

На правах рукописи

Соколов Виктор Иванович

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА НА ОСНОВЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 1.3.6. – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в Институте фотонных технологий Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»

Научный консультант:

Панченко Владислав Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН.

Официальные оппоненты:

Конов Виталий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», руководитель Центра естественно-научных исследований;

Сигов Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», президент МИРЭА, заведующий кафедрой «Нанoeлектроника»;

Головань Леонид Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и молекулярной электроники, профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»**», г. Зеленоград, г. Москва.

Защита диссертации состоится 31 мая 2024 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086 г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»: https://ssau.ru/iles/resources/dis_protection/Sokolov_V_I_Integralnaya_optika_na_osnove.pdf.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.379.01

к.ф.-м.н., доцент

Телегин А. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Интегральная оптика является важным и активно развивающимся современным направлением научно-технического прогресса, которое нацелено на создание высокоскоростных оптических дата- и телекоммуникаций и на широкое внедрение информационных технологий в жизнь общества. Оптические материалы на основе аморфных фторсодержащих полимеров обладают комплексом полезных свойств и поэтому перспективны для создания различных интегрально-оптических устройств. В то же время многие важные проблемы в данной области науки остаются нерешенными. Так, в работе [1] предсказано, что аморфные перфторированные полимеры могут иметь очень низкий коэффициент поглощения света в телекоммуникационном C – диапазоне длин волн 1530 – 1565 нм, на уровне 0.15 дБ/км, что сравнимо с коэффициентом затухания в современных кварцевых волокнах. При этом лучший полученный коэффициент затухания составляет $\approx 50 \div 60$ дБ/км даже вблизи 1300 нм [2, 3], т.е. существенно выше предсказанного значения. Аналогично, в статье [4] предсказано, что минимально возможный показатель преломления в таких полимерах составляет $n \approx 1.29$, что может обеспечить сверхнизкие потери, обусловленные светорассеянием. Однако, среди всех известных в настоящее время полимеров, рекордно низким показателем преломления $n = 1.293$ обладает только аморфный перфторированный полимер TeflonAF 2400 разработки фирмы DuPont [5]. Полимеры с меньшим показателем преломления в настоящее время не созданы. В силу этого актуальной является задача синтеза новых фторполимеров, обладающих сверхвысокой оптической прозрачностью, сверхнизким показателем преломления и материальной дисперсией. Большое внимание в настоящее время также уделяется развитию лазерных технологий формирования фторполимерных интегрально – оптических устройств, обеспечивающих улучшенное пространственное разрешение, обладающих простотой в использовании и универсальностью.

Представленная диссертация посвящена решению ряда актуальных научных задач в области фторполимерной фотоники, включая создание новых оптических материалов на основе фторполимеров, разработку методов исследования их оптических свойств, создание лазерных технологий формирования световодов и других элементов фотоники, изготовление интегрально – оптических устройств с использованием таких материалов.

Цели диссертационной работы. Для развития научного направления «Фторполимерная интегральная оптика» в Российской Федерации автором были сформулированы следующие цели диссертационной работы:

1. Синтезировать новые оптические материалы на основе аморфных полностью фторированных полимеров, обладающих комплексом полезных свойств, для использования в интегральной оптике и фотонике. Измерить их оптические параметры.
2. Разработать лазерные методы формирования волноводов, других элементов интегрально – оптических устройств из фторполимерных материалов. Разработать методы записи субмикронных брэгговских решеток во фторполимерных волноводах.
3. Экспериментально продемонстрировать возможность создания оптоэлектронных печатных плат для микропроцессорных вычислительных устройств с внедренной в плату высокоскоростной оптической шиной передачи данных на основе массивов волноводов из фторсодержащих полимерных материалов.
4. Разработать точные и надежные методы измерения оптических параметров (показателя преломления, коэффициента экстинкции, толщины) световедущих пленок и многослойных волноводных структур из фторполимерных материалов.

Задачи диссертационной работы. Для достижения этих целей автором были поставлены следующие конкретные задачи:

1. С использованием метода сверхвысокого давления (10 – 16 тыс. атм.) синтезировать новые оптические материалы на основе аморфных перфторированных сополимеров диоксоланов и виниловых эфиров. Исследовать оптические характеристики полученных сополимеров.
2. Разработать метод контактной УФ фотолитографии для формирования волноводов из акриловых мономеров, имеющих высокую степень фторирования (90% и более).
3. Разработать метод прямого лазерного рисования оптических волноводов в световедущих пленках из полимеров с внедренными фторсодержащими хромофорами.
4. Разработать лазерный метод записи субмикронных аподизированных брэгговских решеток показателя преломления в одномодовых фторполимерных волноводах.
5. Изготовить частотно-селективные волноводные фильтры на основе брэгговских решеток для мультиплексирования/демультиплексирования сигналов в волоконно – оптических линиях связи (ВОЛС) с многоволновым уплотнением каналов. Фильтры должны обладать близкой к прямоугольной формой полосы отражения/пропускания шириной 0.4 нм.
6. Создать действующий макетный образец оптоэлектронной печатной платы с внедренной в нее 12-канальной оптической шиной на основе массива фторполимерных волноводов, для передачи данных в «датакоммуникационном» диапазоне длин волн вблизи 850 нм.
7. Разработать спектроскопические методы измерений показателя преломления и материальной дисперсии мономеров, композиций и полимеров в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра.
8. Разработать спектроскопические методы измерений показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины полимерных пленок и многослойных световедущих структур в телекоммуникационных диапазонах длин волн вблизи 850, 1300 и 1550 нм.

Полученные результаты и их научная новизна. Полученные в диссертационной работе научные результаты являются новыми и имеют приоритетный характер.

1. Синтезирован ряд новых (не описанных ранее) оптических материалов на основе аморфных перфторированных сополимеров диоксоланов и виниловых эфиров. Впервые получен аморфный гомополимер перфторизопропилвинилового эфира. Созданные материалы способны к пленкообразованию и могут быть использованы для формирования волноводных элементов интегрально-оптических устройств.
2. Разработан метод контактной УФ фотолитографии для формирования волноводов из акриловых мономеров, имеющих высокую степень фторирования (90% и более). Впервые показано, что радикальная фотополимеризация α -фторакриловых мономеров может быть инициирована под действием излучения с длиной волны $\lambda \leq 260$ нм без использования инициаторов. При этом в процессе раскрытия двойных С=С 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.
3. Предложен метод прямого лазерного рисования канальных волноводов в световедущих пленках из полимеров с внедренными фторсодержащими хромофорами. Метод основан на уменьшении показателя преломления материала под действием излучения с длиной волны, близкой к пику поглощения хромофора.

4. Разработан лазерный метод записи субмикронных аподизированных брэгговских решеток показателя преломления в одномодовых фторполимерных волноводах.

5. Изготовлены частотно-селективные волноводные фильтры на основе брэгговских решеток для мультиплексирования/демультиплексирования сигналов в ВОЛС с многоволновым уплотнением каналов. Фильтры обладают близкой к прямоугольной формой полосы отражения/пропускания шириной 0.4 нм.

Предсказано, 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 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.

6. Создан макетный образец оптоэлектронной печатной платы с внедренной в нее 12-канальной оптической шиной на основе массива фторполимерных волноводов, для передачи данных в «датакоммуникационном» диапазоне длин волн вблизи 850 нм.

7. Разработаны спектроскопические методы измерений показателя преломления и материальной дисперсии мономеров, композиций и полимеров в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра. Для реализации этих методов создан спектроскопический рефрактометр.

8. Разработаны спектроскопические методы измерения показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины полимерных пленок и многослойных световедущих структур. Впервые предложен количественный критерий «слабой» и «сильной» связи при резонансном возбуждении волноводных мод в световедущей пленке методом призмы в геометрии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). 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.

Предложен новый метод измерения распределения показателя преломления $n_f(z)$ по толщине световедущей 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 модуляция.

Впервые экспериментально показано, что с использованием призмного устройства связи можно определять оптические параметры многослойных световедущих структур, когда число слоев в структуре больше десяти.

Теоретическая и практическая значимость

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 импорт-независимости Российской Федерации. Разработки защищены патентами РФ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием научных приборов мирового уровня, согласием результатов численных расчетов с полученными экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту

1. Оптические органические материалы на основе аморфных перфторированных сополимеров диоксоланов и виниловых эфиров прозрачны в «телекоммуникационных» диапазонах длин волн вблизи 850, 1300 и 1550 нм (коэффициент поглощения менее 0.1 дБ/см вблизи 1550 нм), обладают показателем преломления $n = 1.295 - 1.330$, малой материальной дисперсией $dn/d\lambda \approx -1 \times 10^{-5} \text{ нм}^{-1}$ и могут использоваться для формирования интегрально – оптических волноводов. Соплимеры образуются путем радикальной полимеризации при давлении 10 – 16 тыс. атм. и температуре 100 – 170 °С без использования инициаторов.

2. Интегрально – оптические волноводы формируются в ходе радикальной полимеризации α -фторакриловых мономеров под действием УФ излучения с длиной волны $\lambda \leq 260 \text{ нм}$ в отсутствие фотоинициаторов. В процессе превращения мономера в полимер коэффициент поглощения композиции уменьшается, что позволяет формировать волноводы с более высоким аспектным отношением.

3. Освещение световедущих полимерных пленок с фторсодержащими хромофорами лазерным излучением сопровождается уменьшением показателя преломления n материала. Изменение n достигает $\Delta n = 0.028$, что достаточно для формирования волноводов с числовой апертурой до 0.29. Максимальная скорость фотоосветления достигается при воздействии видимым светом с длиной волны, близкой к центру полосы поглощения хромофора.

4. Одномодовые волноводы из фторакрилатов с аподизированными брэгговскими решетками показателя преломления с периодом $d \approx 0.53 \text{ мкм}$ и амплитудой $\Delta n \approx 3.7 \times 10^{-4}$, записанными под действием излучения He-Cd лазера ($\lambda = 325 \text{ нм}$), имеют близкую к прямоугольной форму полосы отражения, коэффициент отражения $R > 98\%$ и ширину полосы $\Delta\lambda = 0.4 \text{ нм}$ в телекоммуникационном С - диапазоне длин волн 1530 - 1565 нм.

5. Спектрально – ограниченный гауссов импульс, имеющий спектральную ширину $\Delta\lambda_{\text{pulse}} < \Delta\lambda_{\text{passband}}$, где $\Delta\lambda_{\text{passband}}$ - ширина полосы пропускания бигармонической решетки, обладающей синусоидально – модулированной амплитудой и фазовыми сдвигами, проходит через решетку без искажения формы и испытывает задержку во времени. Время задержки возрастает при увеличении длины решетки и ее амплитуды.

6. Оптическая шина передачи данных на печатной плате, включающая 12 волноводов из фторакрилатов, поддерживает скорость передачи данных по каждому волноводу более 3 Гбит/с и суммарную скорость более 36 Гбит/сек.

7. Спектроскопическая рефрактометрия позволяет измерять показатель преломления и материальную дисперсию вещества на любой длине волны в диапазоне 400 - 1600 нм с точностью $\pm 1 \times 10^{-4}$. Такая точность обеспечивается путем освещения образца монохроматическим светом со спектральной шириной $\Delta\lambda < 2$ нм от монохроматора посредством многожильного волоконно-оптического кабеля.

8. Метод призмного возбуждения волноводных мод, принимающий во внимание толщину зазора между измерительной призмой и пленкой и угловую расходимость зондирующего лазерного луча, позволяет определять показатель преломления, материальную дисперсию, коэффициент экстинкции и толщину неоднородных по толщине световедущих пленок и тонкопленочных световедущих структур с количеством слоев более десяти.

Публикации. 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.

Апробация работы. Представленные результаты апробированы на 25 российских и международных научных конференциях: ALT'23 (приглашенный доклад); 32-nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS-2020), 2020; Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ 2019), Россия, Переславль – Залесский, 2019; Международная научная конференция «Оптика неоднородных структур 2019», 2019, Могилев, Беларусь; V Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», 2018, Гомель, Беларусь; 29th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2017), Spain, Barcelona, 2017; Первый Российский кристаллографический конгресс, Россия, Москва, 2016; Международная научно-практическая конференция «Оптика неоднородных структур 2015», 2015, Беларусь, Могилев; 6-я международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», Россия, Томск, 2015; XI конференция «Лазеры и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и применения» (ILLA-2014), Россия, Шатура, 2014; XXIII Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», 2009, Звенигород; XII Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 2006; Conference «Lasers and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications», Bulgaria, Plovdiv-Smolyan, 2006; Международная конференция «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, 2003; IQEC/LAT'2002, 2002, Moscow; Международная конференция «Лазерные и лазерно-информационные технологии», Россия, г. Суздаль, 2001; Photonics West (1999, 2001, США).

Личный вклад автора. Автором самостоятельно определена тема диссертации, сформулированы цели и задачи работы, проведен анализ литературных данных, осуществлен выбор методов исследования. Диссертантом лично проведены как теоретические расчеты, так и эксперименты, описанные в диссертации. В частности, самостоятельно выполнен расчет отражения ТЕ и ТМ поляризованных гауссовых световых пучков от тонкопленочных волноводных структур в условиях НПВО, дан анализ прохождения световых импульсов через бигармоническую решетку. Автором собрана установка для записи брэгговских решеток показателя преломления в полимерных волноводах, проведено их изготовление и тестирование. Разработка количественного критерия «сильной» и «слабой» связи, методов решения обратной задачи (определение оптических параметров световедущих структур из угловой зависимости коэффициентов отражения ТЕ- и ТМ-поляризованных лазерных пучков в геометрии НПВО) осуществлена непосредственно автором.

Синтез аморфных перфторированных полимеров проводился в кооперации с ИОХ РАН, а также лично автором. Создание макетного образца оптоэлектронной печатной платы с оптической шиной передачи данных выполнено совместно с НИИСИ РАН. При этом НИИСИ РАН разрабатывал электронную часть платы, а коллектив ИФТ РАН под руководством автора диссертации – ее оптическую часть. Диссертант лично принимал участие в изготовлении макетного образца и его тестировании.

Автором разработан метод фотоотверждения α -фторакрилатов под действием УФ излучения с длиной волны < 260 нм без использования инициаторов радикальной полимеризации, предложен метод лазерного формирования волноводов в электрооптических полимерах с внедренными фторсодержащими хромофорами. Идея создания спектроскопического рефрактометра и спектроскопического призмного устройства связи принадлежит автору, который принимал непосредственное участие в изготовлении и тестировании этих приборов.

Объем и структура диссертации. Работа 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. 45 статей опубликованы в научных журналах, входящих в перечень журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Краткое содержание диссертации

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.

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. Отметим важнейшие из этих достоинств:

- Фторполимеры обладают более высокой оптической прозрачностью, чем их углеводородные аналоги, во всех трех «телекоммуникационных» диапазонах длин волн λ вблизи 850, 1300 и 1550 нм. Это связано с тем, что замена легких атомов водорода на более тяжелые атомы фтора приводит к смещению положений колебательных обертонов связи C – F в сторону больших длин волн по сравнению с положениями обертонов C – H связи.
- Фторполимеры имеют более низкий показатель преломления n и более низкую материальную дисперсию $dn/d\lambda$, что уменьшает степень расплывания световых импульсов и позволяет увеличить скорости передачи оптической информации по волноводу. Данное свойство обусловлено разной поляризуемостью C-F и C-H связей.
- Фторполимеры характеризуются высокой химической стойкостью и более устойчивы к влиянию повышенной температуры, т.к. связь C – F в молекуле полимера является более прочной, чем связь C – H.
- Многие фторсодержащие мономеры обладают высокой активностью в ходе радикальной фотополимеризации. Это позволяет использовать для формирования волноводов методы УФ фотолитографии и прямого лазерного рисования.

В **Главе 1** также приведены сведения по номенклатуре аморфных фторсодержащих полимеров, разработанных в мире, дан обзор лазерных технологий, используемых для формирования полимерных волноводов.

Глава 2 посвящена созданию органических оптических материалов. На примерах сополимеризации 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 ($T_d > 350$ °С), способностью к пленкообразованию и пригодных для создания полимерных интегрально-оптических устройств.

Синтез сополимеров проводился на специально созданной автоматизированной установке, которая имеет в своем составе пресс ПЛГ-25 (25 Тонн), электронный манометр, электронагреватель с термопарой и блоком управления температурой, датчик перемещения столика прессы и персональный компьютер. Установка позволяет контролировать изменение давления и температуры реакционной среды в ходе эксперимента, а также регистрировать изменение реакционного объема, вызванное усадками композиции. Синтез полимеров осуществлялся в тефлоновых ампулах объемом до 15 мл, помещаемых в пресс-форму типа цилиндр-поршень из специализированного легированного сплава - стали 9ХС, при давлении до 16 тыс. атм. и температуре до 200 °С. На Рисунке 1 представлены фрагменты структур некоторых из синтезированных сополимеров.

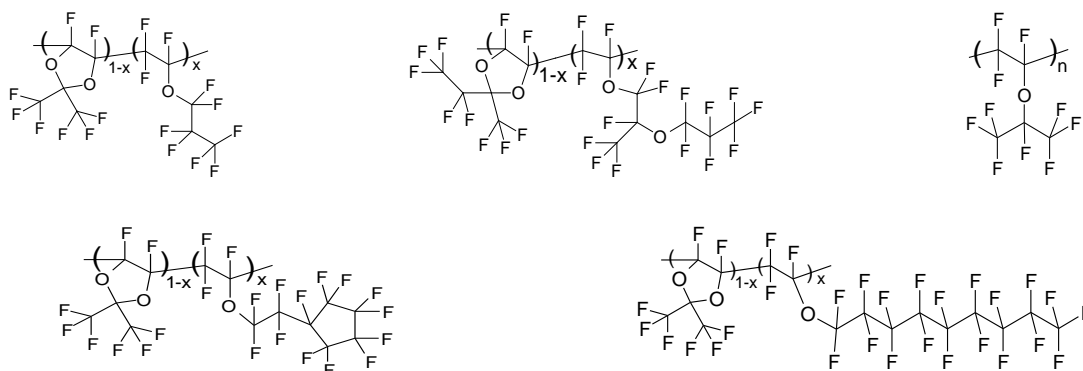


Рисунок 1 – Фрагменты структур перфторированных сополимеров, синтезированных методом сверхвысокого давления. x – молярная концентрация винилового эфира в сополимере

Структурная диагностика синтезированных сополимеров проводилась методом широкоугольного рентгеновского рассеяния на дифрактометре Rigaku Miniflex600 (Cu, $\lambda = 1.54184$ А). На Рисунке 2 представлена типичная дифрактограмма, которая не содержит резких пиков, но имеет широкие «галы» вблизи $2\theta \approx 12$ и 38 град. Отсутствие резких пиков свидетельствует об аморфности данного перфторполимера.

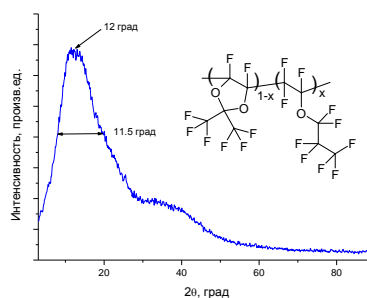


Рисунок 2 – Дифрактограмма пленки из перфторированного сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$, полученная на рентгеновском дифрактометре Rigaku Miniflex600

Оценка молекулярной массы M_w сополимеров проводилась двумя способами: путем измерения диаметра D макромолекулярных глобул методом динамического светорассеяния и измерения характеристической вязкости методом вискозиметрии. На Рисунке 3 представлена гистограмма распределения глобул сополимера $D_{1-x}EC5_x$ в зависимости от D . Видно, что средний диаметр глобул равен $\langle D \rangle = 36$ нм, т.е. данный сополимер можно отнести к классу высокомолекулярных веществ.

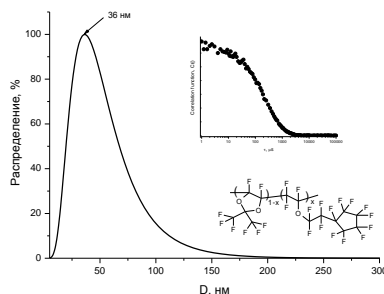
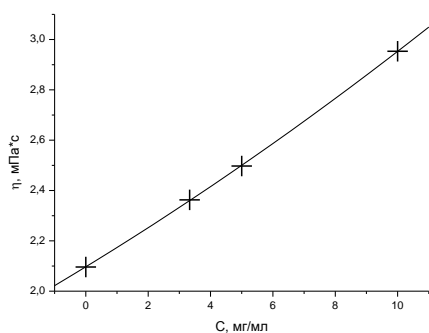
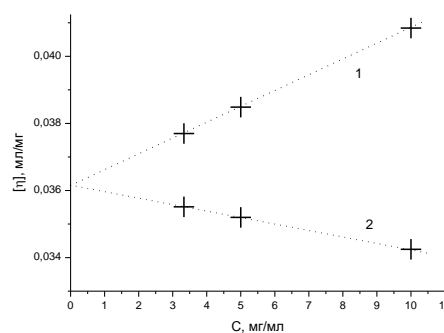


Рисунок 3 – Гистограмма распределения макромолекулярных глобул сополимера $D_{1-x}EC5_x$ с $x = 0.75$ по размерам, измеренная методом динамического светорассеяния в перфтордекалине с использованием анализатора частиц/белков 90Plus_Zeta. D - гидродинамический диаметр глобул

Характеристическая вязкость $[\eta]$ аморфных перфторированных сополимеров определялась с использованием вискозиметра μ VISC производства компании RheoSense (США) по стандартной методике. На Рисунке 4а приведена зависимость измеренной динамической вязкости η растворов сополимера $D_{1-x}E1_x$ ($x = 0.66$) от концентрации C в карбогале при температуре $T = 25$ °С, а на Рисунке 4б – рассчитанные по формулам Хиггинса и Кремера зависимости специфической и относительной вязкости этих растворов от C . Характеристическая вязкость определялась путем экстраполяции кривых Хиггинса и Кремера при $C \rightarrow 0$ и составила $[\eta] = 0.036$ мл/мг, см. Рисунок 4б. В результате проведенных исследований установлено, что молекулярная масса синтезированных сополимеров лежит в пределах $M_w = 2 \times 10^4 \div 7 \times 10^4$ ат. ед.



а)



б)

Рисунок 4 – (а) Зависимость динамической вязкости η растворов сополимера $D_{1-x}E1_x$ с $x = 0.66$ от концентрации C в карбогале. Сплошная линия – аппроксимация полиномом второй степени. (б) Зависимости η_{sp}/C (1, по Хиггинсу) и $\ln(\eta_r)/C$ (2, по Кремеру) от C . Относительная вязкость $\eta_r = \eta/\eta_s$, η_s – вязкость растворителя; специфическая вязкость $\eta_{sp} = \eta_r - 1$. Штриховые линии – линейная аппроксимация методом наименьших квадратов

Исследование оптической прозрачности полимеров проводилось спектрофотометрическим методом. На Рисунке 5а представлен коэффициент пропускания T пленки сополимера $D_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$ в УФ и видимом диапазонах длин волн, а на Рисунке 5б – коэффициент поглощения этого сополимера в ИК области спектра. Из

Рисунка 5а видно, что сополимер не имеет полос поглощения в видимом диапазоне. Интенсивное поглощение наблюдается только в УФ области $\lambda < 200$ нм и в ИК области при $\lambda > 2$ мкм, см. Рисунок 5б.

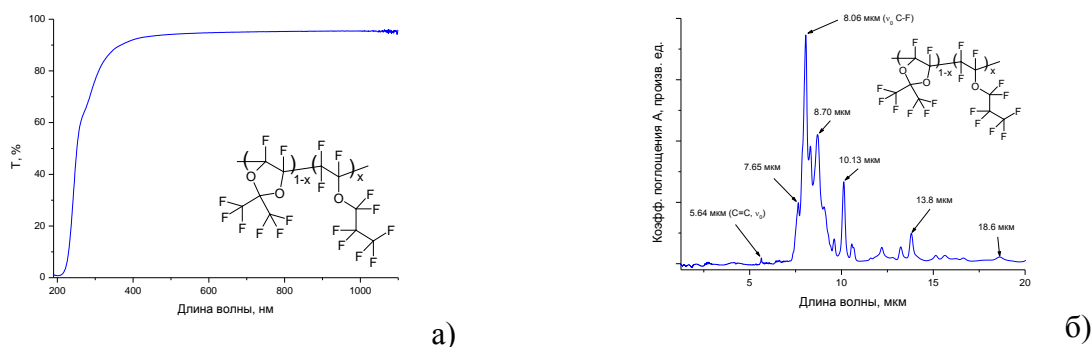


Рисунок 5 – Коэффициенты пропускания T (а) и поглощения A (б) пленок из сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$, сформированных на SiO_2 и KBr подложках, в УФ, видимой и ИК областях спектра, измеренные на спектрофотометрах Cary50 и Shimadzu8400S. На вставках показан фрагмент структуры сополимера.

На Рисунке 6 приведена зависимость показателя преломления n сополимера $D1_{1-x}E1_x$ от молярной концентрации x звеньев эфира $E1$ в макромолекуле. Видно, что сополимер имеет рекордно низкий показатель преломления, который лежит в пределах $n = 1.295 - 1.315$ в зависимости от x .

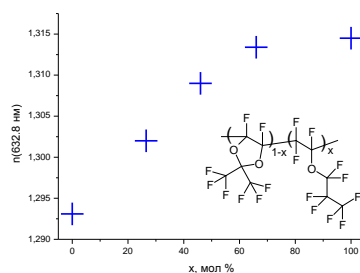


Рисунок 6 – Зависимость показателя преломления n сополимеров $D1_{1-x}E1_x$ на длине волны 632.8 нм от молярной концентрации x звеньев эфира $E1$ в макромолекуле. На вставке показан фрагмент структуры сополимера

Полимеры, синтезированные при сверхвысоком давлении способны к пленкообразованию. На Рисунке 7 представлена фотография пленки из сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$, сформированной методом центрифугирования из раствора на кремниевой подложке с термически выращенным оксидным слоем.

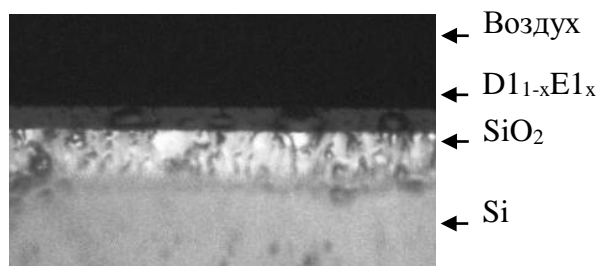


Рисунок 7 – Фотография пленки из аморфного перфторированного сополимера $D1_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$ на кремниевой подложке с оксидным слоем (SiO_2). Вид с торца. Образец получен методом скола

Важной особенностью аморфных перфторированных полимеров является термическая стойкость, определяемая температурой деструкции T_d . На Рисунке 8 представлены результаты исследований термодеструкции сополимера $D3_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$, которые были проведены на совмещенной ТГА/ДСК установке STA PT1000 (Linseis, Германия). Нагрев сополимера проводился в атмосфере азота в Al_2O_3 тигле в интервале температур от 28 до 520 $^{\circ}C$ со скоростью 5 град/мин. Из Рисунка 8 следует, что потеря массы сополимера происходит в два этапа. Первый этап начинается при температуре ≈ 180 $^{\circ}C$ и связан с испарением легколетучих продуктов, содержащихся в материале. На этом этапе сополимер теряет примерно 20% своей массы. Второй этап начинается при ≈ 355 $^{\circ}C$ и обусловлен термической деструкцией макромолекул сополимера. Из Рисунка 8 следует, что температура деструкции сополимера $D3_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$ составляет $T_d = 355$ $^{\circ}C$.

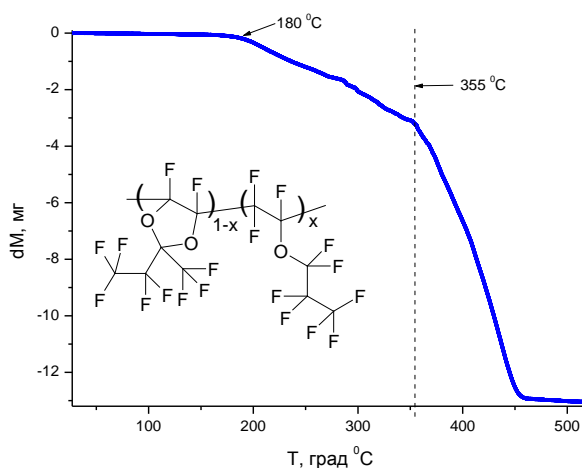


Рисунок 8 – Зависимость массы сополимера $D3_{1-x}E1_x$ с $x = 0.5$ от температуры T , измеренная на совмещенной ТГА/ДСК установке STA PT1000 (Linseis, Германия) при скорости нагрева 5 град/мин. На вставке показан фрагмент структуры сополимера

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 УФ фотолитографию, формирование волноводов из α -фторакриловых мономеров без использования инициаторов радикальной полимеризации, а также лазерное фотоосветление световедущих пленок из полимеров с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи. Формирование брэгговских решеток в полимерных волноводах проводилось методом УФ освещения через фазовую маску под действием излучения гелий-кадмиевого лазера с длиной волны 325 нм.

Изготовление фторполимерных волноводов методом контактной УФ фотолитографии является трехступенчатым процессом. Он включает следующие этапы: формирование на подложке буферного полимерного слоя с более низким показателем преломления n_1 ; формирование на буферном слое световедущих жил волноводов с более высоким показателем преломления путем освещения жидкой способной к фотополимеризации композиции УФ излучением через фотошаблон; заравнивание световедущих жил покровным полимерным слоем с низким показателем преломления n_1 , см. Рисунок 9.

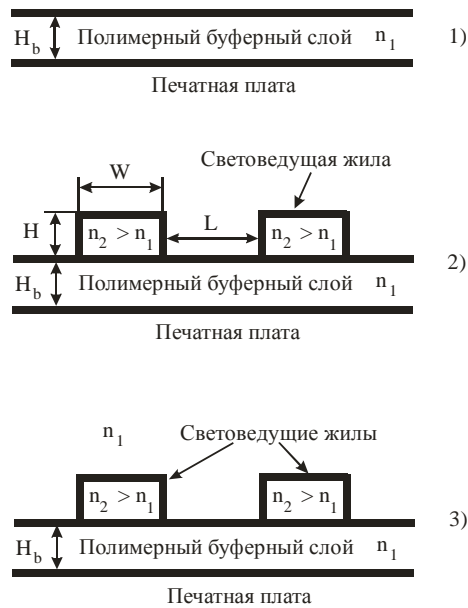


Рисунок 9 – Этапы формирования полимерных волноводов на печатной плате методом контактной УФ фотолитографии. n_1 и n_2 – показатели преломления буферного слоя, покровного слоя и световедущей жилы соответственно, W – ширина, H – высота волновода. H_b – толщина буферного слоя, L – расстояние между волноводами

На Рисунке 10 представлены фотографии волноводов из фторакриловых мономеров, сформированных на поверхности печатной платы и на кремниевой подложке.



Рисунок 10 – Фотографии волноводов, изготовленных из фторсодержащих акриловых мономеров на печатной плате FR4 (а) и на кремниевой подложке (б) методом контактной УФ фотолитографии под действием актинического излучения с длиной волны 365 нм

Данным методом при использовании излучения с длиной волны 250 – 280 нм из фторсодержащих акрилатов были изготовлены массивы оптических волноводов с рекордно высокой степенью упаковки 625 шт./см (см. Рисунок 11), что в 2 раза превосходит степень упаковки в оптической шине «Green Optical Link», разработанной фирмой IBM.

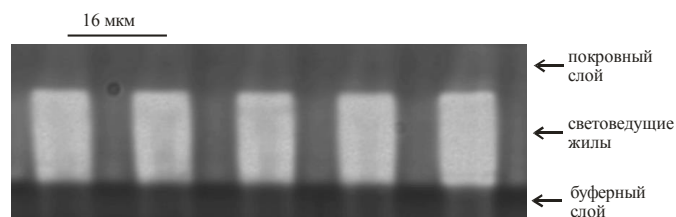


Рисунок 11 – Фотография массива волноводов, сформированных методом фотолитографии под действием излучения с длиной волны 250 – 280 нм. Ширина и высота волноводов равны 10 и 15 мкм, расстояние между волноводами 6 мкм

Процесс формирования полимерных волноводов под действием УФ излучения осуществляется более эффективно, если исходный мономер обладает высокой вязкостью. Поскольку α -фторакриловые мономеры вида $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_2-(\text{CF}_2)_m-\text{CF}_3$, где $m = 0, 1, 3, 5$, характеризуются низкой вязкостью, перед использованием их желательно загустить (приготовить форполимер). Загущение может быть выполнено путем фотополимеризации мономеров без использования каких-либо фотоинициаторов под действием УФ излучения с длиной волны $\lambda < 260$ нм. Действительно, α -фторакриловые мономеры имеют интенсивную полосу поглощения вблизи 207 нм, хвост которой простирается до 260 нм, см. Рисунок 12. Эта полоса поглощения обусловлена электронными переходами в сопряженной системе $\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$ в молекулах мономеров.

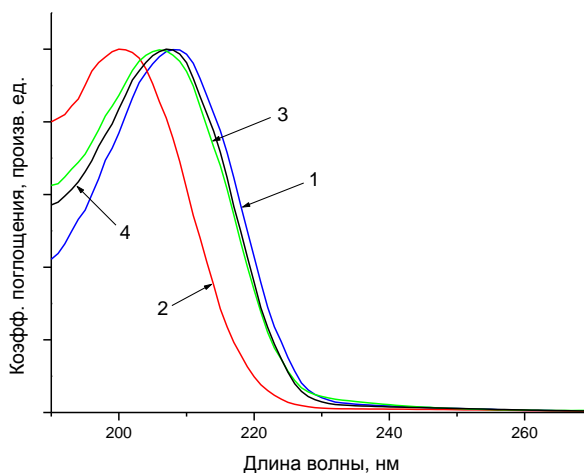
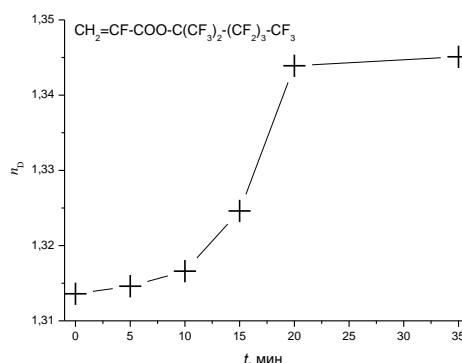
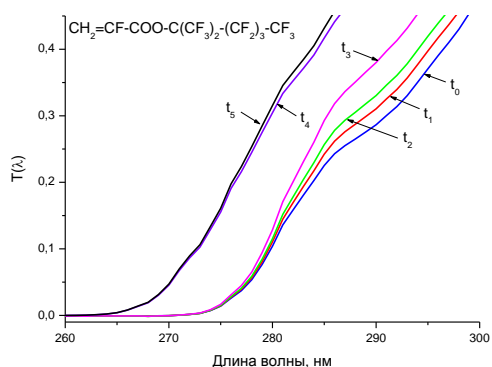


Рисунок 12 – Нормированные коэффициенты поглощения $\alpha(\lambda)$ мономеров $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_2-(\text{CF}_2)_m-\text{CF}_3$ с $m = 0$ (1), 1 (2), 3 (3) и 5 (4) в УФ области спектра

Чтобы определить, возможно ли «само-иницирование» реакции радикальной фотополимеризации в α -фторакрилатах (т.е. запуск реакции под действием УФ света, без добавления в композицию специальных инициаторов) и определить пороговую длину волны для этого процесса, мономеры освещались излучением Хе лампы с использованием полосовых интерференционных светофильтров. Установлено, что полимеризация α -фторакрилатов может быть инициирована светом с длиной волны $\lambda < 260$ нм, что близко к значению $\lambda = 267$ нм, полученному для акрилатов с использованием квантово – химических расчетов. В процессе фотополимеризации, которая сопровождается раскрытием двойных $\text{C}=\text{C}$ связей в молекулах α -фтормономера и их превращением в макромолекулы полимера, происходит уменьшение коэффициента поглощения, что приводит к увеличению глубины проникновения УФ излучения в композицию. На Рисунке 13а представлена зависимость коэффициента пропускания $T(\lambda)$ УФ света через кювету с мономером $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_2-(\text{CF}_2)_3-\text{CF}_3$, а на Рисунке 13б – зависимость показателя преломления n_D этого мономера от времени экспонирования t . Видно, что в процессе полимеризации кривая $T(\lambda)$ смещается в коротковолновую область спектра, что свидетельствует о просветлении композиции. При этом ее показатель преломления возрастает.



а)

б)

Рисунок 13 – Зависимость коэффициента пропускания $T(\lambda)$ УФ света через кварцевую кювету толщиной 1 мм с мономером $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_2-(\text{CF}_2)_3-\text{CF}_3$ (а) и показателя преломления n_D композиции (б) от времени экспонирования t ($t_0 = 0$, $t_1 = 5$ мин, $t_2 = 10$ мин, $t_3 = 15$ мин, $t_4 = 20$ мин, $t_5 = 25$ мин). Экспонирование мономера осуществлялось УФ светом в диапазоне 250 – 260 нм

Увеличение показателя преломления обусловлено усадками композиции, а просветление – раскрытием двойных $\text{C}=\text{C}$ связей в ходе радикальной фотополимеризации. На Рисунке 14 приведены измеренные коэффициенты пропускания $T(\lambda)$ мономера $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_3$ в специально сконструированной микрокювете толщиной ≈ 10 мкм при увеличении времени t экспонирования. Видно, что в ходе полимеризации полоса поглощения с центром вблизи 207 нм исчезает. Это свидетельствует об уменьшении концентрации $\text{C}=\text{C}$ связей в композиции по мере превращения мономера в полимер.

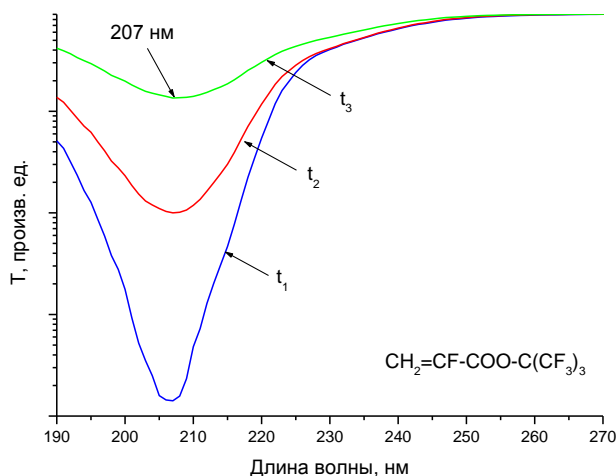


Рисунок 14 – Изменение коэффициента пропускания $T(\lambda)$ мономера $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_3$ в кварцевой микрокювете толщиной 10 мкм в ходе фотополимеризации под действием УФ излучения в диапазоне длин волн 250 – 260 нм. $t_1 < t_2 < t_3$

На Рисунке 15 приведена фотография массива волноводов, изготовленных из α -фторакрилового мономера $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_3$ методом коротковолновой УФ фотолитографии ($\lambda = 250 - 260$ нм) без применения фотоинициатора. Ширина жил и расстояние между ними составляют 50 мкм, высота жил равна 25 мкм. Такие волноводы могут быть использованы для создания интегрально-оптических устройств, например, высокоскоростной оптической шины передачи данных для микропроцессорных вычислительных систем на печатной плате.

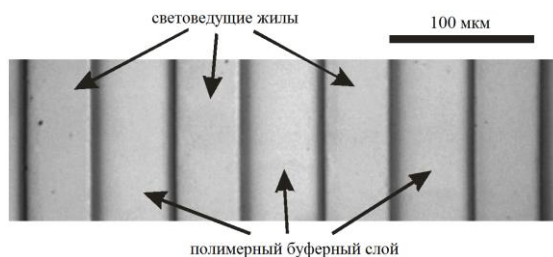


Рисунок 15 – Фотография световедущих жил волноводов, сформированных из α -фторакрилата $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{COO}-\text{C}(\text{CF}_3)_3$ методом УФ фотолитографии ($\lambda = 250\text{-}260$ нм) без использования фотоинициатора. Вид сверху до закрытия жил покровным слоем

Лазерное формирование волноводов в световедущих пленках из электрооптических полимеров с ковалентно присоединенными хромофорами в боковой цепи. В отличие от трёхступенчатого метода контактной УФ фотолитографии, формирование интегрально-оптических волноводов в плёнках из электрооптических (ЭО) полимеров можно осуществить в один этап. Для этого в кооперации с ИОХ РАН был синтезирован ряд новых акриловых полимеров с ковалентно присоединенными фторсодержащими хромофорами в боковой цепи, см. Рисунок 16. Такие полимеры перспективны для создания сверхвысокоскоростных (>100 ГГц) волноводных оптических модуляторов, работающих в С – диапазоне длин волн 1530 – 1565 нм.

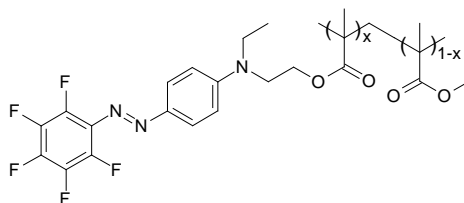


Рисунок 16 – Фрагмент структуры ЭО полимера с фторсодержащим хромофором в боковой цепи. x – молярная концентрация звеньев с ковалентно присоединенным хромофором в макромолекуле полимера

В Главе 3 показано, что воздействие лазерного излучения на ЭО полимеры сопровождается уменьшением показателя преломления n материала, обусловленным необратимой деструкцией фторсодержащего хромофора с потерей окраски (эффект фотоосветления). На основе данного эффекта предложен новый метод формирования канальных волноводов в ЭО полимерах, идея которого иллюстрируется на Рисунке 17. В результате фотоосветления показатель преломления световедущего слоя под свободными от хрома участками 2 фотошаблона уменьшается, что приводит к локализации моды в плоскости световедущей пленки и формированию канальных волноводов. Метод является эффективным и простым, поскольку не требует удаления полимерного материала путем жидкофазного или плазмохимического травления.

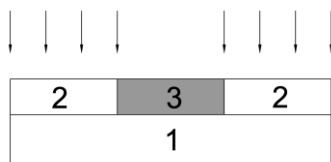


Рисунок 17 – Схема формирования волноводов в ЭО пленке методом лазерного фотоосветления через фотошаблон. 1 – подложка, 2 – освещенные области пленки с более низким показателем преломления (оболочка волновода), 3 – неосвещенная область пленки (световедущая жила). Стрелками показан ход актинического излучения

На Рисунке 18 приведена фотография разветвителя 1×2 , являющегося частью волноводного интерферометра Маха – Цендера, изготовленного данным методом. Максимальная скорость фотоосветления достигается при воздействии на полимер излучением с длиной волны, близкой к центру полосы поглощения хромофора.

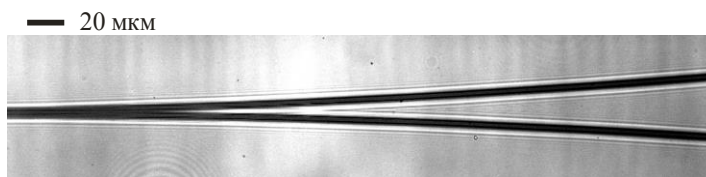


Рисунок 18 – Фотография оптического волноводного разветвителя 1×2 , сформированного в пленке из ЭО полимера методом лазерного фотоосветления

Формирование брэгговских решеток во фторполимерных волноводах. Формирование брэгговских решеток показателя преломления с периодом $d \approx 0.53$ мкм в одномодовых полимерных волноводах, изготовленных из фторакриловых мономеров, проводилось путем освещения волновода лучом He-Cd лазера ($\lambda = 325$ нм) через фазовую маску, см. Рисунок 19. Решетка записывалась в волноводе путем интерференции лучей нулевого и минус первого порядков дифракции. Физический механизм образования решетки заключается в лазерно-индуцированной полимеризации остаточных мономеров и вызванном этим переносе мономеров из темных зон интерференционной картины в освещенные области.

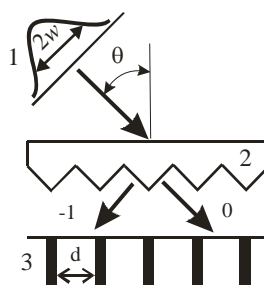


Рисунок 19 – Схема, иллюстрирующая принцип записи брэгговской решетки в полимерном волноводе. 1 – луч He-Cd лазера диаметром $2w$, 2 – фазовая маска, 3 – решетка с периодом d , формируемая в волноводе интерференцией дифрагировавших лучей нулевого (0) и минус первого (-1) порядков. θ - угол падения лазерного луча на маску

На Рисунке 20 представлен общий вид установки для формирования брэгговских решеток, а также фотография дифракции белого света от записанной в волноводе решетки.



а)



б)

Рисунок 20 – (а) Вид установки для формирования субмикронных брэгговских решеток в полимерных волноводах. 1 – He-Cd лазер ($\lambda = 325$ нм, $P = 10$ мВт), 2 – массив полимерных волноводов на кремниевой подложке, 3 – столик, 4 – система фокусировки. (б) Дифракция белого света от решетки с периодом $d = 0.53$ мкм, сформированной в массиве волноводов

Измеренные спектры отражения и пропускания волноводного брэгговского фильтра приведены на Рисунке 21. Видно, что ширина полосы отражения по уровню 0.5 равна $\Delta\lambda = 0.4$ нм, а коэффициент отражения на брэгговской длине волны $\lambda_{\text{БГ}} = 1559.8$ нм составляет $R > 98\%$. Соответствующий провал в спектре пропускания имеет такую же ширину, причем коэффициент пропускания при $\lambda = \lambda_{\text{БГ}}$ составляет $T < 2\%$. Фильтр имеет близкую к прямоугольной форму полосы отражения без боковых лепестков. Это обусловлено аподизацией, т.е. плавным уменьшением коэффициента связи по мере удаления от центра решетки вследствие гауссового распределения интенсивности в луче He-Cd лазера.

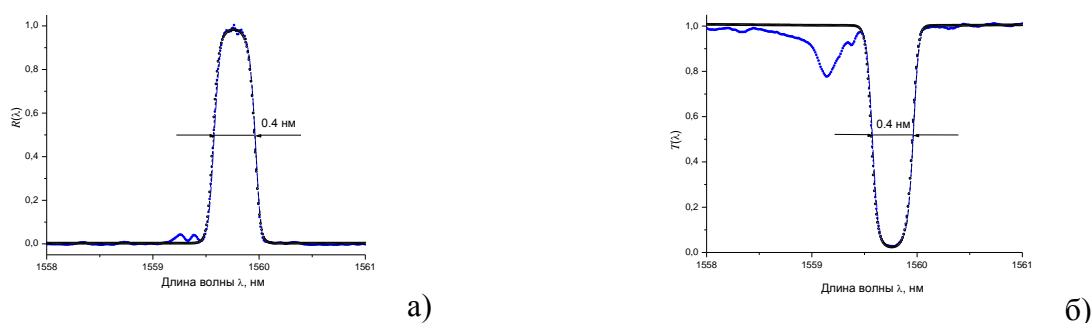


Рисунок 21 – Коэффициент отражения $R(\lambda)$ (а) и пропускания $T(\lambda)$ (б) волноводного брэгговского фильтра (квадратики). Для сравнения кружками показаны расчетные данные для R и T , полученные с использованием теории связанных волн

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 с многоволновым уплотнением каналов, волноводных оптических линий задержки, а также оптоэлектронных печатных плат с высокоскоростной оптической шиной передачи данных на основе массивов полимерных волноводов для микропроцессорных вычислительных систем.

Плавно перестраиваемый аттенуатор. Аттенуатор представляет собой отрезок одномодового кварцевого волокна с боковой полировкой, на поверхность которого нанесен слой фторсодержащего полимера, см. Рисунок 22.

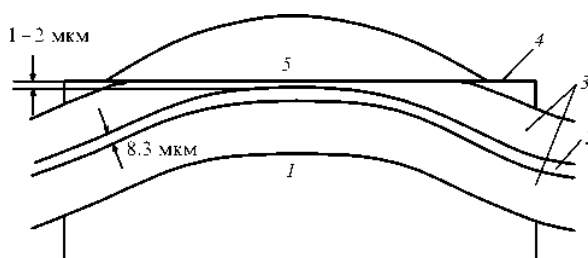


Рисунок 22 – Схема аттенуатора на основе одномодового кварцевого волокна с боковой полировкой. 1 - кварцевый блок; 2 – световедущая жила волокна; 3 - оболочка волокна; 4 - плоскость полировки; 5 - слой фторполимера

Принцип работы устройства основан на изменении условий полного внутреннего отражения для волоконной моды на полированном участке за счет термоиндуцированного изменения показателя преломления n фторполимерного слоя и заключается в следующем. Если n выше, чем эффективный показатель преломления n_{eff} моды, интенсивность излучения с длиной волны 1.55 мкм, проходящего через волокно, уменьшается за счет

туннелирования из световедущей жилы в полимер через тонкий слой кварцевой оболочки в области полировки. При нагреве фторполимера его показатель преломления уменьшается вследствие термооптического эффекта. По мере того, как n становится меньше n_{eff} , происходит восстановление пропускания. При увеличении температуры полимера на 10 град. (от 316 до 326 К) коэффициент пропускания T аттенюатора плавно возрастал от 0.2% до 99.9%, что соответствует глубине модуляции 27 дБ, см. Рисунок 23.

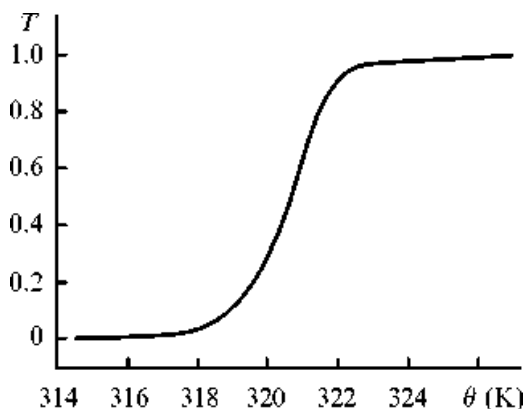


Рисунок 23 – Температурная зависимость коэффициента пропускания T волоконного аттенюатора на длине волны 1.55 мкм. θ - температура полимера в градусах К

Мультиплексоры/демультиплексоры для высокоскоростных волоконно - оптических линий связи. Магистральный путь к повышению скорости передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) состоит в расширении полосы и увеличении числа информационных каналов, которые вводятся в одномодовое кварцевое волокно на передающей станции (мультиплексирование) и разделяются на приемной станции (демультиплексирование). Первоначально оптоволоконные сети, работающие в телекоммуникационном С – диапазоне длин волн 1530 – 1565 нм, поддерживали передачу данных только по нескольким частотным каналам со скоростями 1 – 2.5 Гбит/сек (ширина канала $\delta\lambda = 0.008 - 0.02$ нм) и расстоянием между каналами 200 и 100 ГГц ($\Delta\lambda = 1.6$ и 0.8 нм соответственно), Рисунок 24а. Однако в последнее время прогресс в разработке стабильных одночастотных лазерных источников, модуляторов и оптических усилителей открыл путь к созданию высокоскоростных ВОЛС, пропускающих несколько десятков и даже сотен информационных каналов через каждое волокно со скоростями до 40 Гбит/сек на канал и расстоянием между каналами 50 и 25 ГГц ($\Delta\lambda = 0.4 - 0.2$ нм), см. Рисунок 24б.

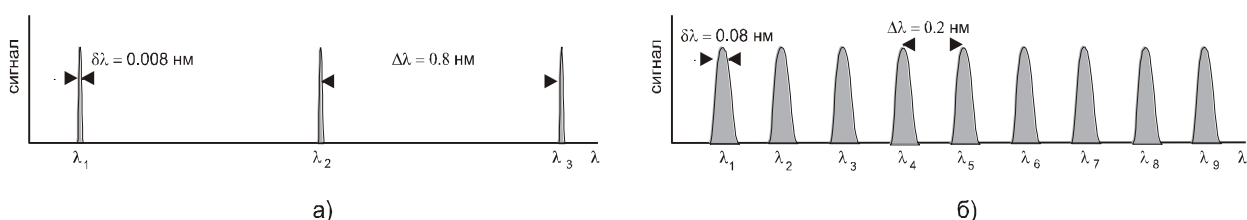


Рисунок 24 – Схема оптических информационных каналов, распространяющихся в одномодовом кварцевом волокне. λ - длина волны, $\delta\lambda$ - ширина канала, $\Delta\lambda$ - расстояние между каналами. (а) Низкоскоростная ВОЛС с шириной полосы 0.008 нм и расстоянием между каналами 0.8 нм. (б) Высокоскоростная ВОЛС с шириной полосы каналов 0.08 нм и расстоянием между каналами 0.2 нм

Для обеспечения доступа к информационному каналу в плотном многоканальном потоке необходимо применять узкополосные (с шириной $\delta\lambda \approx 0.4$ нм) частотно-селективные оптические фильтры, обладающие близкой к прямоугольной формой спектров отражения/пропускания и линейной фазовой характеристикой, Рисунок 25.

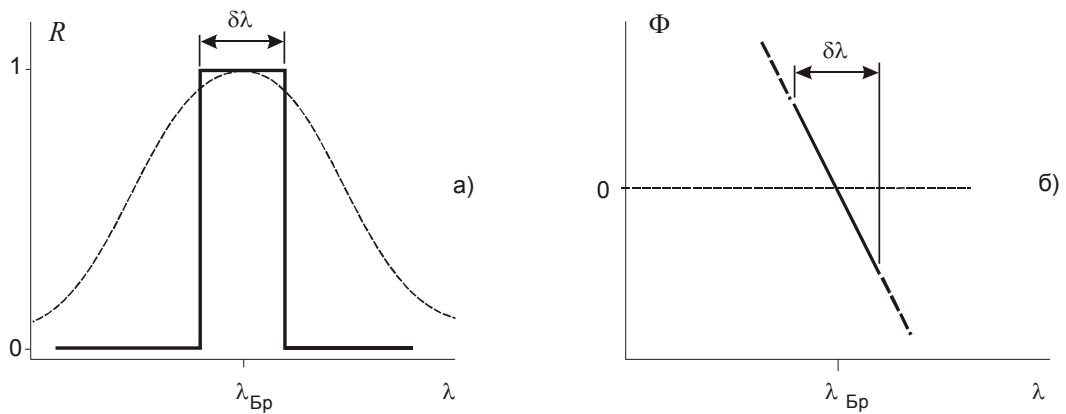


Рисунок 25 – Спектральные характеристики «идеального» оптического фильтра. (а) Коэффициент отражения $R(\lambda)$ имеет прямоугольную форму (сплошная линия). λ_{Br} – центральная брэгговская длина волны фильтра, $\delta\lambda$ - ширина полосы отражения. Для сравнения штриховой линией показан коэффициент отражения фильтра, имеющего гауссову форму спектра отражения. (б) Фаза Φ отраженного оптического сигнала в «идеальном» фильтре линейно зависит от λ

Для создания фильтров с характеристиками, близкими к представленным на Рисунке 25, требуется использовать волноводные брэгговские решетки, имеющие пространственно – модулированную амплитуду и/или фазовые сдвиги. Примером является бигармоническая решетка $n(z)$ с периодом d , синусоидально – модулированной амплитудой

$$n(z) = n_{eff} + \Delta n \sin(2\pi z/D) \times \cos(2\pi z/d + \varphi)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления моды волновода, Δn – амплитуда решетки, D – период модуляции амплитуды, φ - фаза решетки. Вид бигармонической решетки представлен на Рисунке 26, а на Рисунке 27 приведены спектры пропускания и отражения такой решетки, рассчитанные с использованием теории связанных волн. Как видно из Рисунка 27, бигармоническая решетка имеет близкую к прямоугольной форму полосы пропускания шириной $\delta\lambda$, расположенной внутри запрещенной полосы отражения шириной $\Delta\lambda$, и близкую к линейной фазовую характеристику в полосе пропускания решетки.

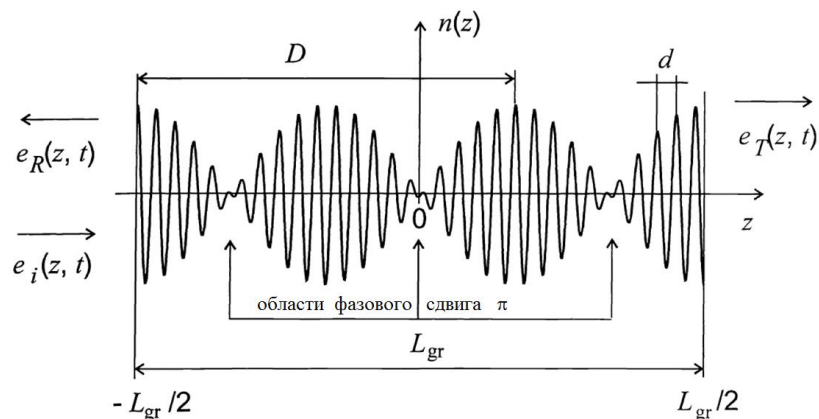


Рисунок 26 – Вид бигармонической брэгговской решетки показателя преломления $n(z)$ с периодом d . $e_i(z, t)$ – падающий на решетку оптический сигнал, $e_R(z, t)$ и $e_T(z, t)$ – отраженный и прошедший сигналы соответственно. L_{gr} – длина решетки. Фазовые сдвиги «пи» расположены при $z = 0, \pm L_{gr}/3$

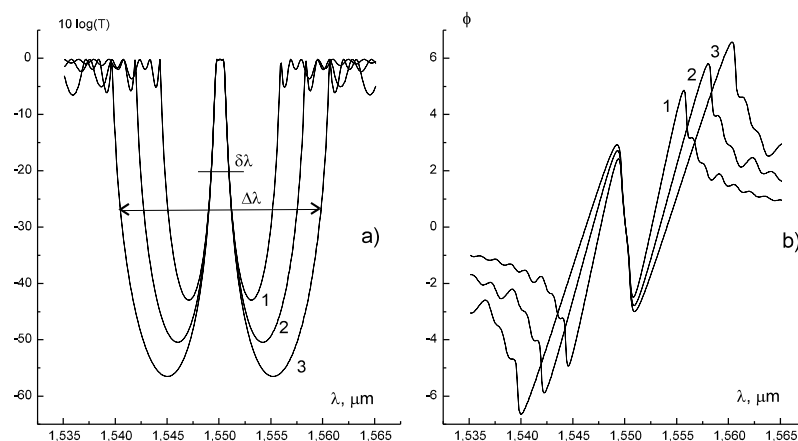


Рисунок 27 – Спектры пропускания бигармонической решетки. Коэффициент пропускания T (а) и фаза ϕ прошедшего через решетку оптического сигнала (б) в зависимости от длины волны λ для решеток с $L_{gr} = 1.5D$ и коэффициентом связи Δ_k . $\delta\lambda$ - ширина полосы пропускания, $\Delta\lambda$ - ширина запрещенной полосы. 1) $L_{gr} = 525$ мкм, $\Delta_k = 0.02$ мкм⁻¹; 2) $L_{gr} = 400$ мкм, $\Delta_k = 0.03$ мкм⁻¹; 3) $L_{gr} = 330$ мкм, $\Delta_k = 0.04$ мкм⁻¹

Архитектура оптического мультиплексора/демультиплексора (М/Д) на основе бигармонических решеток показана на Рисунке 28. Работа М/Д в режиме разделения информационных каналов происходит следующим образом. В общий входной порт Input устройства поступают 4 световых сигнала с несущими длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Эти сигналы по полимерному волноводу достигают левого входного порта интерферометра MZI-1 и через его левый 50% × 50% направленный оптический ответвитель попадают в плечи интерферометра. Период бигармонических брэгговских решеток 1, находящихся в плечах интерферометра MZI-1, настроен на несущую длину волны λ_1 светового сигнала, поэтому сигнал с этой длиной волны проходит через решетки 1 и после интерференции в правом 50% × 50% направленном ответвителе поступает в правый выходной порт. В то же время сигналы с длинами волн $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ отражаются от решеток 1 и через левый 50% × 50% ответвитель поступают в правый входной порт интерферометра MZI-2. Период решеток, находящихся в плечах интерферометра MZI-2, настроен на частоту светового сигнала с несущей длиной волны λ_2 , поэтому этот сигнал проходит через интерферометр MZI-2 и поступает в его левый выходной порт, а сигналы с длинами волн λ_3, λ_4 отражаются и через правый выходной порт поступают в левый входной порт интерферометра MZI-3, и т.д. Высокий уровень изоляции разделяемых по частоте оптических сигналов (согласно расчетам >30 дБ) в устройстве обеспечивается близкой к прямоугольной формой полосы пропускания бигармонических решеток.

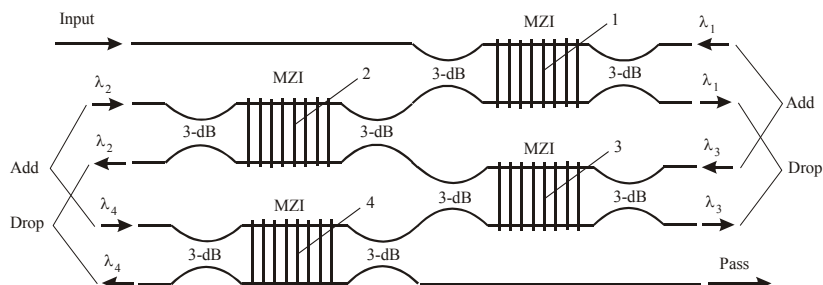


Рисунок 28 – Архитектура М/Д на основе волноводных интерферометров Маха-Цендера (MZI) с бигармоническими брэгговскими решетками. 1, 2, 3, 4 - решетки. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – несущие длины волн в многоканальном информационном потоке. Стрелками показаны направления распространения световых сигналов в режиме мультиплексирования (Add) и демультиплексирования (Drop). 3-dB – направленные 50% × 50% волноводные ответвители

Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах. Современное развитие микропроцессорных вычислительных систем от персональных компьютеров до супер-ЭВМ характеризуется постоянным повышением объемов и скоростей передачи и обработки данных. Это достигается за счет уменьшения размеров при одновременном увеличении числа элементов на кремниевом чипе, повышения тактовой частоты процессоров, а также за счет объединения нескольких процессоров в единый вычислительный модуль на печатной плате. В настоящее время скорости передачи данных между процессорами по металлическим проводникам практически вышли на физический предел, составляющий ≈ 10 Гбит/сек. Дальнейшее увеличение быстродействия ЭВМ требует создания оптоэлектронных печатных плат, в которых электрическая шина на основе металлических проводников дополнена оптической шиной, в которой данные передаются от одного процессора к другому по полимерным волноводам с помощью оптических импульсов. Принципиальными преимуществами оптических волноводов по отношению к металлическим проводникам являются: на несколько порядков большая ширина полосы пропускания (до 100 ГГц на канал и более), низкий уровень рассеиваемой мощности даже при высоких тактовых частотах, отсутствие емкостных задержек и нечувствительность к электромагнитным помехам. При использовании технологии частотного уплотнения оптических информационных каналов, пропускная способность полимерных волноводов может быть увеличена до 1 Тбит/сек и более. Использование оптических шин позволит не только значительно увеличить скорость передачи данных между процессорами, но также снизить размеры и вес, обеспечить повышенную надежность работы радиоэлектронной аппаратуры. Схема, поясняющая принцип функционирования полимерной оптической шины, приведена на Рисунке 29. Данные, возвращаемые процессором (СБИС), в виде электрических сигналов поступают на вход микролазера (например, полупроводникового лазера с вертикальным выводом излучения), который преобразует их в оптические импульсы. Эти импульсы по полимерному волноводу, расположенному на печатной плате, передаются на фотоприемник, который преобразует их в электрические сигналы. Далее эти сигналы передаются другому процессору.

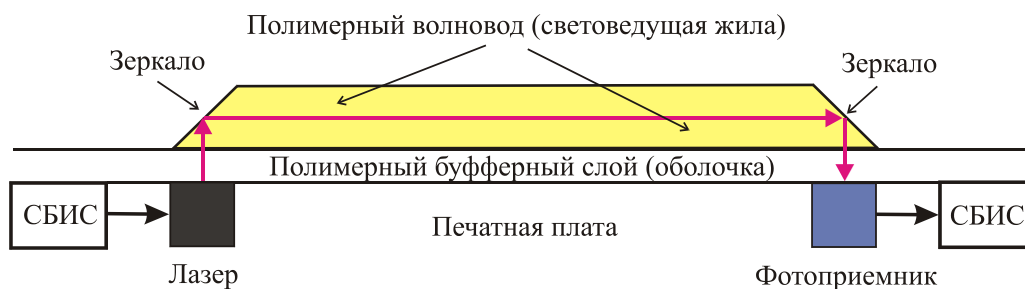


Рисунок 29 – Схема оптической шины для связи между процессорами (СБИС) на печатной плате. Полимерные волноводы со скошенными под углом 45 град торцами обеспечивают соединение с вертикально излучающими лазерами (Лазер) и фотоприемниками (Фотоприемник). Жирными стрелками показан ход оптических сигналов

Совместно с НИИСИ РАН впервые в России была изготовлена оптоэлектронная печатная плата с фторполимерной оптической шиной передачи данных. Шина имеет 12 каналов передачи оптических сигналов со скоростями 3 Гбит/с на канал и суммарной скоростью 36 Гбит/сек. Фотография макетного образца платы на сборочном стенде представлена на Рисунке 30а, а на Рисунке 30б дана фотография этой платы в кейсе компьютера.

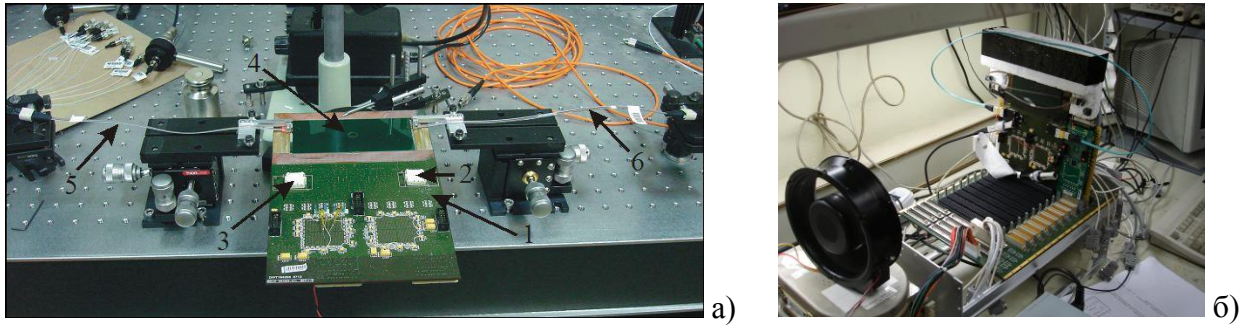


Рисунок 30 – Оптоэлектронная печатная плата с оптической шиной передачи данных на сборочном стенде (а) и в кейсе компьютера (б). 1 – печатная плата, 2 и 3 – BGA разъемы для подключения оптических передатчиков (трансиверов), 4 – массив из 12 полимерных волноводов, 5 и 6 – многожильные волоконно-оптические кабели

В **Главе 5** приводятся результаты по разработке методик и созданию двух научных приборов для исследования оптических свойств полимерных материалов: 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. Даны примеры использования этих приборов для определения оптических параметров фторсодержащих мономеров и полимеров.

Спектроскопический рефрактометр. Блок-схема рефрактометра приведена на Рисунке 31. Определение показателя преломления $n(\lambda)$ вещества на рефрактометре производится следующим образом. Монохроматор 5 выделяет из широкого спектра лампы 6 излучение с длиной волны λ и спектральной шириной $\Delta\lambda$, которая определяется шириной раскрытия щелей монохроматора. Это излучение направляется на исследуемый объект, расположенный на измерительной призме 2 рефрактометра 1, через многожильный волоконно – оптический кабель (ВОК) 4, причем для измерения $n(\lambda)$ жидкостей на призму рефрактометра устанавливается специальная кювета. Цифровая камера – окуляр 3 передает изображение перекрестия, границы света и тени, отсчетного штриха и шкалы n_D на монитор персонального компьютера (ПК) 8.

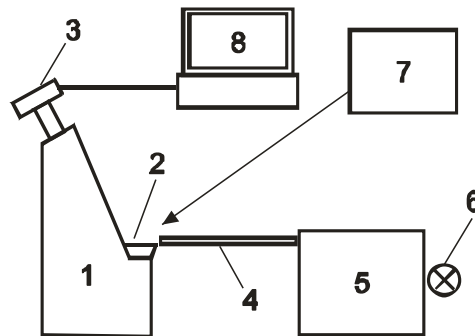


Рисунок 31 – Блок-схема спектроскопического рефрактометра. 1 – корпус, 2 – измерительная призма, 3 – камера-окуляр, 4 – волоконно-оптический кабель (ВОК), 5 – монохроматор, 6 – лампа накаливания, 7 – термостат, 8 – ПК. Освещение образца производится монохроматическим светом, который распространяется вдоль рабочей грани измерительной призмы (схема освещения по Пульфриху)

Отсчет по шкале n_D пересчитывается в угол β , который предельный луч образует с нормалью к выходной грани измерительной призмы, с использованием соотношения

$$\sin(\beta) = \pm n_D \cos(\alpha) \mp \sqrt{N_D^2 - n_D^2} \sin(\alpha) \quad ,$$

где N_D – показатель преломления измерительной призмы на длине волны 589.3 нм, α – преломляющий угол призмы. С учетом найденного угла β и дисперсионной зависимости N_λ материала призмы показатель преломления исследуемого вещества n_λ на длине волны λ определяется по формуле

$$n_\lambda = \sqrt{N_\lambda^2 - \sin^2(\beta)} \sin(\alpha) \pm \sin(\beta) \cos(\alpha) .$$

На Рисунке 32 показана фотография созданного рефрактометра, а на Рисунке 33 – вид перекрестия, границы света и тени, отсчетного штриха и шкалы n_D в поле зрения камеры-окуляра при подсветке по схеме Пульфриха на различных длинах волн λ . Созданная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель.

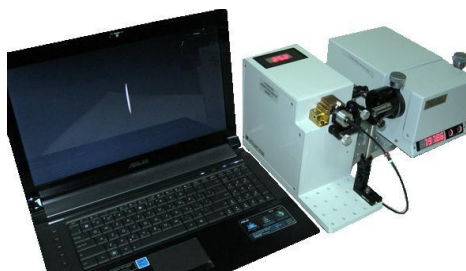


Рисунок 32 – Внешний вид спектроскопического рефрактометра. Справа налево: монохроматор, блок рефрактометра с ВОК подсветки, ПК

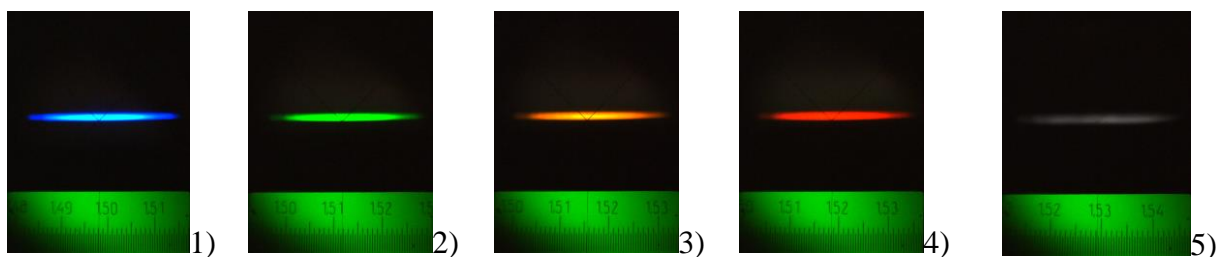


Рисунок 33 – Вид перекрестия, границы света и тени, отсчетного штриха и шкалы n_D в поле зрения камеры - окуляра при освещении эталонного стеклянного образца монохроматическим светом по схеме Пульфриха. $\lambda = 450$ нм, $\Delta\lambda = 0.2$ нм (1); 545 нм, 0.05 нм (2); 589.3 нм, 0.05 нм (3); 632.8 нм, 0.05 нм (4); 1150 нм, 1 нм (5)

Дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ ряда фторсодержащих акриловых мономеров, измеренные на спектроскопическом рефрактометре при 20 °С, представлены на Рисунке 34.

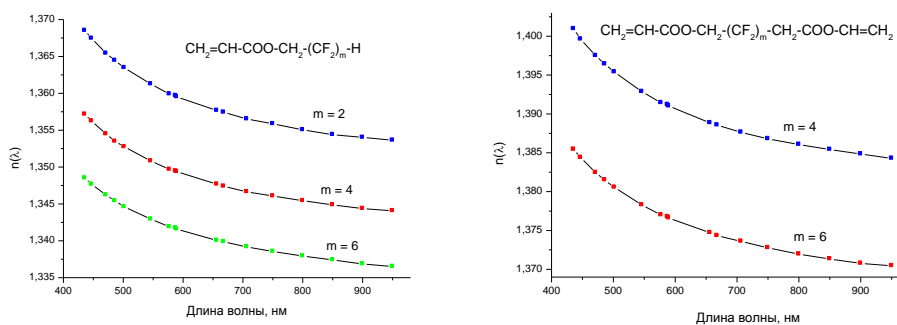


Рисунок 34 – Дисперсионные зависимости $n(\lambda)$ ряда фторакриловых мономеров, измеренные на спектроскопическом рефрактометре

Спектроскопическое призмное устройство связи. Оптические параметры полимерных пленок (показатель преломления, коэффициент экстинкции) могут существенно отличаться от таковых для объемных материалов. Кроме того, пленки могут быть анизотропными и неоднородными по толщине. Это обусловлено особенностями взаимодействия макромолекул полимера с подложкой, на которой формируется пленка, и часто приводит к их преимущественной ориентации либо вдоль, либо поперек пленки, образованию пор и изменению плотности материала в направлении, перпендикулярном плоскости пленки. Поэтому важное значение имеет разработка методов измерения оптических параметров полимерных пленок и тонкопленочных волноводных структур.

Одним из наиболее точных методов измерения оптических параметров световедущих пленок является метод резонансного возбуждения волноводных мод с использованием призмы связи, реализуемый в геометрии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Суть метода состоит в том, что исследуемая пленка приводится в оптический контакт с рабочей гранью измерительной призмы, имеющей высокий показатель преломления N_p , и освещается со стороны призмы монохроматическим световым пучком. Для лучей, падающих на границу призмы с пленкой под углами θ_m , для которых выполняется условие синхронизма $N_p \sin \theta_m = \beta_m$, $m = 0, 1, 2, \dots$, где β_m – эффективный показатель преломления волноводной моды с номером m , условие полного внутреннего отражения нарушается и свет может проникать в пленку, возбуждая в ней соответствующую моду. При этом в угловой зависимости коэффициента отражения $R(\theta)$ светового пучка от рабочей грани призмы наблюдаются резкие и узкие минимумы, т.н. «темные» m - линии. Если известны два модовых угла θ_m , то, зная N_p , можно рассчитать β_m и, решив систему дисперсионных уравнений для волноводных мод, определить два неизвестных параметра: показатель преломления n_f и толщину H_f пленки.

Реализованные на практике методы призмного возбуждения волноводных мод в световедущей пленке имеют ряд недостатков. Во-первых, они позволяют измерять только показатель преломления n и толщину H_f пленки, но не ее коэффициент экстинкции m . Это обусловлено тем, что известные методы принимают во внимание только угловые положения m - линий, но не их угловую ширину в зависимости $R(\theta)$. Во-вторых, они могут быть использованы лишь для структур с небольшим числом слоев (как правило, не более двух). В-третьих, эти методы не принимают во внимание угловую расходимость зондирующего лазерного пучка, что может существенно снизить точность измерений.

В диссертационной работе представлены оригинальные методы использования призмного возбуждения волноводных мод для измерения показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины слоев в тонкопленочных структурах, которые содержат до 10 слоев, обладают анизотропией и неоднородностями по толщине пленки. Эти методы принимают во внимание угловую расходимость лазерного пучка и позволяют измерять параметры как диэлектрических, так и тонких металлических пленок.

В настоящее время в мире существуют две фирмы, которые коммерчески выпускают призмные устройства связи. Приборы Metricon-2010M и SPA-4000, производимые компаниями Metricon Corp. (США) и Sairon Technology Inc. (Южная Корея) соответственно, позволяют измерять толщину и показатель преломления тонкопленочных структур только на нескольких фиксированных длинах волн в видимой и ближней ИК области спектра. Значения этих длин волн определяются типом используемых лазеров и лежат в пределах от 400 до 1600 нм. Кроме того, данные устройства работают только в пределе «слабой» связи, не позволяют определять коэффициент экстинкции пленок и не способны анализировать тонкопленочные структуры с количеством слоев более двух.

Для преодоления указанных недостатков было создано спектроскопическое призмное устройство связи, которое дает возможность определять не только толщину

H_i , показатель преломления n_f и дисперсию $dn_f/d\lambda$ тонкопленочных структур на любой длине волны света в диапазоне 400 – 1000 нм, но и коэффициент экстинкции пленок как в случае «слабой», так и в случае «сильной» связи. Расширение функциональных возможностей устройства достигнуто путем применения новых технических решений, а также разработкой собственных математических алгоритмов расчета для определения оптических параметров тонких пленок из угловых зависимостей коэффициентов отражения для ТЕ и ТМ поляризации зондирующего светового пучка. Оптическая схема устройства приведена на Рисунке 35, где стрелками показан ход световых лучей.

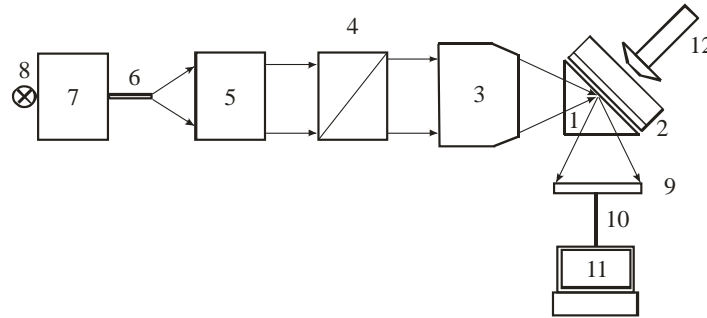


Рисунок 35 – Схема призмного устройства связи. 1 – измерительная призма, 2 – исследуемая пленка, 3 – объектив, 4 – призма Глана, 5 – коллиматор, 6 - волоконно-оптический кабель, 7 – монохроматор, 8 - лампа накаливания, 9 - CCD матрица, 10 – USB кабель, 11 – ПК, 12 - пневматический толкатель

Принцип работы устройства состоит в следующем. Исследуемая тонкопленочная структура 2 приводится в оптический контакт с гипотенузной гранью измерительной призмы 1 посредством пневматического толкателя 12. В области оптического контакта зазор между призмой и пленкой составляет $H_i \leq \lambda/2$ (типично 20 – 200 нм). Область оптического контакта освещается со стороны призмы сходящимся монохроматическим пучком световых лучей с длиной волны λ и спектральной шириной $\delta\lambda$ с помощью волоконно-оптического кабеля 6, присоединенного к выходной щели монохроматора 7, коллиматора 5, поляризационной призмы Глана 4 и микроскопического объектива 3. Отраженный от области оптического контакта призмы с пленкой пучок световых лучей регистрируется фоточувствительной матрицей 9, соединенной USB кабелем 10 с ПК 11. На Рисунке 36 показан вид m -линий в поле зрения матрицы при освещении пленки SiO, нанесенной на кварцевую подложку, сходящимся ТЕ поляризованным пучком света.

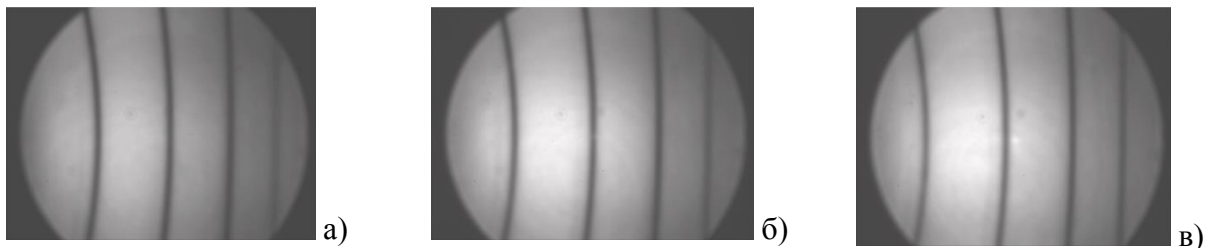


Рисунок 36 – Вид поля зрения CCD матрицы при освещении пленки SiO сходящимся ТЕ поляризованным пучком света с длиной волны $\lambda = 675$ нм (а), 700 нм (б) и 725 нм (в)

Нормируя распределение интенсивности света на матрице на соответствующее распределение в отсутствие образца, получаем зависимость интенсивности света в поперечном сечении отраженного луча от номера пикселя N_{pix} , см. Рисунок 37. Из этой зависимости, путем решения обратной задачи с использованием разработанных математических моделей и алгоритмов, определяются оптические параметры пленки.

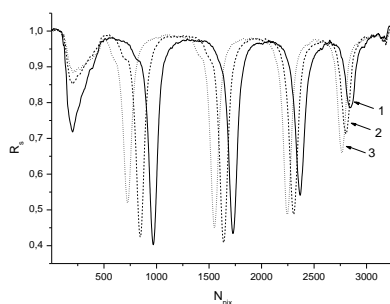


Рисунок 37 – Распределение интенсивности отраженного света $R(N_{\text{pix}})$ в поперечном сечении отраженного луча. $\lambda = 675$ (1), 700 (2), 725 нм (3). N_{pix} – номер пикселя матрицы

Вид призмного устройства связи дан на Рисунке 38. Устройство не содержит движущихся деталей, что делает его простым и надежным в работе, обеспечивает точность измерения n_f на уровне $\pm 2 \times 10^{-4}$ и точность измерения H_f на уровне $\pm 1\%$.

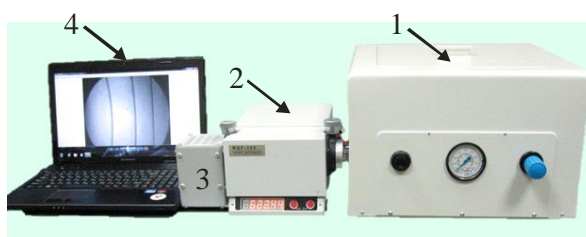


Рисунок 38 – Внешний вид спектроскопического призмного устройства связи. 1 – оптический блок, 2 – монохроматор, 3 - источник света, 4 – ПК

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы, дан список научных публикаций автора, на основе которых написана диссертация. В ходе проведенных работ были созданы новые оптические материалы на основе аморфных полностью фторированных полимеров, разработаны новые лазерные методы формирования полимерных элементов фотоники, создана оптоэлектронная печатная плата для микропроцессорных вычислительных устройств, разработаны спектроскопические методы и алгоритмы измерения оптических параметров световедущих пленок и многослойных волноводных структур из фторполимерных материалов.

Представленная диссертация является законченным научным исследованием, направленным на решение актуальных проблем интегральной оптики. Получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как создание в Российской Федерации нового научного направления «Фторполимерная интегральная оптика».

Результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Главы в коллективных монографиях

A1. **Соколов В.И.**, Панченко В.Я. Создание элементной базы устройств для высокоскоростных теле- и дата-коммуникаций на основе субмикронных лазерных технологий // В сборнике «Пути Ученого. Е.П. Велихов», М.: РНЦ «Курчатовский институт». – 2007. – С. 421.

A2. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Игумнов С.М., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Китай М.С., Савельев А.Г., Семиногов В.Н., Тютюнов А.А., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. Перспективные полимерные материалы и методы создания элементной базы высокоскоростных интегрально-оптических устройств // Современные лазерно-информационные технологии. Коллективная монография под ред. Академика В.Я. Панченко и профессора Ф.В. Лебедева. М.: Интерконтакт Наука. – 2014. – 959 с. – С. 841.

A3. Фторполимерные материалы / Коллективная монография. Отв. ред. Акад. В.М. Бузник. Томск: Изд-во НТЛ. – 2017. – 600 с.

Статьи в научных журналах

- А4. **Соколов В.И.**, Гордеева О.Ю., Горячук И.О., Молчанова С.И., Полунин Е.В. Сополимеры перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксида и перфторнонилвинилового эфира для изготовления световедущих покрытий // Фторные заметки. – 2023. – № 1. – С. 1.
- А5. **Соколов В.И.**, Горячук И.О., Молчанова С.И., Полунин Е.В. Исследование оптических свойств аморфных сополимеров перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксида и перфтор-(2-циклопентил)-этилвинилового эфира, полученных при сверхвысоком давлении // Фторные заметки. – 2022. – № 5(144). – С. 3.
- А6. **Соколов В.И.**, Горячук И.О., Давыдова Н.К., Молчанова С.И., Полунин Е.В., Сергеев В.Н. Фторсодержащие акриловые полимеры с электрооптическим хромофором DR1 в боковой цепи // Фторные заметки. – 2022. – № 6(145). – С. 1.
- А7. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Горячук И.О., Панченко В.Я. Высокоскоростная коммутация сигналов в оптической шине передачи данных на печатной плате // Успехи кибернетики. – 2022. – Т. 3. - № 4. – С. 7.
- А8. **Соколов В.И.**, Горячук И.О., Замятин А.А., Маковецкий А.А., Ряховский Д.В. Оптические свойства высокоапертурных кварцевых волокон с оболочкой из аморфных перфторированных полимеров // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – № 7. – С. 620.
- А9. Ахманов А.С., **Соколов В.И.**, Панченко В.Я. Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах для микропроцессорных вычислительных систем // Успехи кибернетики. – 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 21.
- А10. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Горячук И.О., Молчанова С.И., Полунин Е.В. Рефракция аморфных сополимеров перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксида и перфторпропилвинилового эфира в телекоммуникационных диапазонах длин волн вблизи 1300 и 1550 нм // Фторные заметки. – 2021. - № 6(139). - С. 5.
- А11. Погодина Ю.Е., Полунин Е.В., Молчанова С.И., **Соколов В.И.**, Ярош А.А., Заварзин И.В. Синтез и исследование свойств перфторированного сополимера перфтор-2-метил-2-этилдоксида и перфтор-н-пропилвинилового эфира // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2020. – № 11. – С. 2177.
- А12. Глебов В.Н., Горячук И.О., Дуброва Г.А., Малютин А.М., **Соколов В.И.** Оптические свойства плёнок из сложных фторидов, полученных методом электронно-лучевого испарения // Оптический журнал. – 2020. – Т. 87. – № 2. – С. 64.
- А13. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Ашарчук И.М., Горячук И.О., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В., Хайдуков К.В. Фторсодержащие акриловые полимеры с фторсодержащими электрооптическими хромофорами в боковой цепи // Фторные заметки. – 2020. – № 2(129). – С. 1.
- А14. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Горячук И.О., Малышев О.Р., Молчанова С.И., Полунин Е.В., Ярош А.А. Увеличение оптической прозрачности аморфных сополимеров перфторированных диоксилов и виниловых эфиров с использованием дифторида ксенона // Фторные заметки. – 2019. – № 5(126). – С. 7.
- А15. **Соколов В.И.**, Горячук И.О., Заварзин И.В., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В., Ярош А.А. Новые сополимеры перфторированного 2-метил-2-этилдоксида и перфторвинилового эфира, обладающие низким, немонотонно меняющимся показателем преломления // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2019. – № 3. – С. 559.
- А16. **Соколов В.И.**, Битюрин Н.М., Молчанова С.И., Пикулин А.В., Тютюнов А.А., Игумнов С.М. Формирование полимерных волноводов из α -фторакрилатов под действием УФ излучения без использования фотоинициатора // Фторные заметки. – 2018. – № 1(116). – С. 7.
- А17. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Василенко Е.С., Горячук И.О., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В. Синтез и исследование оптических свойств фторсодержащего хромофора дисперсный оранжевый DO1 // Фторные заметки. – 2018. – № 5(120). – С. 1.

- A18. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Ашарчук И.М., Горячук И.О., Заварзин И.В., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В. Лазерное формирование световодов в электрооптических полимерах с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи // Фторные заметки. – 2018. – № 6(121). – С. 5.
- A19. Назаров М.М., Глебов В.Н., Горячук И.О., Дуброва Г.А., Малютин А.М., **Соколов В.И.** Метод измерения электрооптического отклика хромофоров в полимерной пленке с помощью призмного устройства связи // Приборы и техника эксперимента. - 2018. - № 1. - С. 92.
- A20. Полунин Е.В., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., **Соколов В.И.**, Заварзин И.В. Гомо- и сополимеризация перфторизопротилвинилового эфира при высоком давлении // Фторные заметки. – 2017. – № 5(114). – С. 5.
- A21. **Соколов В.И.**, Бойко В.Э., Горячук И.О., Игумнов С.М., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., Полунин Е.В. Синтез и исследование оптических свойств сополимеров перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксида и перфторпропилвинилового эфира // Известия академии наук. Серия химическая. – 2017. – Т. 66. – № 7. – С. 1284.
- A22. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Ашарчук И.М., Горячук И.О., Хайдуков К.В., Назаров М.М. Формирование канальных оптических волноводов в полиметилметакрилате с внедренным электрооптическим хромофором DR13 методом фотоосветления // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 122. – № 3. – С. 483.
- A23. Ашарчук И.М., Марусин Н.В., Молчанова С.И., Савельев А.Г., **Соколов В.И.**, Хайдуков Е.В., Панченко В.Я. Спектроскопическое призмное устройство связи для измерения показателя преломления и толщины диэлектрических пленок // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 4. – С. 456.
- A24. Назаров М.М., Хайдуков К.В., **Соколов В.И.**, Хайдуков Е.В. Лазерное формирование брэгговских решёток в нанокompозитных полимерных материалах // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 1. – С. 29.
- A25. Сотский А.Б., Парашков С.О., **Соколов В.И.**, Сотская Л.И. Расчет дифракционного поля в слоистой среде, освещаемой через фазовую маску // Оптика и спектроскопия. - 2016. - Т. 121. - № 6. - С. 983.
- A26. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Ашарчук И.М., Игумнов С.М., Молчанова С.И., Нечаев А.В., Савельев А.Г., Тютюнов А.А., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. Интегральная оптика на основе нанокompозитных полимерных материалов // Вестник РФФИ. – 2015. – № 4. – С. 68.
- A27. Бойко В.Э., Тютюнов А.А., Синько А.В., Игумнов С.М., Хайдуков Е.В., **Соколов В.И.** Синтез и некоторые свойства третичных перфторированных эфиров α -фторакриловой кислоты // Фторные заметки. – 2015. – № 5(102). – С. 5.
- A28. **Соколов В.И.**, Глебов В.Н., Малютин А.М., Молчанова С.И., Хайдуков Е.В., Панченко В.Я. Исследование оптических свойств многослойных диэлектрических структур методом призмного возбуждения волноводных мод // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – № 9. – С. 868.
- A29. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Ашарчук И.М., Бузник В.М., Игумнов С.М., Тютюнов А.А., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. Интегральная оптика на основе фторсодержащих полимерных материалов // Известия ВУЗов. Физика. - 2015. - Т. 58. - № 8/3. - С. 279.
- A30. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Игумнов С.М., Марусин Н.В., Тютюнов А.А., Хайдуков К.В., Бузник В.М. Рефракция фторсодержащих α -фторакрилатов в «датакоммуникационной» области длин волн вблизи 0.85 мкм // Известия ВУЗов. Физика. - 2015. - Т. 58. - № 8/3. - С. 245.
- A31. Хайдуков К.В., Ашарчук И.М., Хайдуков Е.В., **Соколов В.И.** Формирование и определение характеристик оптических полимерных волноводов в фоточувствительном полимере // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 8/2. – С. 280.
- A32. **Соколов В.И.**, Марусин Н.В., Молчанова С.И., Савельев А.Г., Хайдуков Е.В., Панченко В.Я. Отражение ТЕ поляризованного гауссова пучка от слоистой структуры в

- условиях резонансного возбуждения волноводных мод // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – № 11. – С. 1048.
- A33. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Игумнов С.М., Молчанова С.И., Савельев А.Г., Тютюнов А.А., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. Разработка элементной базы высокоскоростных интегрально-оптических устройств на основе новых полимерных материалов // Вестник РФФИ. – 2014. – № 3. – С. 78.
- A34. **Sokolov V.I.**, Savelyev A.G., Bouznik V.M., Igumnov S.M., Khaydukov E.V., Molchanova S.I., Tuytuynov A.A., Akhmanov A.S., Panchenko V.Ya. Refractive index and dispersion of highly-fluorinated acrylic monomers in the 1.5 μm telecom wavelength region measured with a spectroscopic Abbe refractometer // Measurement Science and Technology. – 2014. – V. 25. – № 7. - P. 077001.
- A35. **Соколов В.И.**, Ахманов А.С., Игумнов С.М., Людвигсен Х., Панченко В.Я., Савельев А.Г., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В. Формирование массивов фторполимерных волноводов, обладающих высокой степенью интеграции, на печатной плате // Перспективные материалы. – 2013. – № 14. – С. 249.
- A36. **Соколов В.И.**, Марусин Н.В., Панченко В.Я., Савельев А.Г., Семиногов В.Н., Хайдуков Е.В. Определение показателя преломления, коэффициента экстинкции и толщины тонких пленок методом возбуждения волноводных мод // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – № 12. – С. 1149.
- A37. **Соколов В.И.**, Игумнов С.М., Нечаев А.В., Панченко В.Я., Савельев А.Г., Тютюнов А.А., Хайдуков Е.В., Хайдуков К.В. Исследование оптических свойств композитных полимерных материалов методами спектроскопической рефрактометрии и призмного возбуждения волноводных мод // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56. - № 9/2. – С. 83.
- A38. **Соколов В.И.**, Китай М.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Семиногов В.Н., Хайдуков Е.В. Спектроскопический рефрактометр-профилометр для измерения показателя преломления, дисперсии и толщины диэлектрических пленок методом возбуждения волноводных мод // Перспективные материалы. – 2013. – № 14. – С. 267.
- A39. **В.И. Соколов**, А.С. Ахманов, С.М. Игумнов, В.Я. Панченко, А.Г. Савельев, А.А. Тютюнов, Е.В. Хайдуков. Достижения и перспективы интегральной оптики на основе новых фторсодержащих полимерных материалов // Известия ВУЗов. Физика – 2013. – Т. 56. - № 9/2. – С. 81.
- A40. **Соколов В.И.**, Панченко В.Я., Семиногов В.Н. Измерение градиента показателя преломления по толщине диэлектрической пленки методом возбуждения волноводных мод // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – № 8. – С. 739.
- A41. Игумнов С.М., **Соколов В.И.**, Меньшиков В.К., Мельник О.А., Бойко В.Э., Дяченко В.И., Никитин Л.Н., Хайдуков Е.В., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Фторсодержащие мономеры и полимеры со специальными свойствами для интегральной оптики и фотоники // Доклады Академии наук. Химия. – 2012. – Т. 446. – № 3. – С. 288.
- A42. Shashkova V.T., Pevtsova L.A., Zapadinskii B.I., **Sokolov V.I.**, Sister V.G., Ivannikova E.M. Synthesizing the components of photopolymerizing acryl composites for production of waveguides with high transparency within telecommunication spectral regions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2012. – V. 46. – № 5. - P. 546.
- A43. Lanin A.A., Voronin A.A., **Sokolov V.I.**, Fedotov I.V., Fedotov A.B., Akhmanov A.S., Panchenko V.Ya., Zheltikov A.M. Slow light on a printed circuit board // Optics Letters. – 2011. - V. 36. - № 10. - P. 1788.
- A44. **Соколов В.И.**, Китай М.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Соколова И.В. Спектроскопический рефрактометр для диапазона длин волн 375-1150 нм // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 157.
- A45. **Соколов В.И.**, Китай М.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Соколова И.В., Троицкая Е.В. Спектроскопический рефрактометр для измерения показателя преломления

- мономеров и полимеров в телекоммуникационной области длин волн вблизи 0.85 мкм // Перспективные материалы. – 2010. – № 8. – С. 91.
- A46. **Соколов В.И.**, Панченко В.Я., Семиногов В.Н. Узкополосный брэгговский фильтр на длину волны 1.5 мкм на основе полимерного волновода с лазерно-индуцированной решеткой показателя преломления // Квантовая Электроника. – 2010. – Т. 40. – № 8. – С. 739.
- A47. **Sokolov V.I.**, Mishakov G.V., Panchenko V.Ya., Tsvetkov M.Yu. Routes to polymer-based photonics // Optical Memory and Neural Networks (Information optics). – 2007. – V. 16. – № 2. – P. 67.
- A48. Семиногов В.Н., **Соколов В.И.**, Панченко В.Я. Точные решения в задаче дифракции волн на брэгговских решетках с аподизированным асимметричным, симметричным и антисимметричным коэффициентом связи // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51. – № 1. – С. 84.
- A49. Баум О.И., Варламова Н.В., Западинский Б.И., Мишаков Г.В., **Соколов В.И.** Плавно перестраиваемый волоконный аттенюатор для диапазона длин волн вблизи 1.5 мкм // Квантовая Электроника. – 2004. – Т. 34. – № 9. – С. 849.
- A50. **Соколов В.И.**, Худобенко А.И. Узкополосные брэгговские фильтры для спектральной области 1.5 мкм на основе одномодовых кварцевых волокон с боковой полировкой // Квантовая Электроника. – 2003. – Т. 33. – № 6. – С. 545.
- Статьи в трудах конференций*
- A51. **Sokolov V.I.**, Goriachuk I.O., Akhmanov A.S. Calculation of refractive index and extinction coefficient of perfluorinated polymer films using new numerical algorithms in prism coupling technique // 32nd European Modeling & Simulation Symposium, 17-th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference (EMSS-2020). Online, 16-18 September. – 2020. – P. 296.
- A52. Goriachuk I.O., Asharchuk I.M., **Sokolov V.I.** Interaction of ultrashort light pulses with waveguide Bragg gratings: a class of exactly solvable mathematical problems // 32-nd European Modeling & Simulation Symposium, 17-th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference (EMSS-2020). Online, 16-18 September. – 2020. – P. 300.
- A53. **Соколов В.И.**, Ашарчук И.М., Глебов В.Н., Горячук И.О., Любешкин А.В., Малютин А.М., Молчанова С.И., Погодина Ю.Е., Полуниин Е.В., Хайдуков К.В., Панченко В.Я. Интегральная оптика на основе фторсодержащих полимерных и неорганических материалов // В сборнике «Оптика неоднородных структур – 2019». Материалы V Международной научной конференции, Могилев, 28 – 29 мая 2019. - С. 9.
- A54. Горячук И.О., Ашарчук И.М., Крылов И.В., **Соколов В.И.**, Погодина Ю.Е., Полуниин Е.В. Формирование волноводов в электрооптических полимерах с фторсодержащими хромофорами в боковой цепи методом лазерного фотоосветления // В сборнике «Оптика неоднородных структур – 2019». Материалы V Международной научной конференции, Могилев, 28 – 29 мая 2019. - С. 53.
- A55. Goriachuk I.O., Glebov V.N., Maliutin A.M., **Sokolov V.I.** Analysis of multilayer metal-dielectric thin-film structures using prism coupling technique // Proceedings of the 30th European Modeling & Simulation Symposium, Budapest, Hungary, September 17-19. – 2018. – P. 289.
- A56. **Sokolov V.I.**, Akhmanov A.S., Goriachuk I.O. Modeling of waveguide modes excitation in thin-film multilayer structures by TM-polarized Gaussian light beam // Proceedings of the 30th European Modeling & Simulation Symposium, Budapest, Hungary, September 17-19. – 2018. – P. 284.
- A57. Молчанова С.И., Китай М.С., **Соколов В.И.**, Троицкая Е.В. Оптические свойства фторсодержащих акриловых мономеров и полимеров в телекоммуникационной области длин волн вблизи 0,85 мкм // Сборник докладов XII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нано-технологиях», Ершово, Московская область, 2008. - С. 209.

- A58. Троицкая Е.В., Молчанова С.И., **Соколов В.И.** Формирование полимерных волноводов для интегрально-оптических устройств с использованием контактной фотолитографии // Сборник докладов XII Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нано-технологиях», Ершово, Московская область, 2008. - С. 215.
- A59. Mishakov G., **Sokolov V.**, Kocabas A., Aydinli A. Gratings in polymeric waveguides // Proc. SPIE. - 2007. - V. 6613. - P. 123.
- A60. Baum O.I., Khudobenko A.I., Mishakov G.V., Panchenko V.Ya., **Sokolov V.I.**, Zherikhin A.N. Nonuniform Bragg Gratings for DWDM Applications // Proc. SPIE. - 2004. - V. 5449. - P. 316.
- A61. **Sokolov V.I.**, Khudobenko A.I., Panchenko V.Ya. Advanced Bragg grating filters for DWDM applications // Proc. SPIE. - 2002. - V. 4904. - P. 177.
- A62. Mishakov G.V., **Sokolov V.I.** Precision technique for side-polished fibers fabrication // Proc. SPIE. - 2002. - V. 4644. - P. 498.
- A63. Baum O.I., **Sokolov V.I.** Design of Bragg grating filters with improved spectral characteristics // Proc. SPIE. - 2002. - V. 4644. - P. 511.
- A64. **Sokolov V.I.** Transmission of ultrashort light pulses through phase-shifted Bragg gratings // Proc. SPIE. - 2001. - V. 4271. - P. 380.
- A65. **Sokolov V.I.**, Manankova G.I., Khudobenko A.I., Panchenko V.Ya., Seminogov V.N. Optical filters on the base of nonuniform phase-shifted Bragg gratings // Proc. SPIE. - 1999. - V. 3688. - P. 320.
- A66. **Sokolov V.I.**, Panchenko V.Ya. Propagation and interaction of waves in periodic media with a space-modulated coupling coefficient: application for optical filtering // Proc. SPIE. - 1999. - V. 3733. - P. 296.
- A67. Manankova G.I., **Sokolov V.I.** Investigation of the processes of propagation and diffraction of light in periodic mediums with sinusoidally modulated coupling coefficient // Proc. SPIE. - 1997. - V. 2994. - P. 863.

Патенты

- A68. Пат. 2215312 РФ МПК G02B 6/00. Многоканальное устройство для частотного разделения/объединения световых сигналов в волоконно-оптических линиях связи // Баум О.И., Жерихин А.Н., Панченко В.Я., **Соколов В.И.**, Худобенко А.И.; опубл. 27.05.2003.
- A69. Пат. 121590 РФ МПК G01N 21/25. Спектроскопический рефрактометр-профилومتر для измерения показателя преломления и толщины тонкопленочных структур // **Соколов В.И.**, Китай М.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Семиногов В.Н., Панченко В.Я., Хайдуков Е.В.; опубл. 27.10.2012.
- A70. Пат. 100267 РФ МПК G01N 21/25. Спектроскопический рефрактометр для определения показателя преломления жидких и твердых сред в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра // **Соколов В.И.**, Китай М.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Соколова И.В.; опубл. 10.12.2010.

Список цитируемой литературы

1. Tanio N., Koike Y. What is the most transparent polymer? // Polymer Journal. — 2000. — V. 32. — № 1. — P. 43.
2. Koike Y. Recent progress in high-speed polymer optical fiber // Mol. Cryst. Liq. Cryst. — 1998. — V. 315. — P. 247.
3. Ishigure T., Koike Y., Fleming J.W. Optimum index profile of the perfluorinated polymer-based GI polymer optical fiber and its dispersion properties / Journal of Lightwave Technology. — 2000. — V. 18. — № 2. — P. 178.
4. Groh W., Zimmermann A. What is the lowest refractive index of an organic polymer? // Macromolecules. — 1991. — V. 24. — № 25. — P. 6660.
5. Yang M.K., French R.H., Tokarsky E.W. Optical properties of TeflonAF amorphous fluoropolymers // J. Micro/Nanolith. Mems Moems. — 2008. — V. 7(3). — P. 033010-1.