

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Земцов Даниил Сергеевич

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ АНАЛОГОВЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ НА ПЛАТФОРМЕ  
КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ ДЛЯ  
ФОТОННЫХ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ  
СИСТЕМ**

1.3.19 — «Лазерная физика»

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и Сколковском институте науки и технологий

Научный руководитель: **Стариков Ростислав Сергеевич**  
д. ф.-м. н., профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Криштоп Виктор Владимирович**,  
д. ф.-м. н., профессор,  
ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПНППК),  
Главный научный сотрудник

**Сюй Александр Вячеславович**,  
д. ф.-м. н., доцент,  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Главный научный сотрудник

**Шандаров Станислав Михайлович**,  
д. ф.-м. н., профессор,  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Главный научный сотрудник

Защита состоится 10 апреля 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета «МИФИ.1.01» на базе национального исследовательского ядерного университета МИФИ по адресу: г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте ds.mephi.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан .

Ученый секретарь  
диссертационного совета



к. ф.-м. н.  
Степаненко А. А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В настоящее время взаимосвязанные проблемы миниатюризации фотонных систем и создания эффективных методов обработки сигналов в них имеют важное научное и практическое значение. Особый интерес к решению этих вопросов обусловлен задачами построения аналого-цифровых систем микроволновой фотоники. Благодаря характеристикам доступных компонентов микроволновой фотоники были продемонстрированы аналого-цифровые системы, позволяющие формировать, передавать и обрабатывать сигналы в полосе более 100 ГГц. Ключевое значение приобрели устройства, осуществляющие оптическую выборку на основе широкополосных высокостабильных оптических источников [12]. Системы на основе фемтосекундных лазеров, работающих в режиме синхронизации мод, или генераторов оптической гребенки на настоящий момент демонстрируют выдающиеся характеристики по временной стабильности и, в частности, обеспечивают джиттер на уровне десятков аттосекунд [13], что является практически недостижимым показателем для электронных систем выборки. Системы, использующие методы оптической выборки, продемонстрировали до 8 эффективных бит разрешения в гигагерцовой полосе на высокочастотных несущих диапазонах до Q [14]. Фотонные аналого-цифровые системы, построенные на дискретных оптоволоконных компонентах, обычно являются габаритными приборами, что серьезно ограничивает их практическое использование. В связи с этим на рубеже 2000-х годов в мире сформировалось активно развивающееся научное направление интегральная микроволновая фотоника, основной целью которого является миниатюризация компонентов фотонных систем, достигающаяся благодаря интегральному исполнению [15–17]. Значительное уменьшение размеров возможно при использовании кремниевых фотонных интегральных схем. Главным образом миниатюрными стараются сделать лазеры, демультиплексоры, разветвители, модуляторы и фотодетекторы. Значительный прогресс в кремниевой фотонике открывает возможности для ультракомпактной реализации узлов аналоговых оптических трактов, являющихся, по сути, основным элементом любой системы микроволновой фотоники. Сильный научный и практический интерес вызван некоторыми интегральными устройствами, механизм работы которых кардинально отличается от аналогичных волоконных устройств. Речь идет об устройствах, в которых

сочетается сильная локализация поля плазмонной моды и особые активные материалы. В области создания миниатюрных кремниевых плазмонных модуляторов уже известно некоторое количество успешных работ [18; 19], однако нерешенными остаются задачи достижения широкой полосы модуляции при технологичности подобных устройств. Помимо задач миниатюризации фотонных аналого-цифровых систем существуют проблемы обработки потока данных на их выходе. Фотонные аналого-цифровые системы имеют выходной поток данных, скорость которого может составлять несколько сотен гигабит в секунду. Широкая полоса аналогового оптического тракта вкупе со сложностью интегрального исполнения его ключевых элементов требует адекватных методов обработки сигналов. Вышеуказанные обстоятельства определяют **актуальность** настоящей работы.

Целью работы является создание на платформе кремний-на-изоляторе основных элементов интегральных аналоговых оптических трактов: решетки, стыкующей волновод с оптическим волокном, широкополосного модулятора, температурно перестраиваемого кольцевого резонатора и упорядоченной волноводной решетки, апробация этих устройств в составе фотонных аналого-цифровых систем, а также создание методов, оптимизирующих равномерную и псевдослучайную оптическую дискретизацию в фотонных аналого-цифровых системах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Реализация равномерной оптической дискретизации в фотонной аналого-цифровой системе и исследование возможности использования аперидической дискретизации в таких системах.
2. Создание метода расчета и экспериментальная реализация высокоэффективных широкополосных интегральных кремниевых решеток для ввода и вывода излучения через оптическое волокно.
3. Разработка интегрального оптического микроспектрометра на основе температурно перестраиваемого микрокольцевого резонатора в составе фотонной аналого-цифровой системы опроса волоконно-оптических датчиков.

4. Создание и характеристика в составе аналогового оптического тракта микроразмерного широкополосного электрооптического плазмонного модулятора, размещаемого на кремниевом волноводе.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Компенсация задержек в спектральных каналах десериализации оптических сигналов позволяет обеспечить скорость выборки фотонного АЦП с оптической дискретизацией и электронным квантованием 10 Гвыб/с при диапазоне обрабатываемых радиосигналов до 20 ГГц.
2. Основанный на численной оптимизации метод расчета дифракционных решеток для стыковки оптического волокна и фотонной интегральной схемы обеспечивает достижение эффективности ввода/вывода для платформы кремний-на-изоляторе с толщиной рабочего слоя кремния 220 нм лучше -3 дБ при полосе пропускания более 60 нм по уровню -1 дБ.
3. Разработанный интегральный микроспектрометр обеспечивает измерение узкополосного оптического спектра в диапазоне до 40 нм с частотой до 150 кГц при достигнутой средней скорости термооптической перестройки резонанса микрокольцевого резонатора 2.2 нм/мкс.
4. Созданный интерфейс связи фотонной и плазмонной мод в модуляторе на основе оксида индия олова позволяет с экстинкцией до 1.8 дБ при напряжениях от -3 до 2 В и шириной полосы модуляции более 40 ГГц по уровню -2 дБ модулировать интенсивность излучения ТЕ волноводной моды.
5. Использование метода сжатой выборки, минимизирующего  $l_1$ -норму радиочастотного спектра, обеспечивает восстановление сигнала в полосе 5 ГГц, дискретизированного псевдослучайным образом с эффективной скоростью выборки 0.5 Гвыб/с.

#### **Научная новизна:**

1. Решетки, созданные с применением разработанного метода на основе инверсного дизайна, предназначенные для стыковки оптического волокна и интегрального волновода, впервые показали эффектив-

ность связи -2.64 дБ при полосе 67 нм по уровню -1 дБ для кремния толщиной 220 нм.

2. Рассчитаны параметры плазмонной решетки, работающей в S+L диапазоне и впервые для равномерной геометрии позволившей перенаправить с эффективностью -3.4 дБ излучение оптического волокна в поверхностную плазмонную моду золотого волновода.
3. Разработан, изготовлен и исследован интегральный плазмонный модулятор нового типа на основе ИТО, аналоговый отклик изготовленного модулятора имеет ширину полосы пропускания более 40 ГГц по уровню -2 дБ.
4. Применение впервые предложенного метода цифровой оптимизации по радиочастотному спектру сигнала схемы генерации дискретной мультиспектральной последовательности выборки семплирующего аналогового оптического тракта с цифровой обратной связью обеспечивает точность выравнивания следования импульсов выборки не хуже 1 пс.

**Практическая значимость** диссертации заключается в создании уникальных интегральных оптических устройств, методов их теоретического описания и экспериментальной характеристики, а также демонстрации работы этих устройств в составе аналоговых оптических трактов. Представленные в работе результаты могут быть использованы в задачах оптической обработки и передачи сигналов, в оптических вычислительных системах, а также в широком спектре задач, связанных со спектральным анализом в ближнем ИК диапазоне. Практическая значимость представленных исследований подтверждена патентом на изобретение [1]. С использованием результатов исследований, описанных в диссертации, были выполнены или выполняются на момент написания диссертации следующие проекты:

1. Проект ЦК НТИ «Фотоника» НИОКТР «Создание технологии производства компактных анализаторов сигналов волоконно-оптических датчиков на основе интегральной фотоники и волоконной оптики»
2. НИР «Разработка технологий и компонентов интегральной сверхвысокочастотной радиофотоники на основе кремниевых МОП структур с внедренным слоем ИТО» в рамках комплексного проекта «Раз-

работка технологий и компонентов интегральной сверхвысококачественной радиофотоники» Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58117X0026.

3. СЧ НИР шифр «Синтез-МИФИ».

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике 2018;
2. VII Международная молодежная научная школа-конференция 2018;
3. XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике 2018;
4. X Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики – 2018";
5. VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике 2019;
6. IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике - 2020;
7. Всероссийская конференция по волоконной оптике 2021;
8. 10-ый Международный семинар по волоконным лазерам 2022;
9. Научно-техническая конференция «Дальняя радиолокация на службе отечеству» 2022;
10. XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике 2023.
11. Всероссийская конференция по волоконной оптике 2023;

Всего по теме диссертации было представлено и опубликовано в качестве материалов конференции 14 докладов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 рецензируемых печатных изданиях [2–10], 5 из которых изданы в журналах, входящих в базы данных Scopus / Web of Science [2; 5–8], в том числе 2 в журналах уровня Q1 [2; 7], 1 в журнале уровня Q2 [6], 1 в журнале уровня Q3 [5] и 1 в журнале уровня Q4 [8]; 4 статьи изданы в журналах, рекомендо-

ванных ВАК [3; 4; 9; 10]. Также 1 публикация является патентом Российской Федерации [1].

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена современным достижениям в обработке сигналов фотонными аналого-цифровыми системами и их миниатюризации. В главе рассматриваются возможности фотонных аналого-цифровых систем, а также их недостатки. Такие системы могут формировать, передавать и обрабатывать сигналы в полосе более 100 ГГц. Также продемонстрированы системы, способные осуществлять спектральный анализ с разрешением 10 МГц. Особое внимание уделяется фотонным аналого-цифровым системам, осуществляющим оптическую дискретизацию сигнала. Эти устройства благодаря выдающимся характеристикам оптических импульсных лазерных источников демонстрируют до 8 эффективных бит разрешения в гигагерцовой полосе. Большинство фотонных аналого-цифровых систем собраны из дискретных волоконных компонентов и поэтому являются габаритными. Глава включает в себя обзор литературы по интегральным фотонным аналого-цифровым системам, а также собранным из дискретных компонентов.

В первой главе описывается созданная в рамках диссертационной работы уникальная двухканальная радиотехническая система, основанная на фотонной аналого-цифровой системе с непрерывной мультиспектральной последовательностью выборки [5]. Устройство представляет собой фотонную систему дискретизации и электронную систему квантования. Схема разработанного устройства изображена на рисунке 1.

В описываемой семплирующей фотонной аналого-цифровой системе ключевое значение имеет выравнивание задержек в каналах десериализации, которое происходит в оптическом волокне перед БВСД и непосредственно в самом БВСД. Выравнивание сигнальных задержек напрямую связано с равномерностью дискретизации сигнала по времени. Относительные задержки каналов ДМ компенсированы: с одной стороны, приблизительно - отрез-



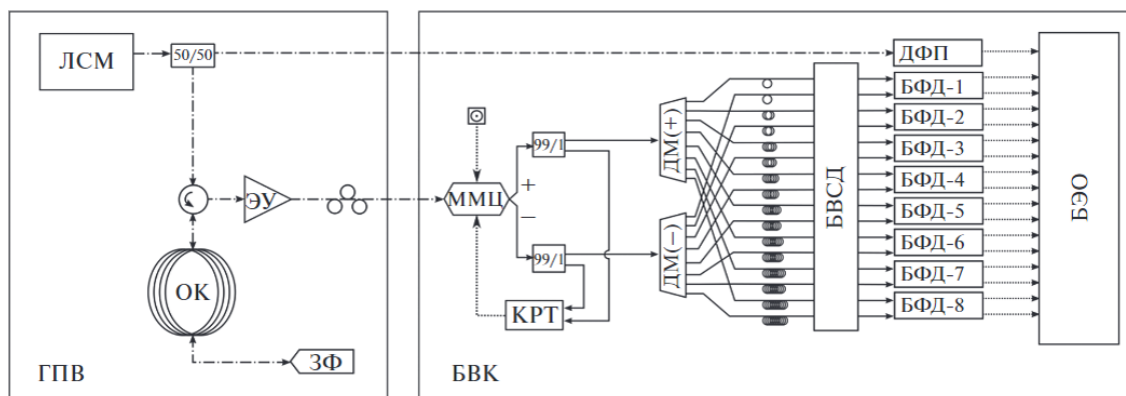


Рис. 1 – Схема фотонного аналого-цифрового преобразователя: ГПВ – генератор последовательности выборки, ЛСМ – лазер с синхронизацией мод, ЭУ – эрбиевый усилитель, ОК – оптоволоконный кабель, ЗФ – зеркало Фарадея, БВК – блок выборки и квантования, ММЦ – модулятор Маха-Цендера, КРТ – контроллер рабочей точки, ДМ – демультиплексор, БВСД – блок выравнивания сигнальных длин, ДФП – дифференциальный фотоприемник, БФД – балансный фотодетектор, БЭО – блок электронной обработки [5].

ками оптоволоконна с точностью 50 пс, с другой, точно - блоком выравнивания сигнальных длин на основе перестраиваемых оптико-механических линий задержки (изготовлен фирмой “ОПТЭЛ”, Москва), результирующая точность компенсации составляет около 10 пс. Благодаря аккуратной настройке устройство успешно прошло полевые испытания.

Система продемонстрировала скорость работы 1.25 ГВыб/с в каждом из 8 балансных каналов, что соответствует суммарной скорости дискретизации 10 ГВыб/с. Устройство благодаря многоканальному оптическому блоку дискретизации позволяет осуществлять аналого-цифровое преобразование сигналов в полосе 20 ГГц с мгновенной полосой 5 ГГц. При помощи двухтонового сигнала для АЦП с фотонной дискретизацией была определена эффективная разрядность на уровне 6.3 эффективных бита.

В связи с большими габаритами созданного фотонного АЦП предлагается вариант интегральной схемы аналогового оптического тракта с дискретной мультиспектральной выборкой и обсуждается возможность реализации такого устройства на практике. Также в главе приведены примеры успешной реализации неравномерной выборки в интегральных фотонных аналого-цифровых системах.

В первой главе диссертации также рассматриваются различные варианты пассивных и активных интегральных устройств на кремниевой платформе. Подчеркивается, что среди всех существующих решений лишь плазменная конфигурация амплитудного модулятора на основе прозрачного проводящего оксида способна продемонстрировать комбинацию малого размера, широкой полосы модуляции, приемлемой экстинкции и технологичности.

**Вторая глава** посвящена расчетным работам, проведенным для создания интегральных фотонных устройств и систем, которым посвящена диссертация. В первую очередь описываются аналитический и численный способы определения эффективного и эффективного группового индексов моды кремниевого волновода, а также методы, позволяющие проследить эволюцию электромагнитного поля и затем произвести его характеристику. Метод конечных разностей во временной области (FDTD) позиционируется как один из основных инструментов теоретической части работы, который используется для решения уравнений Максвелла в немагнитной среде (1 - 3).

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} \quad (1)$$

$$\vec{D}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{E} \quad (3)$$

В главе описывается работающий на различных платформах метод расчета геометрии дифракционных решеток для стыковки оптического волокна и интегрального волновода. Чтобы приблизительно определить параметры решетки используются условие Брэгга-Вульфа (4) и уравнение эффективного индекса моды в области решетки (5).

$$m_d \lambda = \Lambda (n_{eff} - n_c \sin(\theta)), \quad (4)$$

$$n_{eff} = f n_o + (1 - f) n_e. \quad (5)$$

Эффективный индекс дифракционной решетки  $n_{eff}$  определяется в соответствии с (5) как взвешенная сумма индексов слэба с толщиной, соответствующей зубцу  $n_o$ , и слэба с толщиной, соответствующей протравленной траншее решетки  $n_e$ . Угол  $\theta$  соответствует наклону приемника/источника к

нормали. Параметрами решетки являются  $\Lambda$  и  $f$ , обозначающие период и заполнение структуры соответственно. Показатель преломления покрывающего материала обозначается  $n_c$ . Наконец,  $\lambda$  - это длина волны, для которой решетка наиболее эффективно связывает волновод с волоконным зондом. Под заполнением структуры подразумевается отношение ширины зубца к периоду решетки. В подавляющем большинстве решеток, в том числе во всех описанных в этой работе, порядок дифракции  $m_d = 1$ .

Разработанный алгоритм оптимизации дизайна решеток в общем случае устроен следующим образом:

1. Определение толщины зубца и стартовой глубины траншеи.
2. Расчет эффективных индексов мод двумерных волноводов с параметрами зубца и траншеи.
3. Выбор угла наклона оптических зондов, при котором будет происходить стыковка к чипу.

*Угол связан с центральной длиной волны решетки и может изменяться для ее перестройки, поэтому параметр угла не является жестким требованием.*

4. Вычисление комбинации периода и заполнения решетки в соответствии с (4, 5) так, чтобы решетка удовлетворяла целевой длине волны.
5. Запуск алгоритма оптимизации параметров решетки.
  - 5.1. Запуск 2D FDTD расчета в плоскости, которая перпендикулярна зубцам решетки.
  - 5.2. Определение эффективности решетки на целевой длине волны.
  - 5.3. Проверка выполнения критерия остановки.
  - 5.4. Если критерий остановки не выполнен: Шаг оптимизатора по параметрам и возврат на пункт 5.1.

6. Извлечение параметров решетки из отчета оптимизатора или из среды для FDTD симуляции.

При помощи уравнений (4) и (5), а также оптимизационного метода расчета, можно определить, что для центральной длины волны 1570 нм подходит период 636 нм с заполнением 0.58 при травлении на 70 нм. Важнейшим

результатом этого раздела является расчетная эффективность связи излучательной моды волоконного зонда и моды кремниевого волновода более -3 дБ.

В главе также приводятся основные расчетные результаты для других решеток различных типов, разработанных с применением описанного выше алгоритма. Среди результатов распределения интенсивности электромагнитных полей и спектры пропускания решеток вертикальной стыковки, решеток для р-поляризации на кремнии толщиной 500 нм, а также решетки для р-поляризации для возбуждения поверхностной плазмонной моды интерфейса золото/тетраэтилортосиликат.

Кроме интегральных дифракционных решеток в главе приводятся аналитические формулы, позволяющие описать спектр пропускания интегрального микрокольцевого резонатора. Также приведены аналитические формулы, позволяющие проводить оценки термооптического эффекта, характерного для волноводной моды. Кроме того в этом разделе представлен численный расчет динамики термооптического эффекта в микрокольцевом резонаторе, основанный на законе Джоуля-Ленца и уравнении теплопроводности. В результате расчетов установлено что характерное время перестройки кольцевого резонатора составляет около 10 мкс при нагреве прямоугольным импульсом напряжения с длительностью 20 мкс и амплитудой 5 В.

Создание интегрального микроспектрометра является одной из важных частей диссертационной работы. Во второй главе описан расчет упорядоченной волноводной решетки (УВР), которая представляет собой ключевой элемент микроспектрометра наряду с термооптическим микрокольцевым резонатором. Схематично УВР изображена на рисунке 2. На рисунке обозначены основные геометрические параметры, влияющие на работу устройства. Излучение из волновода входной группы попадает в разветвитель и дифрагирует в промежуточные каналы. Амплитуда излучения в промежуточных каналах определяется в первую очередь дифракционным распределением поля в разветвителе. Дифракционные моды разветвителя и объединителя представляют собой моды слэба. Чтобы минимизировать потери в месте стыковки промежуточных волноводов с разветвителем или объединителем следует обеспечить плавный переход между модами слэба и волновода, обычно это значит в месте стыковки волноводы должны обладать шириной 1-2 мкм. Попав в промежуточные волноводы, излучение распространяется вдоль них приобретая

кратные  $m$  фазовые набегги. В объединителе происходит интерференция излучения, выходящего из промежуточных волноводов. Распределение фаз оптического поля вдоль линии стыка промежуточных волноводов и объединителя зависит от длины волны излучения и определяет отклонение интерференционного максимума от оси симметрии объединителя. Максимумы пропускания каналов УВР наблюдается там, где интерференционный максимум отклоняется на угол, кратный  $\alpha_0$ .

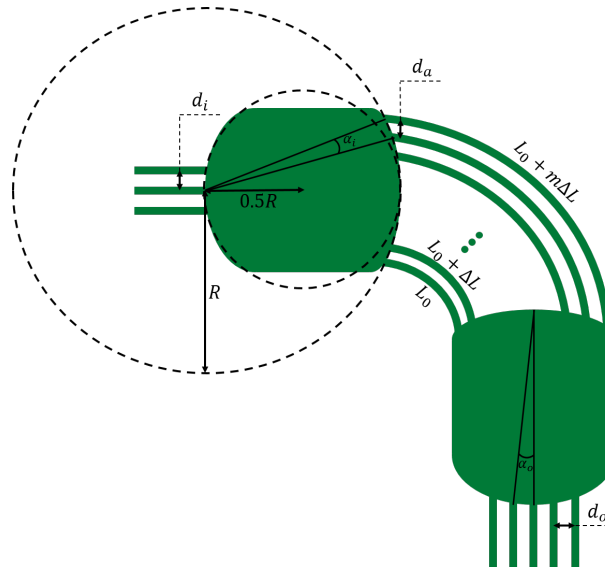


Рис. 2 — Схематичное изображение упорядоченной волноводной решетки.

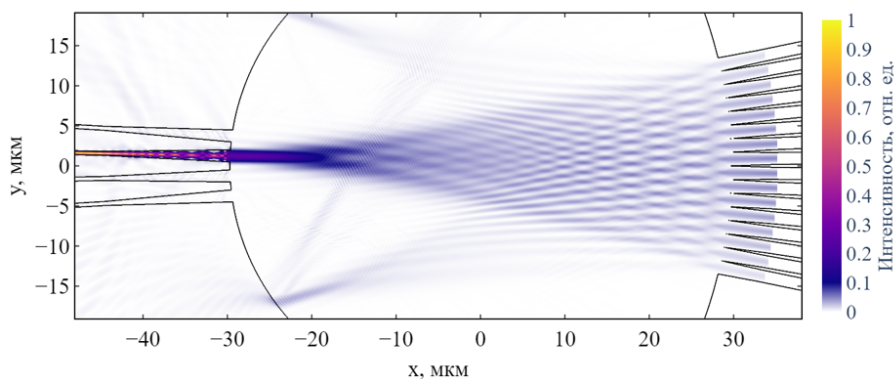


Рис. 3 — Распределение интенсивности в объединителе для длины волны 1555 нм.

Все аналитические расчеты дополнялись численным решением уравнений Максвелла. В разделе, приводятся геометрические размеры, а также распределения интенсивностей электромагнитных полей и другие расчетные результаты, относящиеся к упорядоченной волноводной решетке. Применение описанных расчетов позволило разработать УВР с характерным разме-

ром 200 мкм со спектральным расстоянием между выходными каналами 10 нм и расчетными потерями около 2 дБ. Расчет интенсивности электромагнитного поля в каплере упорядоченной волноводной решетки для длины волны 1555 нм изображен на рисунке 3. Излучение шестнадцати источников, учитывающих фазовые набег в промежуточных волноводах УВР, интерферирует конструктивно в один из выходных каналов структуры.

Последний раздел второй главы посвящен теоретическому описанию плазмонного электрооптического амплитудного модулятора на основе оксида индия олова. В данной работе создавался плазмонный электроабсорбционный модулятор с внедренным слоем прозрачного проводящего оксида индия олова (ITO), описанный в работе [7]. Этот модулятор схематично изображен на рисунке 4.

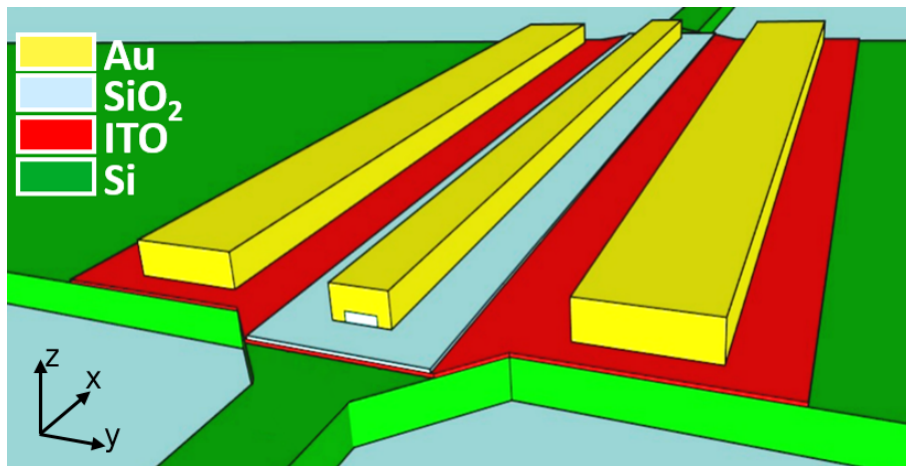


Рис. 4 — Схематичное изображение плазмонного электроабсорбционного модулятора с внедренным слоем оксида индия олова [7].

Основная задача электроабсорбционного модулятора - как можно сильнее и быстрее уменьшить интенсивность излучения при приложении напряжения к контактам структуры и, соответственно, как можно быстрее вернуть потери оптической мощности в исходное состояние, когда напряжение на контактах пропадает. Проходящее по кремниевому волноводу излучение взаимодействует с материалами, которые нанесены на поверхность кремния. Благодаря специальной плавниковой структуре излучение TE волноводной моды частично переходит в плазмонную моду и взаимодействует со слоем ITO.

На рисунке 4 центральный золотой элемент - это сигнальный электрод, а боковые золотые элементы заземлены. Фактически, система ITO/SiO<sub>2</sub>/Au - это конденсатор. При приложении напряжения к этой системе в ITO про-

исходит перераспределение свободных электронов, которое при достаточном напряжении на контактах значительно уменьшает действительную часть диэлектрической проницаемости и одновременно увеличивает ее мнимую часть в области ИТО, граничащей с  $\text{SiO}_2$ . В тонком слое ИТО увеличенная концентрация электронов изменяет материал приближая его к так называемому режиму Epsilon Near Zero (ENZ), когда действительная часть диэлектрической проницаемости равна нулю. Ослабление оптического излучения происходит в тонком заряженном слое ИТО. Диэлектрическая проницаемость ИТО определяется согласно модели Друде-Лоренца.

Расчет взаимодействия модулятора с излучением происходит с помощью решения уравнений Максвелла трехмерным методом конечных разностей во временной области. В процессе решения уравнений во всех точках модели определяется электромагнитное поле. Интенсивность электромагнитного поля в кремниевом слое области модуляции в параллельной плоскости чипа проекции изображена на рисунке 5 для напряжений 0 В и -4 В. На рисунке видно, что распределение поля отличается от дифракции в двумерном волноводе. Этот эффект, как и эффект локализации поля в слое ИТО определяется золотыми угловыми интерфейсами.

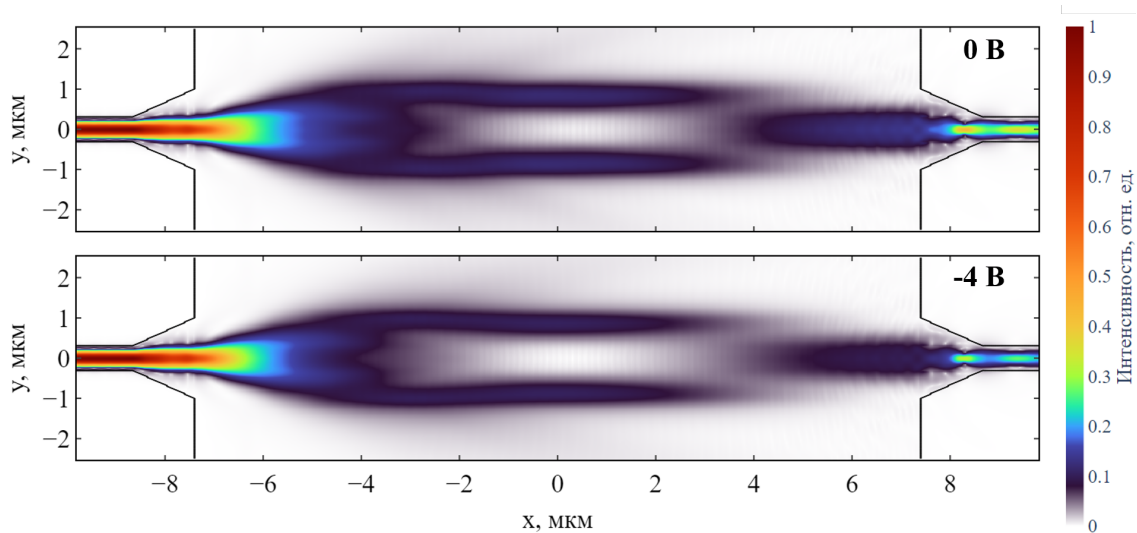


Рис. 5 — Интенсивность в кремниевом слое области модуляции в плоскости  $XY$ .

В расчетах оценивалось пропускание модулятора при различных напряжениях. Без приложенного напряжения пропускание структуры оказывается около -5 дБ, в то время, как при напряжении -4 В пропускание оказывается на 1.4 дБ меньше.

**Третья глава** посвящена аспектам изготовления кремниевых интегральных фотонных устройств. В главе обсуждаются основные методы, проблемы и их решения, характерные для электронно-лучевой литографии и постлитографического процесса.

Для литографии в работе использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Jeol JSM-7200F в сочетании с литографической приставкой Xenos XPG 2. Литографическая приставка способна отклонять электронный луч, фокусируя его во все задействованные точки поля литографии.

В главе приводятся примеры внедрения интегральной фотонной схемы в оптоволоконную систему. Кроме того приводится описание эффекта близости и коррекции дозы экспонирования в электронно-лучевой литографии. В последнем разделе главы приведен полный технологический процесс изготовления электрооптического плазмонного модулятора на основе ИТО.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям. В главе описываются характеристика созданных интегральных устройств и их апробация в составе фотонных аналого-цифровых систем.

В первом разделе главы описывается экспериментальное исследование, позволившее реализовать рекордную для кремниевого волновода толщиной 220 нм полосу пропускания 67 нм по уровню -1 дБ и эффективность связи -2.64 дБ с оптическим волокном на основе простых в изготовлении решеток неполного травления [2]. Спектр пропускания решеток ввода/вывода показан на рисунке 6.

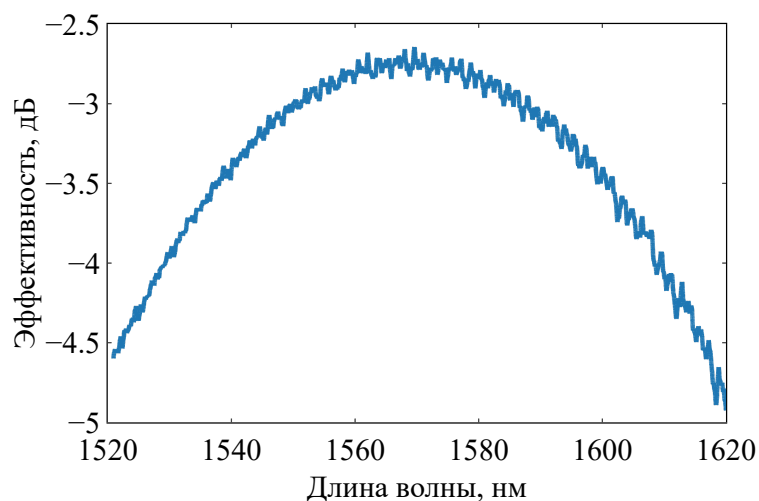


Рис. 6 — Спектр пропускания решетки неполного травления глубиной 70 нм с периодом 636 нм и заполнением 0.58 [2].



Разработанные решетки были использованы в качестве элементов стыковки в интегральном фотонном микроспектрометре на основе температурно управляемого кольцевого резонатора и УВР. Микроспектрометр был ключевым спектрально селективным элементом в составе фотонной аналого-цифровой системы анализа сигналов волоконно-оптических датчиков. Схематично система показана на рисунке 7.

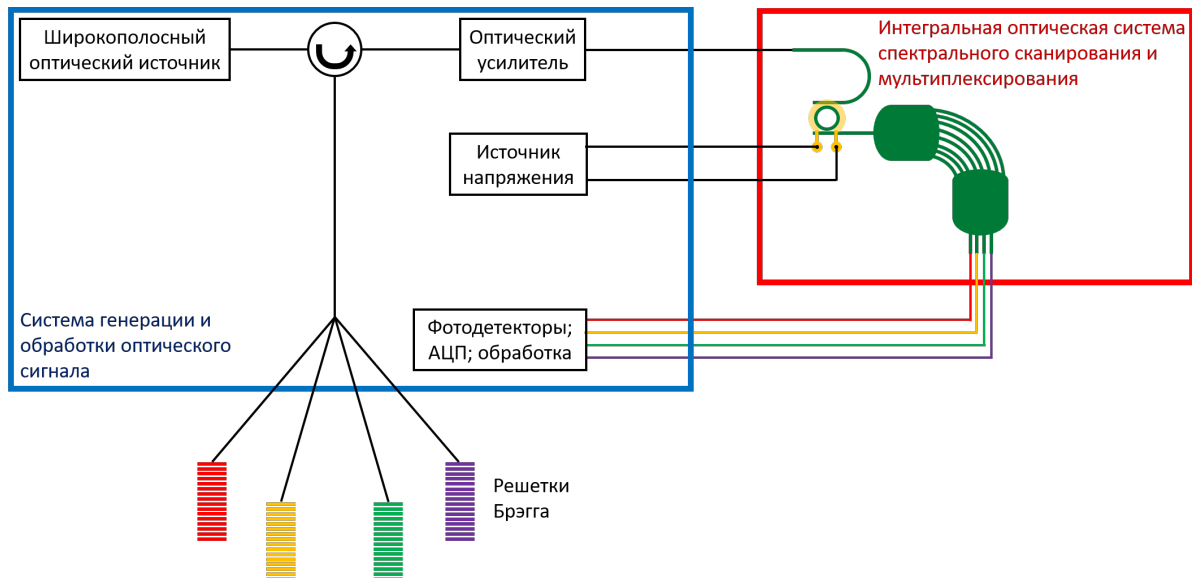


Рис. 7 — Принципиальная схема фотонной аналого-цифровой системы анализа сигналов волоконно-оптических датчиков.

Устройство работает следующим образом: сигнал широкополосного оптического источника (например, суперлюминесцентного диода) попадает на волоконно-оптический циркулятор и направляется в его отражающий канал. В отражательном канале циркулятора установлен оптический разветвитель, перенаправляющий излучение на четыре волоконно-оптических брэгговских решетки, имеющих пик отражения на разных длинах волн. Отраженный мультиспектральный сигнал перенаправляется циркулятором на оптический усилитель, после которого подлежит стыковке с кремниевым интегральным фотонным микроспектрометром. Стыковка к фотонной интегральной схеме происходит при помощи дифракционной решетки, подробно описанной в начале главы. Попадая в фотонную интегральную схему, излучение фильтруется кольцевым резонатором с резонансом пропускания или подавления в зависимости от выбранного входа. Над кольцевым резонатором находится титановый нагреватель, подключаемый к источнику напряжения. При перестройке напряжения изменяется температура нагревателя и следовательно кольцевого

резонатора. При периодическом варьировании напряжения, резонансы пере-страиваются и периодически совпадают с пиком отражения брэгговской решетки. Резонатор рассчитан таким образом, что его резонансы попадают каждый в свой канал УВР. В результате в каждом из четырех выходных волноводов УВР максимум сигнала соответствует напряжению при котором резонанс согласован с отражением волоконной брэгговской решетки. Это позволяет оценить длину волны ВБР. На выходе УВР сигнал при помощи дифракционных решеток переводится в оптическое волокно, фотодетектируется, преобразуется в цифровой и обрабатывается. В результате тестирования удалось измерить изменение состояния ВБР при изменении температуры окружающей среды. Экспериментальное исследование микроспектрометра на основе УВР показало, что при средней скорости перестройки микрокольцевого резонатора в 2.2 нм/мкс возможно измерять спектр узкополосного входного сигнала в полосе до 40 нм с частотой до 150 кГц.

Последний раздел четвертой главы посвящен экспериментальным исследованиям созданного интегрального электрооптического плазмонного модулятора. СЭМ изображение изготовленной структуры показано на рисунке 8. Экспериментальные и теоретические результаты исследования модулятора с планарным ТЕ плазмонным интерфейсом опубликованы в [7] и показаны на рисунке 9.

При характеристике модулятора в составе аналогового оптического тракта было выяснено, что полоса модуляции устройства составляет более 40 ГГц по уровню -2 дБ. При этом экстинкция устройства составила 1.8 дБ в диапазоне постоянных напряжений от -3 до +2 В. Помимо характеристики модулятора в главе приводится анализ перспектив улучшения параметров прибора.

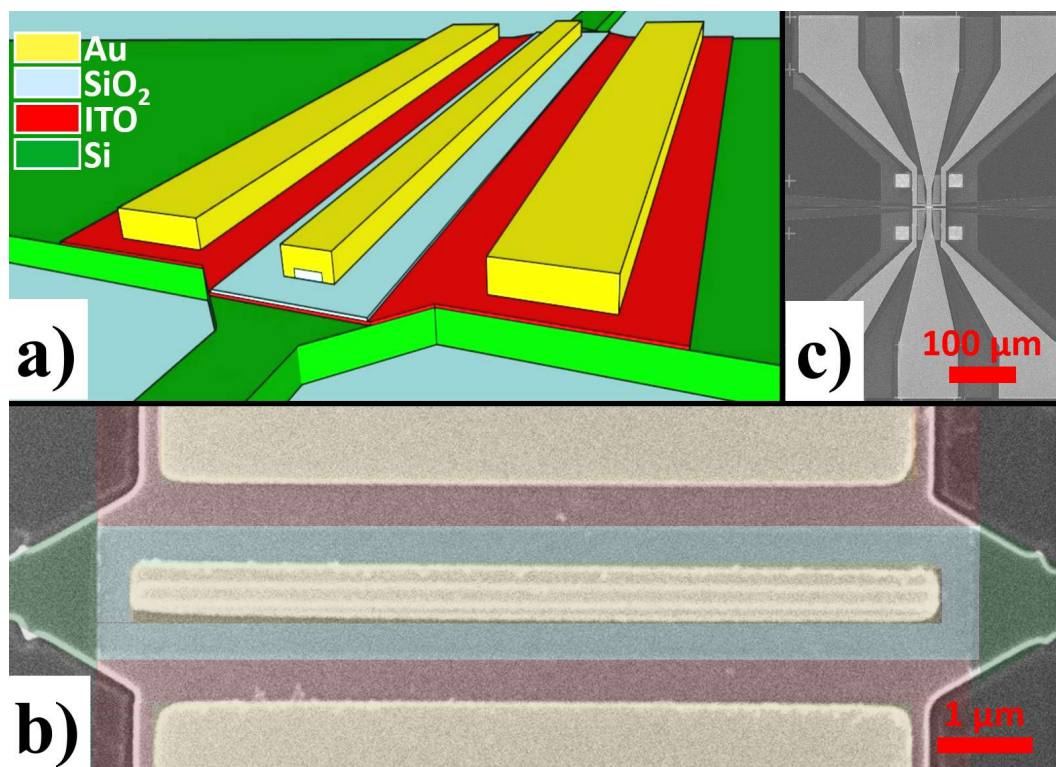


Рис. 8 — Изображение электроабсорбционного модулятора: (а) Схематичное изображение модулятора; (b) Раскрашенное изображение области модуляции, полученное на СЭМ; (с) Полученное на СЭМ изображение модулятора, тейперов, решеток ввода/вывода и пары наборов GSG контактов целиком. На данном изображении область модуляции представляет собой точку, расположенную по центру снимка [7].

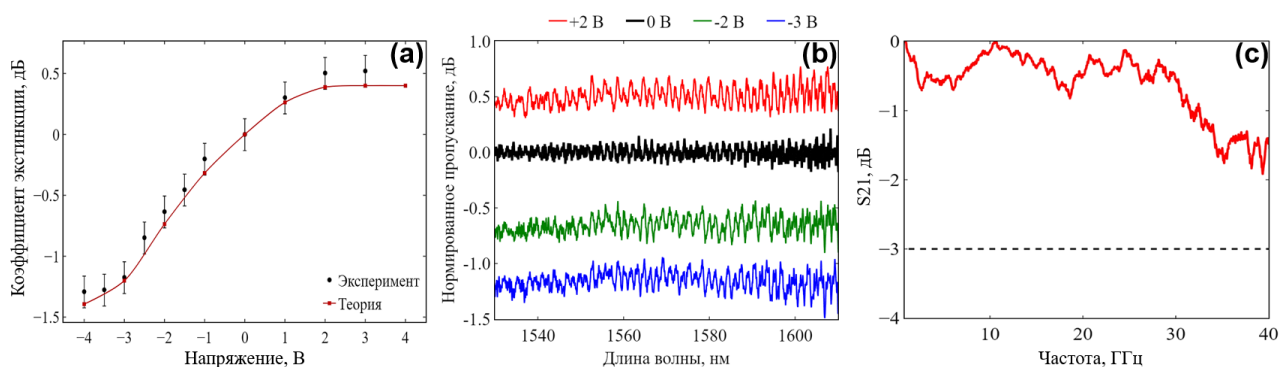


Рис. 9 — Результаты экспериментальной характеристики аналогового оптического тракта с интегральным электроабсорбционным плазмонным модулятором: (а) Коэффициент экстинкции при постоянном напряжении; (b) Нормированные спектры пропускания при постоянном напряжении; (с) Нормированный отклик модулятора на аналоговый модулирующий СВЧ сигнал [7].

**Пятая глава** посвящена созданию эффективных методов обработки сигналов в аналого-цифровых системах с оптической дискретизацией. В этой главе рассматриваются методы оптимизации оптической выборки, а именно достижение равномерности фотонной дискретизации и обработка измерений с псевдослучайной оптической дискретизацией. Алгоритмы оптической выборки, включающие в себя неравномерную дискретизацию, особенно интересны в интегральных фотонных аналого-цифровых системах. В частности в [16] используется неравномерная мультиспектральная импульсная оптическая выборка. Также в [20] показано, что методы обработки сигналов псевдослучайной дискретизации хорошо подходят для задачи создания интегрального оптического фурье-спектрометра.

Первая часть главы посвящена выравниванию дискретной оптической мультиспектральной последовательности выборки. Предложен и экспериментально верифицирован метод выравнивания утроенной импульсной последовательности на основе цифровой обратной связи и численной оптимизации функции 6, в которой  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  - мощности первых трех гармоник радиочастотного спектра соответственно.

$$F = \frac{\max(P_1, P_2)}{P_3} \quad (6)$$

При помощи описанной методики в эксперименте было продемонстрировано подавление первых двух гармоник радиочастотного спектра по сравнению с третьей на 43 дБ в лучшем случае. Оценка равномерности оптимизированной последовательности возможна при помощи численного моделирования. Для оценки точности выравнивания, получившейся в эксперименте, был проведен численный расчет радиочастотного спектра сигнала мультиспектральной последовательности при различных значениях задержки и аттенюации импульсов. Точность выравнивания мощности импульсов в системе оказывается не менее 1%. Соответствующее значение функции (6) изображено на рисунке 10.

Во второй части главы предложена и численно продемонстрирована сжатая выборка на основе псевдослучайной дискретизации. Этот метод позволяет снизить требования к постдетекторным электронным устройствам в составе фотонной аналого-цифровой системы с оптической дискретизацией. Большинство несущих информацию аналоговых сигналов являются

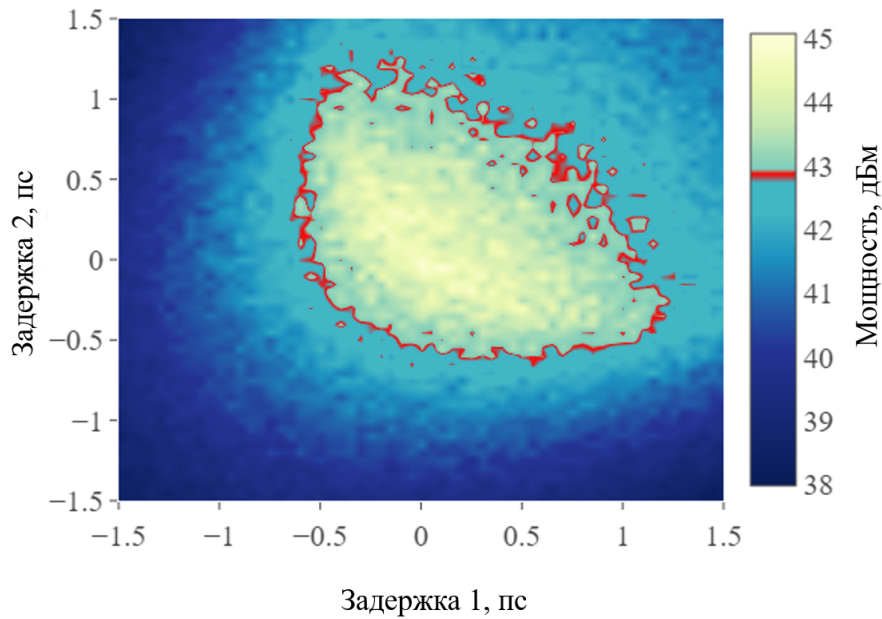


Рис. 10 — Результаты моделирования отношения мощностей третьей гармоники к максимальной из первых двух с уровнем рассогласования мощности 1%. Красной линией выделена окрестность соответствующая полученным в ходе экспериментов значениям.

ся спектрально разреженными. Апериодическая дискретизация сигналов с последующим поиском оптимального решения с точки зрения некоторой априорной информации об этом сигнале называется сжатой выборкой (от англ. Compressive Sensing). Применение сжатой выборки в сигналах фотонных аналого-цифровых систем обсуждается в [11; 21]. Пусть равномерно дискретно заданный  $n$  временными отсчетами сигнал -  $f[n]$ . Здесь и далее одиночный символ в квадратных скобках означает размерность вектора.

Обозначим аperiodически дискретизированный в  $m$  временных отсчетах сигнал как  $g[m]$ . Смысл сжатой выборки заключается в том, чтобы информация о сигнале была получена из меньшего количества отсчетов, чем этого требует дискретизация на частоте Котельникова-Найквиста, поэтому пусть  $m < n$ . Важно уточнить, что  $g[m]$  и  $f[n]$  - это результаты различных дискретизаций одного и того же сигнала. Базисный элемент  $G_{a,b}$  для частотного разложения сигнала  $g[m]$  совпадает с базисом дискретного преобразования Фурье, но временные отсчеты при этом определены согласно произведенной случайной выборке. Это означает, что система линейных алгебраических уравнений  $Gy[n] = g[m]$  имеет строк меньше, чем столбцов, а значит недоопределена и имеет бесконечно много решений  $y[n]$ . Все решения

из набора различных  $y[n]$  могут соответствовать реальному сигналу, который в случае равномерной дискретизации выражается как  $f[n]$ . Задачу по восстановлению сигнала  $f[n]$  по его псевдослучайной выборке  $g[m]$  можно записать в виде (7).

$$\min \|y[n]\|_1 : Gy[n] = g[m] \quad (7)$$

Алгоритма, способного всегда достоверно выбирать решение  $y[n]$  не существует, но в сжатой выборке предполагается априорная информация об анализируемом сигнале, на основе которой и происходит выбор из всех возможных вариантов  $y[n]$ . Чаще всего априорной информацией является разреженность изучаемого сигнала в частотном представлении, поскольку большинство сигналов в реальном мире представляют собой нечто отличное от шума. Мерой разреженности вектора является  $l_0$  норма, но ее оптимизация вычислительно затратна. Как и в случае  $l_0$  нормы,  $l_1$  норма соответствует разреженному варианту  $y[n]$  и при этом может быть найдена при помощи алгоритмов выпуклой оптимизации.

Сжатая выборка была численно промоделирована в задаче дискретизации сигнала в полосе 5 ГГц, включающего в себя 5 гармоник случайной частоты и фазы. В рамках моделирования удалось восстановить такой сигнал пользуясь псевдослучайной дискретизацией со средней скоростью 0.5 Гвыб/с, что в 20 раз меньше, чем необходимая для оцифровки равномерная дискретизация на частоте Котельникова-Найквиста. Пример восстановленного сигнала во временной и частотной областях изображен на рисунках 11 и 12. В данном примере достигнуто высокое качество восстановления сигнала, поскольку исходный сигнал является разреженным в Фурье базисе для  $n$  отсчетов, однако, для произвольного частотного состава сигнала  $f$  конечная длительность измерений приводит к тому, что самое разреженное решение в Фурье базисе уже не оказывается верным, хоть и удовлетворяет отсчетам  $g[m]$ . В конце пятой главы диссертации показано, что применение популярных оконных функций может повысить разреженность сигнала  $f$  в частотном базисе и поэтому улучшает качество восстановления разреженного сигнала по псевдослучайным отсчетам.

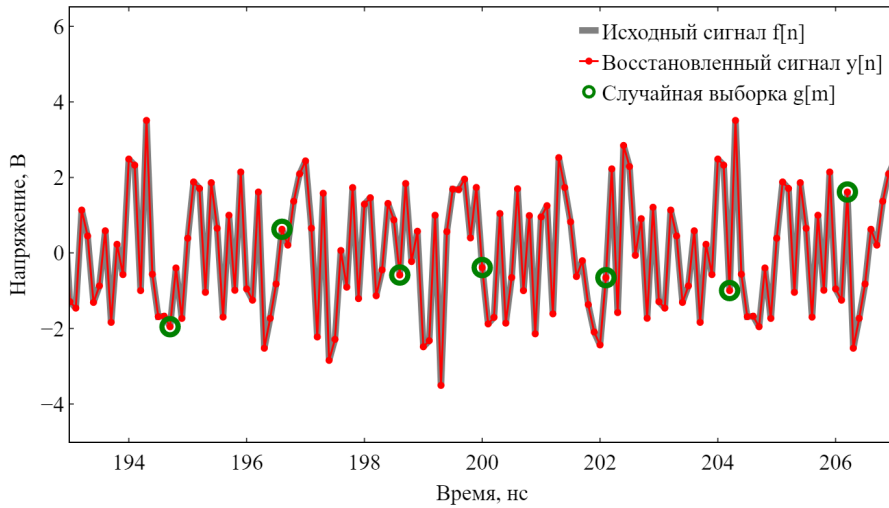


Рис. 11 — Фрагменты исходного равномерно дискретизированного сигнала  $f[n]$  (серый), восстановленного сигнала  $y[n]$  (красный) и псевдослучайно дискретизированного сигнала  $g[m]$  (зеленый).

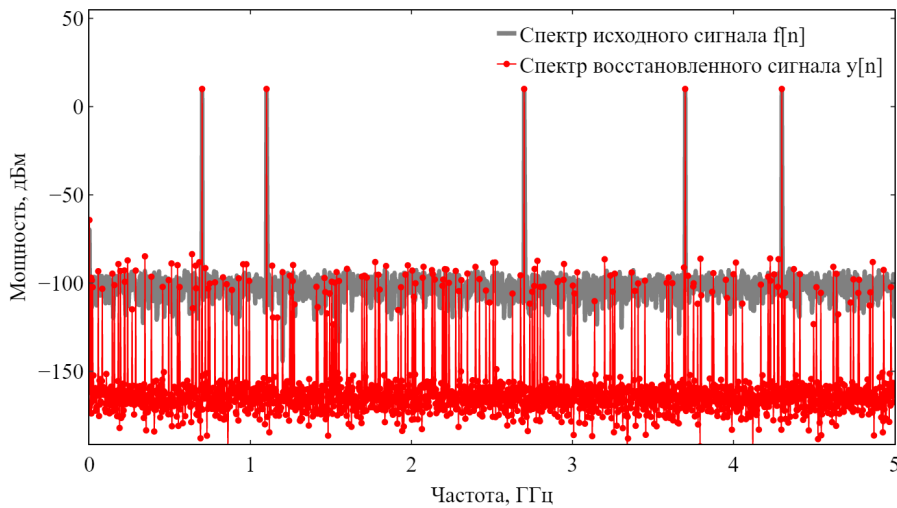


Рис. 12 — Спектры мощности исходного равномерно дискретизированного сигнала  $f[n]$  (серый) и восстановленного разреженного сигнала  $y[n]$  (красный).

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Проанализированы современные возможности и потребности фотонных аналого-цифровых систем различных типов.
2. Исследована и изготовлена система фотонной дискретизации с электронным квантованием, продемонстрировавшая эффективное число бит 6.3 при полосе пропускания 20 ГГц и скорости выборки 10 Гвыб/с.

3. Предложена схема интегральной оптической аналого-цифровой системы с дискретной мультиспектральной оптической выборкой и электронным квантованием.
4. На основе численной оптимизации разработан метод дизайна дифракционных решеток для стыковки под различными углами оптического волокна и интегрального волновода на различных платформах.
5. При помощи созданного метода рассчитана структура равномерной дифракционной решетки неполного травления, позволяющая достигать эффективности ввода/вывода более -3 дБ для платформы SOI с толщиной рабочего слоя кремния 220 нм.
6. Рассчитаны параметры структуры плазмонной решетки, позволяющей перенаправить с эффективностью -3.4 дБ излучение моды оптического волокна в поверхностную плазмонную моду золотого волновода.
7. При помощи аналитического расчета распространения волноводных мод и численного расчета уравнений Максвелла разработана геометрия четырехканальной упорядоченной волноводной решетки, позволяющая распределять излучение в параллельно работающие каналы со спектральным расстоянием между ними 10 нм.
8. Рассчитаны электромагнитные поля в разработанной структуре модулятора. Численный расчет показал глубину модуляции до 1.8 дБ при напряжениях от -3 до 2 В.
9. Налажен совместимый с КМОП технологией процесс изготовления пассивных интегральных фотонных структур на платформе SOI.
10. Разработан техпроцесс изготовления интегрального электроабсорбционного плазмонного модулятора на основе оксида индия олова.
11. Проведено экспериментальное исследование дифракционных решеток ввода/вывода, позволившее согласовать излучательную моду оптического линзованного зонда и дифракционную моду решетки, что в итоге привело к эффективности связи волоконной и интегральной систем на уровне -2.64 дБ при полосе 67 нм по уровню -1 дБ. На момент публикации результат является лучшим в мире для решеток



на кремнии толщиной 220 нм без отражателей и дополнительных осажденных на поверхность устройства структур.

12. Четырехканальная упорядоченная волноводная решетка, изготовленная для использования в интегральном микроспектрометре, имеет пропускание на уровне -3 дБ. Отношение пика пропускания в канале к уровню побочных интерференционных компонент достигает 20 дБ. Пересечение каналов устройства происходит на уровне -16 дБ от максимума пропускания в канале.
13. Продемонстрирована работа фотонной аналого-цифровой системы анализа сигналов волоконно-оптических датчиков, использующая в качестве микроспектрометра фотонную интегральную схему с УВР и температурно перестраиваемым кольцевым резонатором. Система использовалась для измерения температуры ВБР.
14. Разработанный интегральный микроспектрометр обеспечивает измерение узкополосного оптического спектра в диапазоне до 40 нм с частотой до 150 кГц при достигнутой средней скорости термооптической перестройки резонанса микрокольцевого резонатора 2.2 нм/мкс.
15. Экспериментально измеренный коэффициент экстинкции изготовленного электроабсорбционного плазмонного модулятора составил 1.8 дБ для напряжения в диапазоне от -3 до 2 В.
16. Созданный плазмонный модулятор имеет ширину полосы модуляции более 40 ГГц по уровню -2 дБ.
17. При помощи численной оптимизации удалось осуществить выравнивание оптической импульсной последовательности дискретизации с точностью не менее 1 пс. При этом уровень первой и второй гармоник импульсной последовательности был -43 дБ по отношению к уровню третьей гармоники последовательности на частоте 3.75 ГГц.
18. Численно продемонстрирована возможность реконструкции аналогового сигнала в полосе 5 ГГц на основе данных псевдослучайной выборки с усредненной скоростью выборки 0.5 Гвыб/с.
19. Показано, что применение оконных функций способствует улучшению восстановления сигналов в задаче сжатой выборки в том случае, если гармоники сигнала не согласованы с частотным базисом.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Пат. 2775997 Российская Федерация, МПК G02F 1/025, G02B 6/12. Планарный электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе / Д. С. Земцов [и др.]. — 2022. — Бюл. № 20.
2. Broadband silicon grating couplers with high efficiency and a robust design / D. Zemtsov [et al.] // Optics Letters. — 2022. — Vol. 47, issue 13.
3. Компоненты интегральной фотоники на платформе «кремний-на-изоляторе» / Д. С. Земцов [и др.] // Фотон-экспресс. — 2021. — т. 6. — с. 173—174.
4. Сверхвысокочастотный интегральный электрооптический модулятор на основе плазмонных МОП-структур / Д. С. Земцов [и др.] // Фотон-экспресс. — 2021. — т. 6. — с. 179.
5. Фотонный аналогово-цифровой преобразователь с электронным квантованием и оптической выборкой на скорости до 10 Гвыб/с / Д. С. Земцов [и др.] // Радиотехника и электроника. — 2023. — т. 68, вып. 2. — с. 188—194.
6. High-efficiency and easy-to-fabricate integrated plasmonic grating couplers for the telecommunication wavelength range / D. S. Zemtsov [et al.] // Computer Optics. — 2023. — Mar. — Vol. 47, issue 2. — P. 224–229.
7. Plasmon-Assisted Si-ITO Integrated Electro-Optical Rib-Shape Modulator / D. S. Zemtsov [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2023. — Vol. 41, issue 19. — P. 6310–6314.
8. Формирование мультиспектральной последовательности выборки в аналоговом оптическом тракте: возможность автоматизации с помощью цифровой обратной связи / Д. С. Земцов [и др.] // Измерительная техника. — 2023. — т. 6. — с. 3439.
9. Динамика кремниевой термооптики в интегральном микроспектрометре / Д. С. Земцов [и др.] // Фотон-экспресс. — 2023. — т. 6. — с. 110—111.

10. Интегральный кремниевый электрооптический модулятор на основе ENZ-структуры / Д. С. Земцов [и др.] // Фотон-экспресс. — 2023. — т. 6. — с. 126.
11. Обработка сигналов X-диапазона радиофотонным АЦП с псевдослучайной выборкой / Д. С. Земцов [и др.] // Сборник трудов X Международной конференции "Фундаментальные проблемы оптики - 2018". — 2018. — с. 223–225.

## Список литературы

12. *Стариков Р. С.* Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — т. 2.
13. Attosecond timing jitter within a temporal soliton molecule / Y. Song [et al.] // Optica. — 2020. — Nov. — Vol. 7, issue 11. — P. 1531.
14. Highly Linear Broadband Photonic-Assisted Q-Band ADC / D. J. Esman [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2015. — June. — Vol. 33, issue 11. — P. 2256–2262.
15. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter / A. Khilo [et al.] // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, issue 4. — P. 527–534.
16. An Optically Sampled ADC in 3D Integrated Silicon-Photonics/65nm CMOS / N. Mehta [et al.] // 2020 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers. — 2020.
17. Photonic sampling analog-to-digital conversion based on time and wavelength interleaved ultra-short optical pulse train generated by using monolithic integrated LNOI intensity and phase modulator / Z. Li [et al.] // Optics Express. — 2022. — Aug. — Vol. 30, issue 16. — P. 29611.
18. Sub-wavelength GHz-fast broadband ITO Mach–Zehnder modulator on silicon photonics / R. Amin [et al.] // Optica. — 2020. — Apr. — Vol. 7, issue 4. — P. 333.

19. High-Speed Plasmonic-Silicon Modulator Driven by Epsilon-Near-zero Conductive Oxide / B. Zhou [et al.] // Journal of Lightwave Technology. — 2020. — July. — Vol. 38, issue 13. — P. 3338–3345.
20. High-performance and scalable on-chip digital Fourier transform spectroscopy / D. M. Kita [et al.] // Nature Communications. — 2018. — Dec. — Vol. 9, issue 1.
21. Photonic compressive sampling of wideband sparse radio frequency signals with 1-bit quantization / B. Yang [et al.] // Optics Express. — 2023. — May. — Vol. 31, issue 11. — P. 18159.