

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

д.т.н., профессор

С.А. Гаврилов

«26» апреля 2024 г.

## ОТЗЫВ

**ведущей организации** федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» на диссертационную работу Соколова Виктора Ивановича «Интегральная оптика на основе фторсодержащих полимерных материалов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

### Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность задач, решаемых в диссертационной работе Соколова В.И., обусловлена тем, что развитие лазерных информационных технологий, в том числе технологий высокоскоростных интегрально-оптических межсоединений на печатных платах является в настоящее время одним из локомотивов научно-технического прогресса. Повышение скорости передачи и обработки информации требует новых научно-технических решений в области теле- и датакоммуникаций не только на дальние расстояния, но и на небольшие дистанции, например, в пределах печатной платы персонального компьютера или суперЭВМ. Для реализации таких межсоединений наиболее перспективными являются фторсодержащие полимерные материалы, обладающие улучшенным комплексом полезных свойств в сравнении со свойствами аналогов – углеводородных полимеров, таких как полиметилметакрилат, полистирол и т.д.

Представленная В.И. Соколовым диссертация посвящена решению нескольких актуальных научных задач в области фторполимерной интегральной оптики, включая создание новых оптических материалов на основе аморфных перфторированных полимеров, разработку новых спектроскопических методов исследования их оптических свойств, создание математических моделей распространения световых импульсов в волноводах со встроенными в них негармоническими брэгговскими решетками, развитие лазерных технологий формирования световодов и других элементов фотоники, изготовление интегрально-оптических устройств с использованием таких материалов, включая оптоэлектронные печатные платы с оптической шиной передачи данных на основе массивов фторполимерных волноводов.

Таким образом, тема представленной к защите диссертационной работы Соколова В.И., посвященной разработке и созданию высокоскоростных интегрально-оптических устройств с использованием фторсодержащих полимерных материалов, является важной и своевременной. Решаемые в диссертации задачи являются актуальными, научно значимыми и имеют несомненную практическую ценность.

Входящий № 206-2866  
Дата 27 АПР 2024  
Самарский университет

## Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

1. Экспериментально продемонстрировано, что новые оптические материалы на основе аморфных перфторированных сополимеров диоксоланов и виниловых эфиров, полученные с использованием сверхвысокого давления (10-15 тыс. атм.) обладают высокой оптической прозрачностью, низким показателем преломления ( $n = 1,29-1,33$ ), малой материальной дисперсией ( $dn/d\lambda = -1,2 \times 10^{-5} \text{ нм}^{-1}$ ), способны к пленкообразованию и могут быть использованы для формирования волноводных элементов интегрально-оптических устройств. С использованием метода сверхвысокого давления впервые получен аморфный гомополимер перфторизопротилвинилового эфира, имеющий показатель преломления  $n = 1,319$ .

2. Методами численного моделирования с использованием теории связанных волн установлены типы негармонических брэгговских решеток, обладающих пространственно-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами, которые имеют близкую к прямоугольной форму полосы отражения/пропускания и могут быть использованы для создания мультиплексоров-демультиплексоров световых сигналов в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи с многоволновым уплотнением каналов. Разработан лазерный метод записи субмикронных аподизированных брэгговских решеток показателя преломления в одномодовых фторполимерных волноводах, обеспечивающих ширину полосы отражения  $\Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$ .

3. На основе проведенного автором математического анализа показано, что спектрально-ограниченный световой импульс, имеющий спектральную ширину  $\Delta\lambda_{\text{pulse}} < \Delta\lambda_{\text{passband}}$ , где  $\Delta\lambda_{\text{passband}}$  – ширина полосы пропускания бигармонической брэгговской решетки, обладающей синусоидально-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами, проходит через решетку без искажения формы, но испытывает задержку во времени. Этот эффект может быть использован для создания волноводных линий задержки оптических сигналов.

4. Впервые показано, что радикальная фотополимеризация  $\alpha$ -фторакриловых мономеров происходит под действием актинического излучения с длиной волны  $\lambda \leq 260 \text{ нм}$  без использования инициаторов. При этом в процессе раскрытия двойных  $C=C$  связей и превращения мономера в полимер коэффициент поглощения композиции уменьшается. Это приводит к увеличению глубины проникновения УФ света в композицию и позволяет формировать волноводы с более высоким аспектным отношением.

5. Предложен новый метод прямого лазерного рисования канальных волноводов в световедущих пленках из полимеров с внедренными фторсодержащими хромофорами, основанный на эффекте фотоосветления, который сопровождается уменьшением показателя преломления материала. Установлено, что скорость фотоосветления максимальна, когда длина волны излучения близка к пику поглощения хромофора.

6. Создан макетный образец оптоэлектронной печатной платы для микропроцессорных вычислительных систем с внедренной в нее 12-канальной оптической шиной на основе массива фторполимерных волноводов. Шина работает в «датакоммуникационном» диапазоне длин волн вблизи 850 нм, имеет скорость передачи данных более 3 Гбит/сек на канал и суммарную скорость более 36 Гбит/сек.

7. Разработаны спектроскопические методы измерения показателя преломления и материальной дисперсии мономеров, композиций и полимеров в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра, позволяющие проводить измерения на любой длине волны в широком спектральном диапазоне от 400 до 1600 нм. Для реализации этих методов создан спектроскопический рефрактометр.

8. С использованием спектрального подхода проведено аналитическое и численное моделирование особенностей взаимодействия лазерных пучков с многослойными световедущими структурами в условиях нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), принимающее во внимание угловую расходимость зондирующего лазерного луча. Впервые установлен количественный критерий «слабой» и «сильной» связи при резонансном

возбуждении волноводных мод в световедущей пленке. В случае «слабой» связи, когда затухание моды определяется, в основном, поглощением в пленке, наибольшую глубину  $m$ -линий имеют моды высокого порядка, которые наименее локализованы в пленке. В случае сильной связи, когда затухание волноводной моды определяется, в основном, излучением в призму, наибольшую глубину имеют  $m$ -линии мод низкого порядка. В общем случае, когда для низших мод реализуется случай слабой связи, а для мод высокого порядка – случай сильной связи, глубина  $m$ -линий сначала возрастает, а затем убывает с ростом номера моды.

На основании проведенного автором математического анализа предложен новый метод одновременного измерения показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины световедущих пленок, принимающий во внимание угловую расходимость зондирующего лазерного пучка, а также метод измерения распределения показателя преломления  $n_f(z)$  по толщине пленки, который справедлив для произвольной формы модуляции  $n_f(z)$  в пределе слабого градиента  $\Delta n_f(z)/n_f \ll 1$ , где  $n_f$  – среднее значение показателя преломления пленки,  $\Delta n_f(z)$  – амплитуда его модуляции.

С использованием созданных математических моделей и разработанных алгоритмов решения обратной задачи впервые продемонстрировано, что с применением призмного устройства связи можно определять оптические параметры многослойных световедущих структур, когда число слоев в структуре больше десяти.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов и выводов диссертационной работы**

1. На основе теории связанных волн разработаны математические модели взаимодействия световых импульсов с негармоническими брэгговскими решетками, обладающими пространственно-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами. Определены типы решеток, обеспечивающие близкую к прямоугольной форму полосы отражения/пропускания и линейную фазовую характеристику. Такие негармонические решетки могут быть использованы при создании мультиплексоров-демультиплексоров оптических сигналов.

2. Проведенный аналитический и численный анализ особенностей взаимодействия лазерных пучков с многослойными световедущими структурами в условиях НПВО, позволил предложить новый метод одновременного измерения показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины световедущих пленок, а также метод измерения распределения показателя преломления  $n_f(z)$  по толщине световедущей пленки, который справедлив для произвольной формы модуляции  $n_f(z)$ . Разработанные методы и соответствующие алгоритмы решения обратной задачи позволяют более точно контролировать оптические параметры полимерных световедущих пленок.

3. Создан плавно перестраиваемый аттенюатор для области длин волн вблизи 1550 нм на основе одномодового кварцевого волокна с боковой полировкой и покровного слоя из фторсодержащего полимера. Аттенюатор нечувствителен к поляризации света, имеет глубину ослабления сигнала 27 дБ и легко интегрируется в волоконно-оптические цепи.

4. Предложена конструкция мультиплексоров-демультиплексоров (М/Д) для объединения и разделения оптических сигналов в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи с многоволновым уплотнением каналов. М/Д состоят из нескольких каскадных волноводных интерферометров Маха-Цендера с бигармоническими брэгговскими решетками, обладающими пространственно-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами. Разработка защищена патентом РФ.

5. Впервые в России изготовлен макетный образец оптоэлектронной печатной платы с высокоскоростной оптической шиной передачи данных для микропроцессорных вычислительных систем. Шина имеет 12 каналов передачи оптических сигналов и суммарную скорость передачи данных более 36 Гбит/сек. Данная разработка может быть использована при создании перспективных ЭВМ повышенной производительности.

6. Созданы научные приборы для исследования оптических свойств полимерных материалов: спектроскопический рефрактометр и спектроскопическое призмное устройство связи. Эти устройства по ряду характеристик превосходят зарубежные аналоги, что может способствовать решению задачи импортонезависимости Российской Федерации. Разработки защищены патентами РФ.

Таким образом, разработанные математические модели, алгоритмы, лазерные технологии и методики измерений оптических свойств световедущих пленок могут быть использованы для создания различных волноводных элементов высокоскоростных интегрально-оптических устройств, в том числе оптических шин передачи данных для микропроцессорных вычислительных систем на печатных платах.

### **Степень обоснованности и достоверности результатов, научных положений, выводов, рекомендаций**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается согласием результатов численных расчетов с полученными экспериментальными данными, использованием различных методик экспериментальных измерений, проведенных с применением научных приборов мирового уровня.

Предложенные в диссертации математические модели, основанные на решении уравнений Максвелла, технические решения, методы и алгоритмы обоснованы и достоверны, что подтверждается результатами проведенных экспериментов.

### **Оценка содержания**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 388 наименований. Диссертация изложена на 249 страницах, содержит 133 рисунка и 17 таблиц, базируется на 70 оригинальных научных публикациях автора, в том числе трех главах в коллективных монографиях, 47 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах, 17 публикациях в трудах конференций, 3-х патентах РФ.

В качестве приложений приведены аналитические выражения для коэффициента отражения ТЕ-поляризованного гауссова пучка от световедущей слоистой структуры, полученные на основе решения уравнений Максвелла и справедливые в условиях резонансного возбуждения волноводных мод в световедущей пленке в условиях НПВО.

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи, указана научная новизна и практическая значимость представленных результатов, обоснована их достоверность, сформулированы защищаемые положения, описан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

В **Главе 1** дан исторический экскурс и проанализировано современное состояние исследований в области полимерной интегральной оптики. Раскрыты достоинства оптических материалов на основе аморфных фторсодержащих полимеров, приведены данные по лазерным и аддитивным технологиям формирования полимерных волноводов, разработанным в мире к настоящему времени.

**Глава 2** посвящена созданию новых органических оптических материалов на основе перфторированных сополимеров диоксоланов и виниловых эфиров. Продемонстрированы возможности метода сверхвысокого давления по синтезу новых (не описанных ранее) аморфных перфторполимеров, обладающих улучшенным комплексом полезных свойств: высокой оптической прозрачностью, низким показателем преломления, малой материальной дисперсией, низким двулучепреломлением, высокой температурой деструкции ( $T_d > 350^\circ\text{C}$ ), способностью к пленкообразованию и пригодных для создания полимерных интегрально-оптических устройств.

Приведены данные по параметрам синтеза (давлению, температуре, длительности), типам синтезированных сополимеров, а также по оптическим параметрам полученных органических материалов, их пленкообразующим свойствам, температурам деструкции.

В **Главе 3** дано описание оригинальных лазерных методов формирования различных элементов интегрально-оптических устройств из фторсодержащих полимерных материалов. К таким элементам относятся многомодовые и одномодовые волноводы, массивы волноводов, оптические разветвители и направленные ответвители, волноводные интерферометры Маха-Цендера, а также узкополосные частотно-селективные фильтры на основе одномодовых волноводов с субмикронными брэгговскими решетками показателя преломления. Методы, которые использовались для создания этих элементов, включают контактную фотолитографию глубокого УФ диапазона (260-365 нм), формирование волноводов из  $\alpha$ -фторакриловых мономеров без использования инициаторов радикальной полимеризации, а также лазерное фотоосветление световедущих пленок из полимеров с внедренными фторсодержащими хромофорами.

Значительная часть Главы 3 посвящена формированию аподизированных брэгговских решеток показателя преломления во фторполимерных волноводах под действием излучения гелий-кадмиевого лазера с длиной волны 325 нм через фазовую маску. Проведенное сравнение результатов численного моделирования спектров пропускания таких решеток с экспериментально полученными спектрами отражения/пропускания волноводных брэгговских фильтров показало их хорошее количественное согласие.

В **Главе 4** приводятся результаты исследований в области разработки и создания ряда интегрально-оптических устройств с использованием фторсодержащих полимеров: плавно перестраиваемых аттенуаторов для диапазона длин волн вблизи 1,5 мкм, мультиплексоров/демультиплексоров для высокоскоростных Волоконно-Оптических Линий Связи (ВОЛС) с многоволновым уплотнением каналов, волноводных оптических линий задержки, а также оптоэлектронных печатных плат с высокоскоростной оптической шиной передачи данных на основе массивов полимерных волноводов.

Следует отметить два важных научных результата, изложенных в Главе 4. Первый результат относится к проведенному В.И. Соколовым численному моделированию взаимодействия пикосекундных световых импульсов с брэгговскими решетками, обладающими фазовыми сдвигами, а второй – к созданию первого в РФ образца оптоэлектронной печатной платы с высокоскоростной оптической шиной передачи данных для микропроцессорных вычислительных систем.

Методами численного моделирования с использованием теории связанных волн автором установлены типы негармонических брэгговских решеток, обладающих пространственно-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами, которые имеют близкую к прямоугольной форму полосы отражения/пропускания и могут быть использованы для создания мультиплексоров-демультиплексоров сигналов в высокоскоростных ВОЛС с многоволновым уплотнением каналов. На основе этого результата была предложена схема полностью мультиплексора-демультиплексора для терабитных ВОЛС, защищенная патентом РФ.

На основе проведенного теоретического анализа автором было показано, что спектрально-ограниченный световой импульс, имеющий спектральную ширину  $\Delta\lambda_{\text{pulse}} < \Delta\lambda_{\text{passband}}$ , где  $\Delta\lambda_{\text{passband}}$  – ширина полосы пропускания бигармонической брэгговской решетки, обладающей синусоидально-модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами, проходит через решетку без искажения формы, но испытывает задержку во времени. Этот эффект может быть использован для создания волноводных линий задержки оптических сигналов.

Разработанная В.И. Соколовым концепция высокоскоростной оптической шины передачи данных на печатной плате для микропроцессорных вычислительных систем, включающей массив фторполимерных волноводов, интегрированных в плату, и практическая реализация этой концепции в виде созданного макетного образца оптоэлектронной печатной платы может найти практическое применение при создании перспективных ЭВМ повышенной производительности.

В **Главе 5** приводятся результаты по разработке спектроскопических методов измерения оптических свойств объемных фторполимерных материалов и световедущих тонкопленочных

полимерных структур в широком диапазоне длин волн от 400 до 1600 нм, включая все три «телекоммуникационных» области спектра вблизи 850, 1300 и 1550 нм. Создание этих методик потребовало разработать математические подходы и алгоритмы решения обратной задачи: восстановление оптических параметров световедущей пленки из измеренных угловых спектров коэффициентов отражения ТЕ и ТМ поляризованных зондирующих световых пучков. Проведенный автором теоретический и численный анализ взаимодействия лазерного луча с многослойной световедущей структурой в условиях резонансного возбуждения волноводных мод и разработанные математические алгоритмы позволили впервые проводить анализ неоднородных по толщине световедущих пленок, а также многослойных световедущих структур с количеством слоев более десяти. Результаты этих исследований были реализованы на практике в виде создания двух научных приборов: спектроскопического рефрактометра и спектроскопического призмного устройства связи. В отличие от зарубежных аналогов, данные приборы позволяют измерять показатель преломления на любой наперед заданной длине волны в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.

В **заключении** в соответствии с целями и задачами диссертационного исследования сформулированы основные результаты, сделаны обобщения по выводам, ранее изложенным в разделах.

Материалы исследований, проведенных автором, изложены в диссертации полно и четко, выводы обоснованы. Достоверность сформулированных защищаемых положений не вызывает сомнений.

#### **Степень завершенности диссертации**

Все поставленные в диссертации Соколова В.И. цели и задачи выполнены в полном объеме. Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, содержащую новые результаты, имеющие важное научное и практическое значение для создания высокоскоростных оптических межсоединений с использованием фторсодержащих полимерных материалов. Совокупность этих результатов можно квалифицировать как создание в Российской Федерации нового научного направления «Фторполимерная интегральная оптика».

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает основные научные и практические положения диссертации. В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, указан личный вклад автора в проведенные разработки и исследования, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов исследований. Представленные в автореферате материалы соответствуют результатам и выводам, сделанным в диссертации.

#### **Публикация основных результатов**

По материалам диссертации автором опубликовано 3 главы в коллективных монографиях, 47 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, 17 статей в трудах конференций, получено 3 патента РФ.

#### **Соответствие паспорту научной специальности**

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности 1.3.6. – Оптика (физико-математические науки): п. 1 (Развитие физических основ волновой оптики, включая физические процессы интерференции, дифракции, поляризации и когерентности света); п. 3 (Формирование и обработка оптических изображений, топография и томография. Оптика световодов, плазмонных и гибридных волноводов. Конфокальная микроскопия и оптическая микроскопия ближнего поля); п. 4 (Развитие физических основ геометрической оптики. Распространение и преобразование световых пучков. Новые принципы построения оптических систем и инструментов. Явления

на границах оптических сред. Фотометрия); п. 6 (Оптические исследования фундаментальных свойств материи. Исследования квантовой природы света. Спонтанные и вынужденные процессы. Статистика фотонов. Оптические методы передачи и обработки информации, физические основы квантовых вычислений); п. 14 (Оптика ультракоротких импульсов. Распространение оптических импульсов сверхвысоких мощностей и сверхмалых длительностей).

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты диссертации рекомендуются к использованию в научно-исследовательских лабораториях организаций, специализирующихся в области оптоэлектроники и микропроцессоров; на предприятиях, производящих печатные платы; а также в учебно-исследовательских целях для подготовки специалистов.

#### **Замечания по диссертации**

1. В диссертации не приводятся сведения относительно термической стабильности и времени жизни брэгговских решеток показателя преломления, формируемых во фторполимерных волноводах под действием излучения гелий-кадмиевого лазера с использованием фазовой маски.

2. Из текста диссертации неясно, какое время требуется для формирования канальных волноводов в электрооптических полимерах с внедренными фторсодержащими хромофорами под действием актинического лазерного излучения видимого диапазона. Сокращение времени формирования волноводов важно для практической реализации данного метода.

3. В диссертации недостаточно экспериментальных данных относительно дрейфа показателя преломления фторсодержащих полимеров при изменении температуры окружающей среды, что может сказаться на изменении числовой апертуры волноводов, изготовленных из этих материалов, вследствие термического расширения полимера.

4. В диссертации не содержится сведений о методах ввода излучения в полимерные волноводы и о потерях при вводе-выводе. Автор приводит данные о коэффициенте затухания света в многомодовых фторполимерных волноводах на длине 850 нм, полученных методом последовательного среза, однако не приводит деталей этих измерений.

5. Текст диссертации содержит стилистические неточности и опечатки. На ряде рисунков автор использует англоязычные обозначения и единицы измерений, в качестве десятичного знака – точку.

#### **Заключение по диссертации**

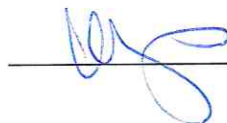
Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертационная работа Соколова Виктора Ивановича «Интегральная оптика на основе фторсодержащих полимерных материалов» по актуальности, научной новизне, уровню и значимости полученных результатов, их достоверности, обоснованности выводов является **завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные решения по разработке и созданию высокоскоростных оптических межсоединений на основе фторполимерных материалов, имеющие важное значение для развития исследований в области интегральной оптики, фотоники и оптоэлектроники, и, соответственно, развития отечественной оптоэлектронной компонентной базы в Российской Федерации.** Тема диссертации и ее содержание полностью соответствует паспорту специальности 1.3.6. – Оптика.

Диссертационная работа Соколова В.И. полностью отвечает требованиям утвержденного Правительством РФ постановления № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», а автор диссертации Соколов Виктор Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Диссертация и отзыв на диссертационную работу Соколов Виктора Ивановича «Интегральная оптика на основе фторсодержащих полимерных материалов» обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета института Перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» 24 апреля 2024 г. (протокол заседания № 7).

Отзыв подготовил:

д.т.н., профессор института Перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники»



Алексей Анатольевич Шерченков

«25» апреля 2024 г.

**Сведения о составителе отзыва**

Тел: 8-(499) 710-14-98

E-mail: mfh.miet@gmail.com

**Сведения о ведущей организации**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.