Complex Systems, 2021, 2(24), 104-111. ISSN 1561-4085. DOI: https://doi.org/10.33581/1561-4085-2021-24-2-104-1

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **MESHALKIN A.YU.,** SHOYDIN S.A. Diffraction efficiency and form factor effect of holograms. In: *J. Opt. Technol.* 2023, 90, 254-261. https://doi.org/10.1364/JOT.90.000254
2. CAZAC, V., ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., PRISAKAR, A., LOSHMANSKY, C., **MESHALKIN, A.,** EGIAZARIAN, K. Polarization holographic recording of vortex diffractive optical elements on azopolymer thin films and 3D analysis via phase-shifting digital holographic microscopy. In: *Optics Express*, 2021, nr. 6(29), pp. 9217-9230. ISSN 1094-4087. https://doi.org/10.1364/OE.415639
3. SHOYDIN S. A., **MESHALKIN A. YU.,** KOVALEV M. S., Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer, In: *Opt. Mater. Express* 2020, 10, 1819-1825. https://doi.org/10.1364/OME.399017
4. SERGEEV, S., IOVU, M., **MESHALKIN, A.** Superimposed equally oriented diffraction gratings formed in As2S3 films. In: *Chalcogenide Letters*, 2020, nr. 1(17), pp. 25-31. ISSN 1584-8663. https://chalcogen.ro/25_SergeevSA.pdf
5. **MESHALKIN, A.Y.** Reversible Polarization Recording in As2S3–Se Multilayer Nanostructures. In: *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 54, 407–414 (2018). https://doi.org/10.3103/S1068375518040129
6. CAZAC, V., **MESHALKIN, A.,** ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., KATKOVNIK, V., SHEVKUNOV, I., CLAUS, D., GIANCARLO, P. Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography. In: *Applied Optics*, 2018, nr. 3(57), pp. 507-513. ISSN 1559-128X. https://doi.org/10.1364/AO.57.000507
7. STRONSKI, A., ACHIMOVA, E., PAIUK, O., **MESHALKIN, A.,** PRISAKAR, A., TRIDUKH, G., OLEKSENKO, P., LYTVYN, P. Direct Magnetic Relief Recording Using As40S60: Mn–Se Nanocomposite Multilayer Structures. In: *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12, p. 0. ISSN 1931-7573. https://doi.org/10.1186/s11671-017-2060-6
8. **MESHALKIN, A.,** ROBU, S., ACHIMOVA, E., PRISACAR, A., SHEPEL, D., ABASHKIN, V., TRIDUH, G. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording. In: *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2016, vol. 18, pp. 763-768. ISSN 1454-4164.
9. STRONSKI, A., ACHIMOVA, E., PAIUK, O., **MESHALKIN, A.,** ABASHKIN, V., LYTVYN, O., SERGEEV, S., PRISAKAR, A., TRIDUH, G. Holographic and e-Beam Image

Recording in Ge5As37S58–Se Nanomultilayer Structures. In: *Nanoscale Research Letters*, 2016, vol. 11, pp. 1-7. ISSN 1931-7573. https://doi.org/10.1186/s11671-016-1235-x

10. STRONSKI, A. ACHIMOVA, E., PAIUK, O. **MESHALKIN, A.,** ABASHKIN, V., LYTVYN, O., SERGEEV, S., PRISAKAR, A., OLEKSENKO, P.., TRIDUH, G. Optical and electron-beam recording of surface relief's using Ge5As37S58-Se nanomultilayers as registering media. In: *Journal of Nano Research*, 2016, nr. 39, pp. 96-104. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.96
11. ACHIMOVA, E., STRONSKI, A., ABASHKIN, V., **MESHALKIN,** A., PAIUK, O., PRISAKAR, A., OLEKSENKO, P., TRIDUH, G.. Direct surface relief formation on As2S3-Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams. In: *Optical Materials*, 2015, vol. 47, pp. 566-572. ISSN 0925-3467. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.06.044
12. STRONSKI, A., ACHIMOVA, E., PAIUK, A., ABASKIN, V., **MESHALKIN, A.,** PRISACAR, A., TRIDUH, G., LYTVYN, O., Surface relief formation in $Ge_5As_{37}S_{58}$-Se nanomultilayers, In: *Journal of Non-Crystalline Solids,* 2015, 409, 43-48. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.11.010
13. ROLING, C., THIESEN, P., **MESHALKIN A.,** ACHIMOVA, E., ABASHKIN, V., PRISACAR, A., TRIDUH, G. Imaging ellipsometry mapping of photo-induced refractive index in As2S3 films, In: *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 365, 93-98. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.037
14. ANDRIES, A., ABASKIN, V., ACHIMOVA, E., **MESHALKIN, A.,** PRISACAR, A., SERGHEEV, S., ROBU, S., VLAD, L. Application of carbazole-containing polymer materials as recording media. In: *Phys. Status Solidi A*, 2011, 208: 1837-1840. https://doi.org/10.1002/pssa.201084040
15. PAIUK, O., **MESHALKIN, A.,** STRONSKI, A., ACHIMOVA, E., LOSMANSCHII, C., BOTNARI, V., KORCHOVYI, A., POPOVYCH, M.. Direct magnetic and surface relief patterning using carbazole-based azopolymer. In: *Physics and Chemistry of Solid State*, 2023, vol. 24, nr. 1, pp. 197-201. ISSN 1729-4428. https://doi.org/10.15330/pcss.24.1.197-201
16. **MESHALKIN, A.;** LOSMANSCHII, C.; PRISACAR, A.; ACHIMOVA, E.; ABASHKIN, V.; POGREBNOI, S.; MACAEV, F. Carbazole-based azopolymers as media for polarization holographic recording. In: *Advanced Physical Research*. 2019, 1 (2), 86-98. ISSN: 2663-8436. http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/APR/V1N2/Meshalkin et al.pdf
17. АКИМОВА, Е.А., СТРОНСКИЙ, А.В., ПАЮК, А.П., **МЕШАЛКИН, А.Ю.,** БОЯРИНОВ, Ю.Ю., ПРИСАКАРЬ, А.М., РОБУ, С.В., ОЛЕКСЕНКО, П.Ф,. ЛИТВИН. О.С. Запись голограммных дифракционных решеток на карбазолсодержащих тонких полимерных пленках, В: Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 2014, 49, 31-35. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/108921
18. СЕРГЕЕВ, С., **МЕШАЛКИН, А.Ю.,** ЙОВУ, М.. Дифракционные структуры, сформированные двумя скрещенными наложенными дифракционными решетками. In: *Электронная обработка материалов*, 2020, 6(56), 51-60. ISSN 0013-5739. https://doi.org/10.5281/zenodo.4299754
19. ABASHKIN, V. ACHIMOVA, E., **MESHALKIN, A.,** PRISAKAR, A., TRIDUH, G., VLCEK, M., LOGHINA, L., VOYNAROVYCH, I.. Investigation of Structural Features of As2S3-Se Multilayer Nanostructure by Raman Spectroscopy. In: *Электронная обработка материалов*, 2016, 4(52), 67-73. ISSN 0013-5739. https://eom.ifa.md/ru/journal/shortview/1464

20. **МЕШАЛКИН, А.,** АНДРИЕШ, И., АБАШКИН, В., ПРИСАКАР, А., ТРИДУХ, Г., АКИМОВА, Е., ЕНАКИ, М. Цифровой метод измерения толщины нанометровых пленок на базе микроинтерферометра МИИ-4. In: *Электронная обработка материалов*, 2012, 6(48), 114-118. ISSN 0013-5739. https://eom.ifa.md/m/journal/download/339
21. **MESHALKIN, A.,** PRISACAR, A., TRIDUH, G., ABASKIN, V., ACHIMOVA, E., TINTARU; N. In situ study of chalcogenide thin films growth during vacuum thermal evaporation. In: *AIP Conf. Proc.* 2023; 2803 (1): 040001. https://doi.org/10.1063/5.0143711
22. **MESHALKIN, A.Y.,** PODLIPNOV, V.V., USTINOV, A.V., ACHIMOVA, E.A. Analysis of diffraction efficiency of phase gratings in dependence of duty cycle and depth. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1368, 022047. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/2/022047
23. **MESHALKIN, A.,** PAIUK, O., ACHIMOVA, E., STRONSKI, A. Transmission spectra modeling for nanomultilayer chalcogenide thin films. In: *Proceedings of SPIE*, 2018, Ediția 9, Vol.10977, pp. 1-8. ISSN 0277786X. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2324795
24. **МЕШАЛКИН, А. Ю.**, ШОЙДИН С. А. Актуальные исследования кинетики записи голограмм с использованием формфактора. In: *Тезисы докладов XIX Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO 2022*, Санкт-Петербург, Россия, 20–22 сентября 2022)), 2022, сс. 306–312. ISBN 978-5-00202-182-6
25. PAIUK, O.; **MESHALKIN, A.;** STRONSKI, A.; ACHIMOVA, E.; LOSMANSCHII, K.; KORCHOVYI, A.; DENISOVA, Z.; GORONESKUL, V.; OLEKSENKO, P. Direct Surface Patterning Using Carbazole-Based Azopolymer. În: *ICNBME 2021, IFMBE Proceedings 87, 2022. 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*, November 3–5, 2021, Chisinau, Moldova, p. 117—123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_16
26. LOSHMANSCHII, C., ACHIMOVA, E., ABASKIN, V., BOTNARI, V., **MESHALKIN, A.** Photoinduced Anisotropy in Azopolymer Studied by Spectroscopic and Polarimetric Parameters. In: *IFMBE Proceedings: 5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering,* Ed. 5, 3-5 noiembrie 2021, Chişinău. Chişinău: Pontos, 2022, Ediția 5, Vol.87, pp. 314-321. ISSN 16800737. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92328-0_42
27. **MESHALKIN, A.** Development of computer model of the diffraction on transmission phase and amplitude gratings with arbitrary profile. In: *Materials Science and Condensed Matter Physics*, Ed. 9, 25-28 septembrie 2018, Chișinău, Republica Moldova: Institutul de Fizică Aplicată, 2018, Ediția 9, p. 295.
28. ШОЙДИН С.А., **МЕШАЛКИН А.Ю.** Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала. Патент RU2734093C1, МПК G03H 1/00, G01M 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.

АННОТАЦИЯ

МЕШАЛКИН Алексей Юрьевич „Фото- и электронно-стимулированные процессы в тонкопленочных структурах карбазол-содержащих полимеров и халькогенидных стекол”, Диссертация на соискание ученой степени доктора физических наук Кишинев, Республика Молдова, 2025 год.

Структура диссертации: диссертация включает введение, 4 главы, общие выводы и рекомендации, библиографию из 221 наименований, 130 страниц основного текста, 104 рисунков, 9 таблиц. Результаты опубликованы в 28 научных публикациях.

Ключевые слова: халькогенидные стекла, азополимер, наноструктуры, голографическая скалярная и векторная запись, дифракционная эффективность, поверхностный рельеф.

Цель работы: исследование роли скалярных и векторных процессов, возникающих в многослойных наноструктурах на основе халькогенидных стекол и в тонких пленках на основе карбазольных полимеров под воздействием фото- и электронного облучения, в создании многофункциональных дифракционных оптических элементов.

Задачи исследования: разработка и создание носителей записи на основе многослойных наноструктур (МНС) из халькогенидных стекол (ХС) и тонкопленочных карбазолсодержащих полимеров (ТКП) для записи ДОЭ; исследование скалярных и векторных фотоиндуцированных явлений в МНС ХС и ТКП; исследование применимости скалярных и векторных фотоиндуцированных явлений в МНС ХС и ТКП для регистрации многофункциональных ДОЭ.

Научная новизна и оригинальность полученных результатов.

Разработана технология получения многослойного наноструктурированного носителя на основе ХС. Получен новый азополимерный тонкопленочный носитель ПЭПК-ДО. Показано, что оба разработанных носителя являются эффективными средами, как для скалярной, так и векторной голографической записи. Предложен метод измерения величины фотоотклика голографического материала по структурированной дифракционной картине.

Основная научная задача, решенная в диссертации, заключается в установлении роли скалярных и векторных фотоиндуцированных процессов записи многофункциональных ДОЭ на многослойных наноструктурированных носителях на основе ХС и тонкопленочных азополимерах ПЭПК-ДО.

Теоретическая значимость работы состоит в выяснении физических процессов взаимодействия материалов с оптическим и электронно-лучевым излучением. Исследован механизм скалярного и векторного взаимодействия света с материалом.

Прикладная значимость работы. Были получены ДОЭ для формирования оптических вихрей в высокой ДЭ и световых пучков заданной пространственной структуры. Метод поляризационной голографической записи, при котором формируются сингулярные световые пучки с различными топологическими зарядами, позволяет создавать многофункциональные ДОЭ на разрабатываемых регистрирующих средах.

Внедрение научных результатов. Запатентованный метод дифракционного анализа величины фазового фотоотклика фоточувствительлных материалов нашел применение в научно-исследовательской деятельности Лаборатории материалов для фотовольтаики и фотоники Института прикладной физики.

ADNOTARE

Alexei MEŞALCHIN „Procese foto- şi electron-induse în structuri subţiri din polimeri carbazolici şi sticle calcogenice". Teza de doctor în ştiinţe fizice, Chişinău, Republica Moldova, 2025.

Structura tezei. Teza constă din introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie ce include 221 de titluri, 130 de pagini de text de bază, 104 de figuri, 9 tabele. Rezultatele cercetărilor efectuate sunt expuse în 28 de lucrări științifice.

Cuvinte cheie: sticle calcogenice, azopolimer, nanostructuri, înregistrare holografică scalară și vectorială, eficiență de difracție, relief de suprafață.

Scopul lucrării: studiul proceselor foto- și electron-induse care au loc în nanostructurile multistrat pe bază de sticle calcogenice și în straturi subțiri pe bază de polimeri carbazolici pentru crearea elementelor optice de difracție (EOD) multifuncționale.

Obiectivele cercetării: Elaborarea și dezvoltarea de medii de înregistrare bazate pe nanostructuri multistrat din sticle calcogenice și straturi subțiri de polimeri carbazolici pentru înregistrarea EOD; studierea fenomenelor fotoinduse scalare și vectoriale în nanostructuri multistrat din sticle calcogenice și straturi subțiri de polimeri carbazolici; studierea aplicabilității fenomenelor fotoinduse scalare și vectoriale pentru înregistrarea EOD multifuncționale.

Noutatea şi originalitatea ştiinţifică a rezultatelor obţinute

A fost dezvoltată tehnologia de obținere a mediului nanostructurat multistrat pe bază de sticle calcogenice. A fost obținut un nou purtător fotopolimeric sub forma unui film subțire de PEPC-DO. S-a demonstrat că ambii purtători dezvoltați sunt medii eficiente atât pentru înregistrarea holografică scalară, cât și pentru cea vectorială. Se propune o metodă de măsurare a valorii de fotoreacție a materialului holografic dintr-un model de difracție structurat.

Problema științifică soluționată constă în stabilirea rolului proceselor de înregistrare fotoindusă scalară și vectorială a EOD multifuncționale în purtători nanostructurați multistrat pe bază de sticle calcogenice și straturi subțiri de azopolimeri PEPC-DO..

Semnificația teoretică a lucrării constă în elucidarea proceselor fizice de interacțiune a materialelor cu radiațiile optice și cu fascicule de electroni. Se studiază mecanismul interacțiunii scalare și vectoriale a luminii cu materialul.

Valoarea aplicată a lucrării. Au fost obținute EOD pentru formarea de vortexuri optice cu eficiență ridicată de difracție și fascicule de lumină cu o anumită structură spațială. Metoda de înregistrare holografică prin polarizare, în care se formează fascicule de lumină singulare cu sarcini topologice diferite, face posibilă crearea de EOD multifuncționale pe mediile de înregistrare dezvoltate.

Implementarea rezultatelor științifice: Metoda patentată de analiză prin difracție a fotoreacției de fază a materialelor fotosensibile poate fi aplicată la toate celelalte materiale noi și a găsit aplicare în activitățile de cercetare ale Laboratorului de Materiale pentru Fotovoltaică și Fotonică al Institutului de Fizică Aplicată.

SUMMARY

MEŞALCHIN Alexei „Photo- and electron-stimulated processes in thin-film structures of carbazole-containing polymers and chalcogenide glasses". Thesis for the degree of Doctor of Physics Sciences. Chisinau, Republic of Moldova, 2025.

Thesis contents: the thesis includes an introduction, 4 chapters, general conclusions and recommendations, a list of references of 221 titles, 130 pages of the main text, 104 figures, 9 tables. The results are published in 28 scientific papers.

Keywords: chalcogenide glasses, azopolymer, nanostructures, scalar and vector holographic recording, diffraction efficiency, surface relief.

The goal of the thesis: study of the role of scalar and vector processes that arise in multilayer nanostructures based on chalcogenide glasses and in thin films based on carbazole polymers under the influence of photo- and electron irradiation, in the creation of multifunctional diffractive optical elements.

The research objectives: research and development of recording media based on nanomultilayer (NML) structures based of chalcogenide glasses (CG) and thin-film carbazole-containing polymers (TCP) for recording DOE; study of scalar photoinduced phenomena in NMS CS and TCH; study of vector photoinduced phenomena in NMS CS and TCH; study of the applicability of scalar and vector photoinduced phenomena in NMS CS and TCP for recording multifunctional DOEs.

The novelty and the scientific originality of the work. A technology for advancing a multilayer nanostructured carrier based on CG has been developed. A new azopolymer thin film carrier PEPC-DO has been obtained. It is shown that both developed carriers are effective media for scalar and vector holographic recording. The manifestation of the form factor in determining the dynamic range of photoresponse in the study of the investigated recording media has been experimentally confirmed and a method of measuring the photoresponse value of holographic material by using a structured diffraction pattern has been proposed.

The main scientific problem solved in the thesis consists in the establishment the role of scalar and vector photoinduced recording processes of multifunctional DOEs on multilayer nanostructured carriers based on CG and thin-film azopolymers PEPK-DO.

The theoretical significance of the thesis consists in clarifying the physical processes of interaction of materials with optical and electron beam radiation. The mechanism of scalar and vector interaction of light with material was studied.

Applicative value of the dissertation. DOEs for the formation of optical vortices with high DE and light beams of a given spatial structure were elaborated. The method of polarization holographic recording, in which singular light beams with different topological charges are formed, makes it possible to create multifunctional DOEs using the recording media being developed.

Implementation of the scientific results. The patented method of diffraction analysis of the phase photoresponse's magnitude of photosensitive materials has found application in the research activities of the Laboratory of Materials for Photovoltaics and Photonics of the Institute of Applied Physics.

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ
UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlu de manuscris
C.Z.U. 621.315.592.539.213

MEȘALCHIN ALEXEI

PROCESE FOTO- ŞI ELECTRON-INDUSE ÎN STRUCTURI SUBŢIRI DIN POLIMERI CARBAZOLICI ŞI STICLE CALCOGENICE

134.01 FIZICA ȘI TEHNOLOGIA MATERIALELOR

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

CHIȘINĂU, 2025

МЕШАЛКИН АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

ФОТО- И ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ КАРБАЗОЛ-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРОВ И ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ

134.01 ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени доктора физических наук

Aprobat spre tipar: 29.05.2025
Hârtie ofset. Tipar ofset
Coli de tipar: 2,25

Formatul hârtiei 60x84 1/16
Tiraj 5 ex.
Comanda nr.

Centrul Editorial-Poligrafic al USM
str. Al. Mateevici, 60, Chișinău, MD-2009

36