



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Варламов Андрей Владимирович

Взаимодействие оптического излучения с акустическими

волнами в волноводных структурах на подложках

ниобата лития

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург
2020

Работа выполнена в
высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель доктор физико-математических наук, Шамрай Александр Валерьевич

Официальные оппоненты:
Профессор, д. ф.-м. н., Дудкин Валентин Иванович СПбГУТ, профессор

Профессор, д. ф.-м. н., Шандаров Станислав Михайлович ТУСУР, профессор

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации АО
«КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»

Защита состоится 25 февраля 2021 года в 14:00
на заседании диссертационного совета У.01.04.03

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 2 уч., аудитория 249).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
и на сайте https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/varlamov_andrey_vladimirovich/
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого».

Автореферат разослан «22» января 2021 года

Ученый секретарь диссертационного совета
к. ф.-м. н., доцент, Медведев Андрей Викторович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Объектом настоящего исследования являются интегрально-оптические модуляторы, изготовленные на подложках ниобата лития (НЛ). Уникальные свойства НЛ, обладающего целым рядом эффектов: пьезоэлектрическим (прямым и обратным), электрооптическим, фотоупругим, акустооптическим, открывают широкие возможности по созданию разнообразных устройств для модуляции всех параметров оптического излучения: амплитуды, фазы, поляризации и сдвига частоты. Основными областями практических применений модуляторов являются оптические телекоммуникации [1], прецизионные волоконно-оптические датчики [2], и относительно новая область, связанная с генерацией, обработкой и передачей СВЧ сигналов – радиофотоника [3]. Причем, если телекоммуникационные применения оперируют цифровыми сигналами, в оптических датчиках и радиофотонике, как правило, используются аналоговые сигналы. Это накладывает особые требования на модуляторы для данных применений. Помимо традиционных вопросов повышения эффективности и расширения частотной полосы модуляции особо остро встает вопрос снижения уровня помех и искажений модулирующих сигналов. Решение данной проблемы требует детальных исследований механизмов взаимодействия модулирующего сигнала и оптического излучения с учетом всего разнообразия взаимосвязанных оптических эффектов, присущих НЛ.

Тенденция использования волноводных структур для повышения эффективности модуляции, причем, как для распространения оптического излучения, так и для модулирующего воздействия, ставит дополнительные научные задачи, связанные с учетом волноводных характеристик: модового состава, пространственного профиля мод и дисперсионных характеристик.

НЛ является одним из базовых материалов акустооптики [4] и существует значительное количество работ, посвященных исследованиям возбуждения в НЛ акустических волн и их взаимодействия с оптическим излучением. Однако большинство из них посвящено объемным конфигурациям, а в работах по интегрально-оптическому исполнению не рассматриваются паразитные эффекты, связанные с акустическими резонансами подложки, возбуждением мод утечки, преобразованием и взаимодействием с высшими (нефундаментальными) оптическими и акустическими волноводными модами.

Таким образом, тема работы, посвященной исследованию взаимодействия оптического излучения с акустическими волнами в волноводных структурах на подложках ниобата лития, является актуальной и представляет большой практический интерес при разработке новых высокоэффективных интегрально-оптических модуляторов для оптических информационных систем нового поколения.

Целью настоящей работы является выявление механизмов возбуждения акустических колебаний и волн и их воздействия на электромагнитное излучение в канальном оптическом волноводе на подложке ниобата лития (НЛ), снижение уровня паразитных акустических воздействий, создающих помехи в оптическом сигнале, а также повышение эффективности акустооптической модуляции.

Для достижения поставленной цели требуется решение ряда научных **задач:**

- провести экспериментальные исследования возбуждения акустических колебаний в подложке НЛ, на которой изготовлен интегральный электрооптический модулятор (ИЭОМ), и выявить их воздействие на оптический сигнал;
- разработать физическую и математическую модель, описывающую наблюдаемые в подложке ИЭОМ акустические колебания и их взаимодействие со светом, распространяющимся по оптическому волноводу;
- разработать методы подавления акустических колебаний в подложке ИЭОМ и компенсации их паразитного влияния;
- найти оптимальную конфигурацию встречно-штыревого преобразователя (ВШП) для возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ) эффективно

взаимодействующих со светом в канальных оптических волноводах на подложках НЛ X-среза;

– разработать методы повышения длины акустооптического взаимодействия ПАВ со светом в канальных оптических волноводах на подложках НЛ X-среза;

– исследовать стабильность и характеристики уровня помех акустооптических модуляторов сдвига частоты, изготовленных в интегральном исполнении на подложках НЛ X-среза, выявить источники помех и нестабильностей;

– разработать методы пассивной и активной стабилизации, подавления и компенсации помех в акустооптических модуляторах сдвига частоты.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

– разработан оригинальный метод визуализации пространственного распределения амплитуды акустических колебаний, основанный на адаптивном интерферометре;

– впервые проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования возбуждения акустических колебаний в ИЭОМ и связанных с ними искажений оптического сигнала;

– разработаны оригинальные методы подавления акустических колебаний в подложке ИЭОМ с использованием её специальной формы и/или специальной конфигурации электродов;

– разработан оригинальный интерферометрический метод точечного измерения амплитуды ПАВ с использованием зонда на основе одномодового оптического волокна;

– впервые проведены детальные исследования влияния материала и геометрии ВШП на возбуждение различных акустических волн, определена оптимальная конфигурация ВШП с эффективным возбуждением ПАВ и минимальным возбуждением паразитных псевдо ПАВ;

– предложена новая конфигурация акустооптического модулятора сдвига частоты в интегральном исполнении;

– разработаны оригинальные методы пассивной и активной стабилизации, а также подавления и компенсации помех в акустооптических модуляторах сдвига частоты.

Практическое значение работы состоит в следующем:

1) продемонстрировано эффективное подавление и компенсация влияния паразитных акустических колебаний на оптический сигнал ИЭОМ;

2) определена конфигурация интегральных акустооптических модуляторов на подложках НЛ X-среза, обеспечивающая низкую мощность модулирующего ВЧ сигнала, стабильность характеристик модулятора и низкий уровень помех в оптическом сигнале.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В интегральных электрооптических модуляторах на подложках из ниобата лития происходит возбуждение паразитных акустических колебаний, вызывающих искажения оптического сигнала, которые соответствуют резонансным объемным акустическим волнам Лэмба на низких частотах модуляции, когда толщина подложки меньше половины длины акустической волны, и резонансным поверхностным волнам, на высоких частотах.

2. Характер возбуждения объемных акустических волн Лэмба позволяет выбрать форму подложки из ниобата лития для двухканального дифференциального фазового модулятора, при которой их возбуждение может быть эффективно подавлено более чем на 15 дБ, если боковые грани подложки будут образовывать с осью Y угол, соответствующий углу, образуемому межэлектродными зазорами и осью Y .

3. Резонансный встречно-штыревой преобразователь, изготовленный из алюминия на подложке из ниобата лития X-среза, при увеличении числа штырей будет обеспечивать снижение эффективности возбуждения паразитной псевдо поверхностной акустической волны за счет повышения частотной селективности.

4. В интегральном акустооптическом модуляторе на подложке из ниобата лития с встречно-штыревым преобразователем повышение эффективности акустооптического взаимодействия обеспечивается уменьшением длины перекрытия штырей

преобразователя и увеличением их числа, компенсацией угловой расходимости поверхностной акустической волны при помощи акустического волновода, сформированного вместе с канальным оптическим волноводом методом термической диффузии титана, а помехи, связанные с дифракцией на стоячей решетке в области встречно-штыревого преобразователя, эффективно подавляются более чем на 10 дБ тонкопленочным поляризатором на основе алюминия, расположенным сразу после преобразователя по ходу распространения оптического излучения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: Голография. Наука И Практика XIV международная конференция HOLOEXPO. Звенигород, 12-14 сентября 2017 г.; X Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2017». Санкт-Петербург, 16-20 октября 2017 г.; Всероссийская конференция по волоконной оптике. Пермь, 3-6 октября 2017 г.; 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech); "Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019" (ETACP-2019); VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»; "International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies" (YETI-2019, YETI-2020).

Достоверность научных положений. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных методик и сертифицированного измерительного оборудования. Достоверность также подтверждается соответствием данных из литературного обзора, теоретических расчетов и экспериментальных данных, представленных в работе. Для проведения математического моделирования использовался программный пакет COMSOL. Результаты моделирования соответствовали результатам обработки экспериментальных данных. Основные результаты исследований обсуждались на научных конференциях и публиковались в рецензируемых научных журналах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ. Из них 4 публикации в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus. 3 публикации в журналах из перечня ВАК. 2 в иных изданиях.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 2 таблицы, список цитированной литературы представлен 94 наименованиями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна работы, а также определена практическая значимость полученных результатов и приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы. Рассмотрены объёмные и поверхностные акустические колебания, наблюдаемые в кристаллических подложках НЛ. Изучены вопросы акустооптического взаимодействия: зависимость от кристаллографической ориентации и взаимного направления распространения акустической волны и оптического излучения. Кратко рассмотрено современное состояние интегральных электрооптических модуляторов на подложках НЛ. Более детально рассмотрены акустооптические модуляторы, в том числе в интегральном исполнении. Особое внимание уделено помехам и паразитным сигналам, возникающим в интегрально-оптических модуляторах. По итогам обзора литературы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Глава два посвящена исследованиям возбуждения паразитных акустических колебаний в ИЭОМ, а также разработке методов их подавления и компенсации. В качестве объектов исследования были выбраны две конфигурации фазового ИЭОМ (Рис. 1), широко используемые в системах прецизионных волоконно-оптических датчиков, где предъявляются особенно высокие требования к характеристикам уровня помех. Первая конфигурация – фазовый модулятор с прямым канальным оптическим

волноводом. Вторая конфигурация двухканальный дифференциальный фазовый модулятор для волоконно-оптических гироскопов, так называемая многофункциональная интегрально-оптическая схема (МИОС). В обеих конфигурациях использовались подложки НЛ X-среза, однако они имели разный поперечный размер: 5x50x1 мм для первой конфигурации и 9x50x1 мм для второй конфигурации. Планарные электроды были изготовлены из золота толщиной 200 нм. Межэлектродный зазор составлял 20 мкм. В зазоре между электродами находились каналные оптические волноводы. Отметим, что в первой конфигурации оптический волновод и соответственно края были направлены вдоль оси Y , т.е. параллельно боковой грани подложки. Во второй конфигурации волноводы в плечах модулятора расходились под небольшим углом ± 3 градуса относительно оси Y и боковых граней подложки.



Рисунок 1. Конфигурации ИЭОМ для исследования возбуждения паразитных акустических колебаний

Исследование механизмов возбуждения акустических колебаний было проведено с использованием трёх различных методик.

Влияние акустических колебаний на модуляцию было исследовано путем измерения частотных зависимостей полуволнового напряжения. Для преобразования фазовой модуляции в амплитудную использовался волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера на основе волокна с сохранением поляризации (ПМ волокно) (Рис. 2). Амплитуда напряжения модулирующего сигнала контролировалась и поддерживалась постоянной для исключения влияния изменения импеданса электродов.

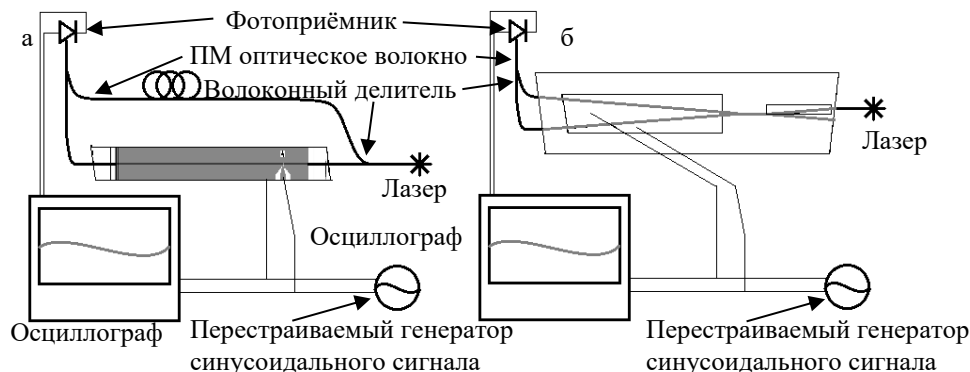


Рисунок 2. Интерферометрическая схема измерения частотных зависимостей полуволнового напряжения фазовых ИЭОМ:
(а) конфигурация 1, (б) конфигурация 2

Отдельно были проведены измерения частотных зависимостей импеданса электродов. Электроды ИЭОМ подключались последовательно с генератором белого гауссова шума и цифровым осциллографом с функцией преобразования Фурье. Электроды представляют собой планарный конденсатор, емкость которого изменяется под воздействием акустических колебаний, возбуждаемых за счет обратного пьезо эффекта и вызывающих изменения диэлектрической проницаемости и размера межэлектродного зазора. Особенно заметны эти изменения на собственных резонансных частотах объемных акустических колебаний (Рис. 3). Наблюдаемые изменения импеданса на резонансных частотах хорошо согласовывались с изменениями полуволнового напряжения модулятора. Необходимо отметить, что резонансные частоты различаются у двух исследуемых типов модуляторов. Кроме того, на амплитуду изменений полуволнового напряжения и резонансные частоты существенным образом влияет способ крепления подложки.

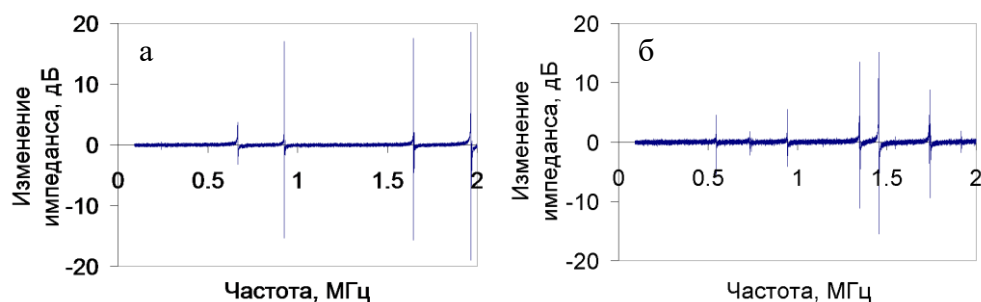


Рисунок 3. Резонансные пики собственных объемных акустических колебаний а) ФМ и б) МИОС

Была разработана оригинальная методика для исследования пространственного распределения амплитуды акустических колебаний, основанная на адаптивной интерферометрии с использованием возбуждения нестационарной фотоЭДС [5]. Экспериментальная установка (Рис. 4) представляет собой оптический интерферометр. Излучение от непрерывного лазера (вторая гармоника Nd:YAG – 532 нм, 200 мВт) делится на два луча: сигнальный (S) и опорный (R). Сигнальный луч направляется на поверхность кристаллической подложки исследуемого образца ИЭОМ. ИЭОМ был установлен на трехкоординатную микро-подвижку, обеспечивающую точное позиционирование и возможность сканирования сигнальным лучом поверхности подложки ИЭОМ. Отраженная от поверхности образца часть сигнального луча направляется на фотоприемник, где пересекается под малым углом с опорным лучом, создавая интерференционную картину в виде синусоидального распределения интенсивности с периодом $\Lambda \approx 100$ мкм.

Акустические колебания поверхности образца вызывают модуляцию фазы сигнального луча и колебания интерференционной картины на фотоприёмнике, представляющем собой прямоугольную пластину высокоомного фотопроводника (GaAs). Колебания синусоидальной интерференционной картины приводят к возникновению нестационарной фотоЭДС между гранями перпендикулярными направлению перемещения интерференционной картины [5].

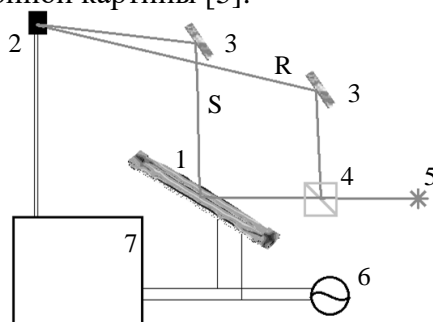


Рисунок 4. Адаптивный интерферометр на основе нестационарной фотоЭДС (1 – образец, 2 – фотоприемник (GaAs), 3 – зеркала, 4 – светоделительный куб, 5 – лазер (532 нм, 200 мВт), 6, 7 – генератор синусоидального сигнала и селективный нановольтметр (синхронизированные по частоте), S, R – сигнальный и опорный лучи)

Использование синусоидального сигнала модуляции на электродах исследуемых образцов и синхронного детектирования сигнала нестационарной фотоЭДС обеспечивают высокую чувствительность предложенного метода. С помощью добавления ячейки Поккельса в сигнальное плечо интерферометра была снята калибровочная кривая, связывающая сигнал нестационарной фотоЭДС и амплитуду фазовой модуляции, которая аппроксимировалась степенной функцией

$$\Delta\varphi = K_R \cdot V_{ph}^{0,56}. \quad (1)$$

Множитель K_R в выражении (1) зависит от контраста интерференционной картины, коэффициента отражения поверхности образца. Для областей покрытых золотыми электродами $K_R = 0,0317$, а для областей со свободной поверхностью НЛ $K_R = 0,0763$. Выражение (1) является эмпирической калибровочной формулой, связывающей значение амплитуды сигнала нестационарной фотоЭДС в микровольтах V_{Ph} и сдвиг фаз.

Вид частотных зависимостей сигнала нестационарной фотоЭДС хорошо согласуется с результатом измерений частотных зависимостей полуволнового напряжения и импеданса электродов.

Проведено детальное сопоставление результатов электрических и оптических измерений для ИЭОМ во второй конфигурации (МИОС). На рисунке 5 представлены результаты сопоставления резонанса импеданса электродов и резонанса амплитуды акустических колебаний в межэлектродном зазоре на частоте модулирующего сигнала 960 кГц.

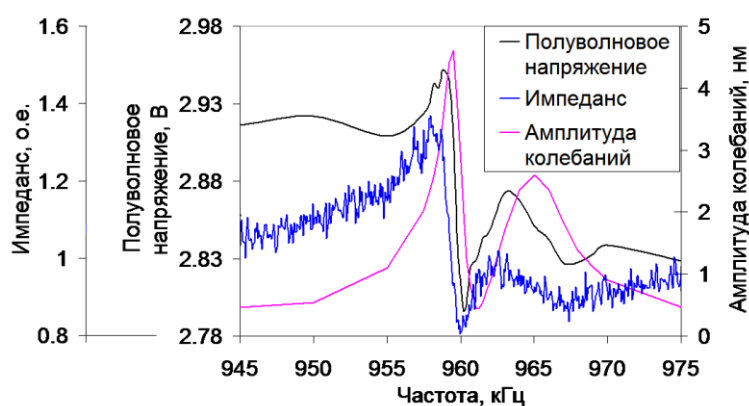


Рисунок 5. Резонансный пик возбуждения акустических колебаний в подложке НЛ МИОС на собственной частоте 960 кГц

Для определения характера возбуждаемых колебаний подложки было получено пространственное распределение амплитуды колебаний поверхности при сканировании сигнальным лучом вдоль направления перпендикулярного боковым граням образца.

Из формы пространственного распределения следовало, что резонансные пики соответствует возбуждению стоячих волн в подложке НЛ. Кроме того, было определено, что эти волны обладают существенной дисперсией на низкой частоте ($h/\lambda < 0,5$ – отношение толщины подложки к длине акустической волны, где $h = 1$ мм – толщина подложки, λ – длина акустической волны). В то же время, на высокой частоте ($h/\lambda > 0,5$) дисперсия акустических волн значительно меньше. Сопоставляя результаты эксперимента с характеристиками известных типов акустических волн, можно сделать вывод, что исследуемые волны являются симметричной и асимметричной волнами Лэмба (объемными волнами) при $h/\lambda < 0,5$, а при $h/\lambda > 0,5$ – поверхностными волнами Релея.

С помощью метода адаптивной интерферометрии также было обнаружено, что пространственный максимум возбуждения акустической волны в подложке ИЭОМ второй конфигурации (МИОС) находится в той области электродов, в которой расстояние между двумя межэлектродными зазорами близко к половине длины акустической волны, что позволило выбрать форму подложки МИОС для подавления возбуждения стоячих волн Лэмба. Боковые грани были скошены под углом 3 градуса в направлении наклона межэлектродных зазоров (Рис. 6). В данной конфигурации в широком диапазоне частот условия кратности ширины подложки полупространственному числу длин акустических волн и равенства расстояния между двумя межэлектродными зазорами половине акустической длины волны не могут быть выполнены одновременно. Резонансные пики были эффективно подавлены. Данный способ подавления паразитных акустических колебаний особенно важен для МИОС, использующихся в волоконно-оптических гироскопах навигационного класса точности.

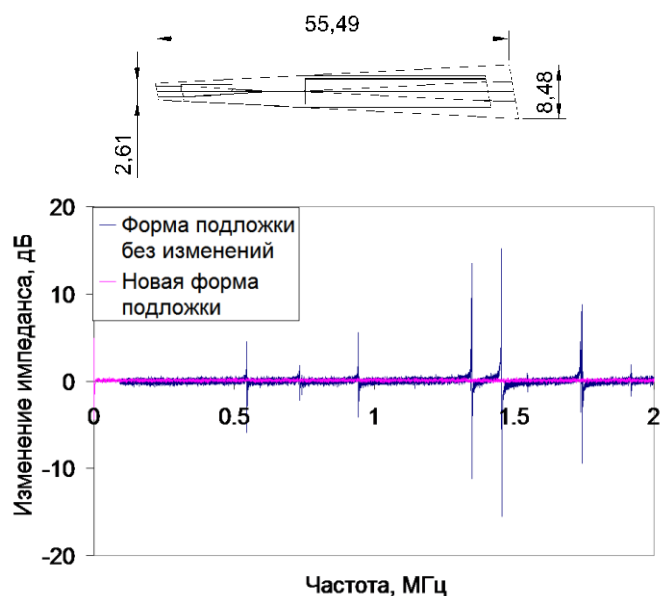


Рисунок 6. Подавление акустических резонансов при использовании скошенной конфигурации подложки МИОС

Третья глава посвящена оптимизации конфигурации ВШП для возбуждения ПАВ в интегральных акустооптических модуляторах (ИАОМ). Оптимизация проводилась по двум критериям: 1) отсутствие возбуждения паразитных акустических волн, влияющих на акустооптическую модуляцию, и 2) высокая эффективность преобразования электрического сигнала в ПАВ Релея, модулирующую свет в оптическом волноводе.

Как показал литературный обзор, наиболее распространенным механизмом реализации акустооптической модуляции в оптических волноводах, является дифракция света с поворотом (преобразованием) поляризации на ПАВ, бегущей вдоль оптического волновода. Данная конфигурация обеспечивает высокую эффективность благодаря большой длине взаимодействия света и ПАВ. В связи с чем, эта конфигурация была выбрана для исследований. Схема ИАОМ показана на рисунке 7.

На поверхности монокристаллической пластины НЛ X -среза методом термической диффузии титана вдоль кристаллографической оси Y был сформирован каналный оптический волновод, являющийся одномодовым в телекоммуникационном диапазоне длин 1520-1580 нм. Поверх оптического волновода методом магнетронного напыления был сформирован ВШП. Основные параметры ВШП, которые варьировались для поиска оптимальной конфигурации – это материал, количество штырей N , длина перекрытия D , период $2d$, а также угол поворота электродов относительно оптического волновода β . Были исследованы ВШП на основе тонких пленок (200 нм) двух материалов. К материалу ВШП предъявляются два основных требования малая масса, для минимизации демпфирования ПАВ и высокая проводимость для обеспечения низких омических потерь. Были выбраны два материала: алюминий, обеспечивающий малую массу при приемлемой проводимости; золото, обладающее высокой проводимостью, но и большей массой. Расстояние между штырями $d = 10$ мкм было выбрано, опираясь на литературные данные по дисперсионным характеристикам ПАВ, и обеспечивало возбуждение ПАВ в диапазоне частот от 150 до 250 МГц. В торец оптического волновода с использованием специальных стыковочных модулей были приклеены одномодовые оптические волокна. Области приклейки одновременно выполняли функцию поглотителей ПАВ, обеспечивающих режим бегущей волны.

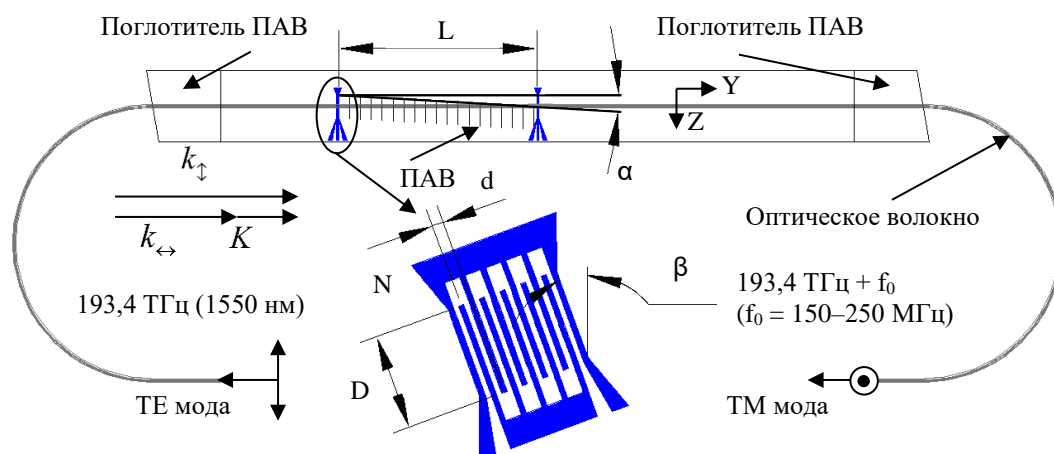


Рисунок 7. Схема ИАОМ и ВШП (D – длина перекрытия электродов (4 мм, 1,7 мм или 1 мм), d – расстояние между средними линиями соседних электродов (10 $\mu\text{м}$), N – число штырей (7, 11 или 17), β – угол между нормалью к электродам и осью Y ($0-5^\circ$), α – угол между векторами групповой и фазовой скоростей ПАВ, L – расстояние между ВШП (5 мм, 11 мм, 17 мм или 22 мм))

Исследование возбуждения ПАВ проводилось с помощью трёх различных методов.

В первую очередь, использовался векторный анализатор цепей для измерения S -параметров. Частотная зависимость комплексного коэффициента отражения радиочастотного сигнала S_{11} пересчитывалась в частотную зависимость комплексной проводимости ВШП. На некоторых образцах ВШП были изготовлены парами, которые формировали устройство, известное как электроакустический полосовой фильтр. Полоса частот такого фильтра соответствует полосе частот возбуждения ПАВ, а частотная зависимость комплексного коэффициента пропускания S_{21} использовалась для оценки параметров возбуждения и распространения ПАВ.

Распространение ПАВ исследовалось оптическими методами. Наглядный метод основан на дифракции лазерного луча видимого диапазона (532 нм, 200 мВт) при отражении от поверхности образца. ПАВ при распространении создаёт периодические искривления поверхности образца, что может быть интерпретировано как отражательная дифракционная решётка. По расположению дифракционных порядков можно судить о периоде (то есть, о длине акустической волны), а по их интенсивности – сделать качественные выводы об амплитуде ПАВ в исследуемых точках поверхности.

Для более детального исследования пространственного распределения энергии ПАВ при распространении был разработан метод зондовой волоконной интерферометрии. Схема установки показана на рисунке 8.

В волоконном интерферометре использовалось излучение от лазерного диода с распределенной обратной связью (1550 нм, 100 мВт). Сколотый под прямым углом торец одномодового волокна выступал в качестве оптического зонда. Он располагался вблизи поверхности образца с помощью микрометрического позиционера, так чтобы ось волокна была строго перпендикулярна поверхности. Малый диаметр светового пятна на выходе из торца волокна обеспечивал высокое пространственное разрешение измерительной установки. Образец устанавливался на моторизованный трёхосевой позиционер, обеспечивающий перемещение торца волокна вдоль поверхности образца, а также подстройку расстояния от торца до поверхности. Световой пучок испытывал частичное отражение от торца и поверхности подложки НЛ обратно в оптическое волокно. Для отведения отраженного света и детектирования интерференционного сигнала на фотоприемнике использовался оптоволоконный направленный X -ответвитель и ВЧ фотоприемник с частотой отсечки 200 МГц. В результате колебаний поверхности НЛ возникал интерференционный сигнал на частоте возбуждения ПАВ.

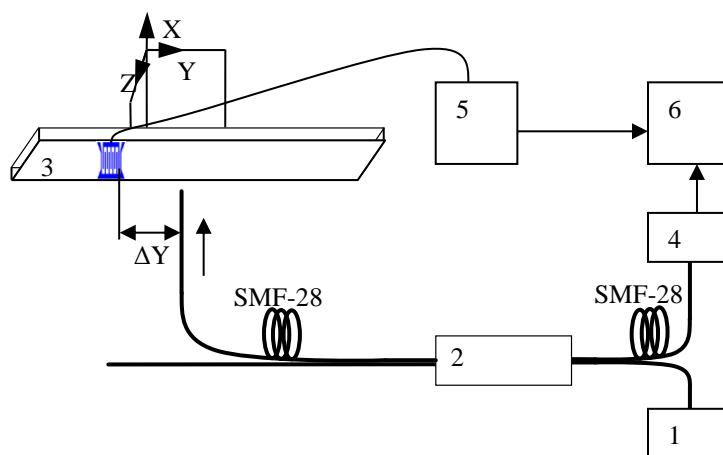


Рисунок 8. Волоконный интерферометр для измерения амплитуды ПАВ (1 – лазерный диод (1550 нм, 100 мВт), 2 – оптоволоконный направленный X-ответвитель, 3 – образец, установленный на моторизованный позиционер, 4 – ВЧ фотодетектор (до 200 МГц), 5 – ВЧ генератор, 6 – селективный усилитель (Lock In), ΔY – расстояние между линией сканирования зонда и краем ВШП)

На первом этапе, на основании результатов измерений коэффициентов отражения S_{11} , были определены частотные зависимости действительной части комплексной проводимости ВШП. На частотах, соответствующих возбуждению акустических волн, должны наблюдаться максимумы проводимости из-за резонансного преобразования электрического сигнала в акустические колебания. Частотная зависимость действительной части комплексной проводимости должна описываться формулой:

$$\text{Re}(Y(f)) = \hat{G}_a \left(\frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \pi \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)}{\frac{N}{2} \sin\left(\pi \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)} \right)^2, \quad (2)$$

где f_0 – резонансная частота возбуждения акустической волны, N – количество электродов ВШП, \hat{G}_a – множитель, который зависит от направления электрического поля по отношению к направлению распространения акустической волны. Исходя из конфигурации экспериментальных образцов, этот множитель рассчитывается по формуле:

$$\hat{G}_a = 4k^2 f_0 C_T N, \quad (3)$$

где k^2 – квадрат коэффициента электромеханической связи НЛ для определённого типа акустической волны, N – количество штырей ВШП, C_T – электрическая ёмкость ВШП, f_0 – резонансная частота возбуждения акустической волны. Частотные зависимости показаны на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что экспериментальные зависимости невозможно объяснить возбуждением только одного вида акустических волн. Выражение (2) при рассмотрении возбуждения ПАВ только в виде волн Рэлея не описывает экспериментальные данные с достаточной точностью. Наблюдаемые резонансные пики шире рассчитанных кривых. Кроме того, у ВШП с 17 штырями на экспериментальной зависимости выше частоты возбуждения ПАВ наблюдался ещё один максимум проводимости. Исходя из параметров уширения резонансных пиков, было сделано предположение, что оно связано со слиянием двух близких резонансов. Один резонанс соответствует возбуждению ПАВ в виде волны Рэлея, а другой соответствует возбуждению вытекающей нерэлеевской волны, которую в акустооптических применениях часто называют псевдо ПАВ [6]. В соответствии с этим предположением были рассчитаны теоретические кривые проводимости для каждого типа акустических волн. Коэффициенты электромеханической связи были найдены в литературе: для 3,2% ПАВ и 4,8% для псевдо ПАВ [7,8]. Резонансные частоты и ёмкость

ВШП выступали в качестве подгоночных параметров. Результирующая частотная характеристика определялась суммированием. Из рисунка 9 видно, что результаты расчетов с учетом возбуждения псевдо ПАВ хорошо описывают экспериментальную частотную характеристику алюминиевых ВШП вблизи резонансных частот. В то же время, для золотых ВШП для описания экспериментальных зависимостей потребовалось введение двух видов псевдо ПАВ, быстрой и медленной.

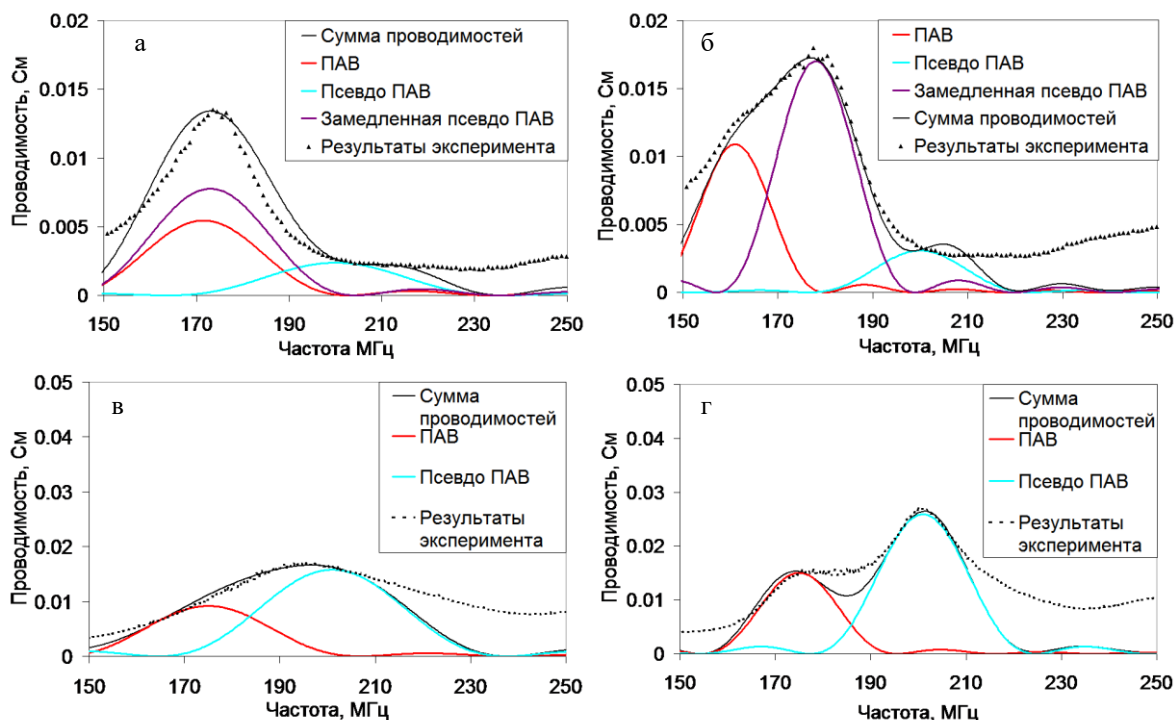


Рисунок 9. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) частотные характеристики действительной части проводимости ВШП: (а) золото, 11 штырей; (б) золото, 17 штырей; (в) алюминий, 11 штырей; (г) алюминий, 17 штырей

Для подтверждения вышеуказанных предположений были проведены дифракционные исследования. На картине дифракции (рисунок 10) наблюдалось два дифракционных порядка соответствующих ПАВ (первый и минус первый).

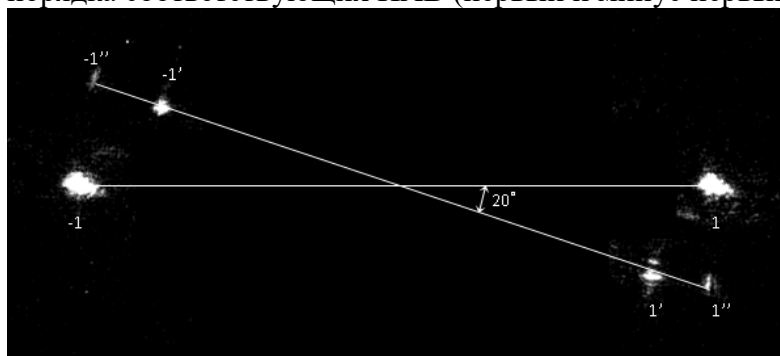


Рисунок 10. Картина дифракции на акустических волнах для образца с золотым ВШП (17 штырей): 1 и -1 – первый и минус первый порядки дифракции на ПАВ; 1' и -1' – первый и минус первый порядки дифракции на быстрой псевдо ПАВ; 1'' и -1'' – первый и минус первый порядки дифракции на ПАВ

Помимо дифракционных порядков от ПАВ наблюдались другие дифракционные порядки, соответствующие дифракции на акустической волне с фазовым фронтом, повернутым приблизительно на 20 градусов относительно фазового фронта ПАВ. Исходя из оценки скорости этой акустической волны, дифракционные порядки соответствовали дифракции на псевдо ПАВ. Максимальные интенсивности дифракционных порядков,

соответствующих дифракции от разных типов акустических волн наблюдалась при разных значениях частоты. Зная дифракционный угол и значение частоты возбуждения можно оценить скорости распространения ПАВ и псевдо ПАВ. При исследовании образцов с золотыми электродами было обнаружено, что скорость псевдо ПАВ отличается на свободной поверхности подложки НЛ и в области ВШП. Это объясняет необходимость введения двух видов псевдо ПАВ (быстрой и медленной) для описания полученных экспериментальных частотных зависимостей проводимости золотых ВШП. Взаимодействие ПАВ и псевдо ПАВ в области ВШП проявлялось в виде противофазного мерцания их дифракционных порядков при изменении частоты генератора.

В соответствие с результатами дифракционных исследований, математическая модель частотной зависимости проводимости ВШП стала содержать помимо вклада от возбуждения ПАВ (Y_{SAW}) дополнительные вклады от псевдо ПАВ (Y_{PSAW}) и замедленной псевдо ПАВ ($Y_{slowPSAW}$)

$$\operatorname{Re}(Y(f)) = \operatorname{Re}(Y_{SAW}(f)) + \operatorname{Re}(Y_{PSAW}(f)) + \{\operatorname{Re}(Y_{slowPSAW}(f))\}. \quad (4)$$

Вклад проводимости каждого типа акустических волн описывается выражением (2), в которое входит множитель (3) с резонансными частотами возбуждения, определенными из дифракционных экспериментов, табличными значениями коэффициентов электромеханической связи, а также электрической ёмкостью ВШП в качестве подгоночного коэффициента. Зная частоты возбуждения можно оценить скорости каждого типа акустических волн в области ВШП. Для алюминиевых ВШП скорость ПАВ приблизительно равна 3500 м/с, скорость псевдо ПАВ – 4020 м/с; для золотых ВШП скорость ПАВ – от 3200 м/с до 3420 м/с, а замедленной псевдо ПАВ – от 3440 м/с до 3560 м/с.

Сложное взаимодействие ПАВ и псевдо ПАВ может приводить не только к снижению эффективности возбуждения ПАВ за счет потери энергии, но также к возникновению помех в оптическом сигнале, что является нежелательным эффектом. Важным результатом является наблюдаемое расщепление резонансного максимума проводимости алюминиевых ВШП при увеличении числа штырей, связанное с сужением резонансных пиков и повышению селективности возбуждения используемых для акустооптической модуляции ПАВ рэлеевского типа.

Затухание ПАВ определялось из измерений коэффициента пропускания ($S21$) электроакустических полосовых фильтров образованных парой идентичных ВШП, находящихся на разном расстоянии друг от друга ($L = 5, 11, 17$ и 22 мм). В первую очередь, было определено влияние на ПАВ тонкой металлической полоски (толщина – 200 нм, ширина – 100 мкм). Для этого были проведены измерения $S21$ в присутствии полоски между парой ВШП и после её удаления. Эксперименты показали, что наличие алюминиевой полоски практически не вызвало поглощения и отражения ПАВ – уменьшение значения $S21$ составило около 0,5 дБ. В то же время, влияние золотой полоски было существенным – уменьшение значения $S21$ составило около 8 дБ. В связи высоким уровнем влияния золотых электродов на распространение ПАВ, дальнейшие исследования проводились с алюминиевыми ВШП. При увеличении расстояния между ВШП в паре наблюдалось существенное уменьшение коэффициента пропускания ($S21$). Так, при расстоянии 5 мм уровень $S21$ составлял -22,7 дБ, а при расстояниях 11, 17 и 22 мм – -26,3 дБ, -31,0 дБ и -39,0 дБ, соответственно. Поскольку при дифракционных измерениях не было обнаружено существенного падения интенсивности дифракционного порядка при увеличении расстояния до ВШП, был сделан вывод, что наблюдаемое уменьшение коэффициента пропускания не может быть связано с уменьшением амплитуды ПАВ. Из литературных источников известно, что вследствие высокой анизотропии кристалла НЛ на X-срезе может наблюдаться неколлинеарность векторов фазовой и групповой скоростей ПАВ (уход энергии ПАВ под углом к оси возбуждения) [8]. Результаты расчетов показали, что уменьшение $S21$ с ростом расстояния между ВШП в основном связано с этим эффектом и вызванным им уменьшением области перекрытия

пучка ПАВ и приёмного ВШП при увеличении расстояния. По оценкам литературных источников, угол ухода энергии ПАВ составляет приблизительно 4 градуса [8] и хорошо согласуется с наблюдаемым в экспериментах уменьшением S_{21} . Расчетные зоны перекрытия пучка ПАВ и приемного ВШП составляют 78%, 52%, 25% и 3% для расстояний 5 мм, 11 мм, 17 мм и 22 мм соответственно. В то же время следует отметить, что при значительном расстоянии коэффициент пропускания уменьшается в меньшей степени, чем должен в соответствии с расчётами, что связано с расходимостью пучка ПАВ. Исходя из данного предположения, оказывается возможным оценить степень уширения ПАВ по изменению параметров S_{21} на больших расстояниях. По результатам расчетов, уширение составило приблизительно 10 мкм при прохождении ПАВ 1 мм.

Для подтверждения результатов электрических измерений затухания, смещения и уширения пучка ПАВ были проведены интерферометрические измерения пространственного распределения амплитуды колебаний поверхности (конфигурацию установки см. на Рис. 8). Результаты измерений представлены на рисунке 11.

Сразу следует отметить, что с помощью данного метода удалось визуализировать только пространственное распределение ПАВ. Интерференционные сигналы на частотах резонансного возбуждения как медленных, так и быстрых псевдо ПАВ не были зарегистрированы. Это связано, по всей видимости, со сдвиговой природой псевдо ПАВ, а также быстрым утеканием псевдо ПАВ в подложку, что согласуется с известными литературными данными о природе данных типов волн [6].

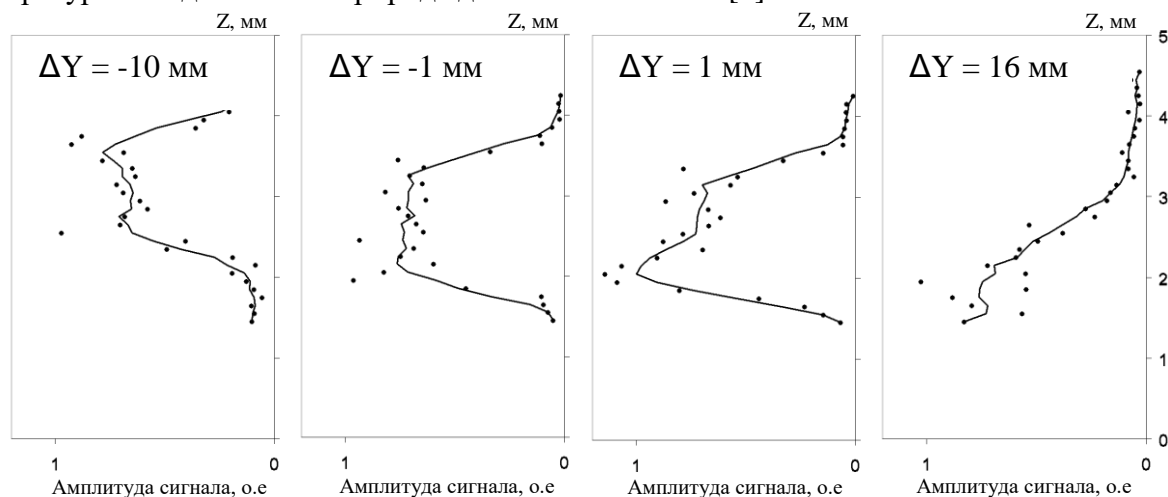


Рисунок 11. Пространственное распределение амплитуды колебаний на различных расстояниях от ВШП

На полученных распределениях амплитуды ПАВ видно, что не происходит существенного затухания ПАВ с расстоянием. Также явно наблюдается неколлинеарность векторов фазовой и групповой скоростей ПАВ. Угол ухода энергии равен примерно 4 градусам, что соответствует оценке, сделанной на основе электрических измерений, с оценкой также совпадает и наблюдаемое уширение пучка ПАВ. Для компенсации смещения пучка ПАВ ВШП должны быть повернуты на компенсационный угол β (между нормалью к электродам и осью Y) в направлении, противоположном уходу энергии ПАВ. Результаты экспериментов с образцами, имеющими компенсационные углы 3, 4 или 5 градусов показали, что оптимальное значение β составляет 5 градусов. При этом значении ПАВ распространялась вдоль оси Y на всей длине модулятора.

Четвёртая глава посвящена исследованию и оптимизации акустооптического взаимодействия. Эффективность акустооптического взаимодействия определялась по уровню мощности непривзаимодействовавшего с ПАВ оптического излучения. В представленной конфигурации модулятора акустооптическое преобразование происходит с поворотом поляризации света, поэтому эффективность модуляции легко может быть

измерена поляризационными методами. Экспериментальная установка для измерения эффективности акустооптической модуляции представлена на рисунке 12.

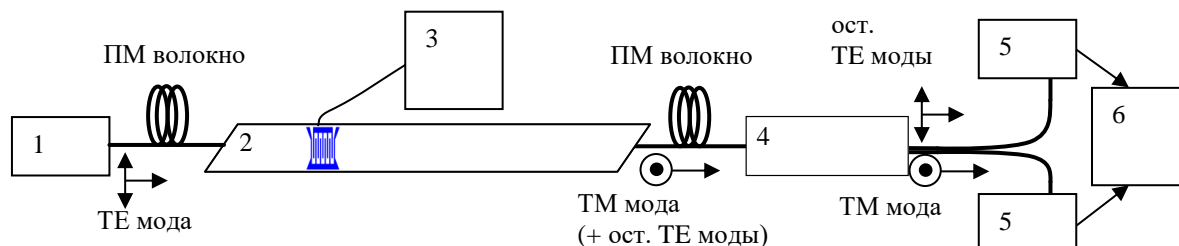


Рисунок 12. Экспериментальная установка для измерения эффективности акустооптической модуляции (1 – лазерный источник (1550 нм, 20 мВт), 2 – образец с ПМ ОВ на входе и выходе, 3 – ВЧ генератор, 4 – ОВ поляризационный делитель, 5 – НЧ фотодетектор, 6 – осциллограф)

На вход модулятора подается оптическое излучение, соответствующее собственной поляризационной ТЕ моде (длина волны 1550 нм, мощность 20 мВт). Преобразованное излучение с повернутой поляризацией (ТМ мода) и не взаимодействовавшее излучение (ТЕ мода) на выходе модулятора выделяются поляризационным элементом. В экспериментах был использован волоконно-оптический поляризационный делитель с коэффициентом поляризационной экстинкции 25 дБ. Модулирующий радиочастотный сигнал постоянного уровня мощности 125 мВт, сканировал по частоте в диапазоне от 150 до 250 МГц. На рисунке 13(а) приведена частотная зависимость относительной мощности ТЕ моды на выходе модулятора для экспериментального образца с алюминиевыми ВШП из $N = 17$ штырей, с длиной перекрытия $D = 1,7$ мм, повернутыми на компенсационный угол $\beta = 5^\circ$.

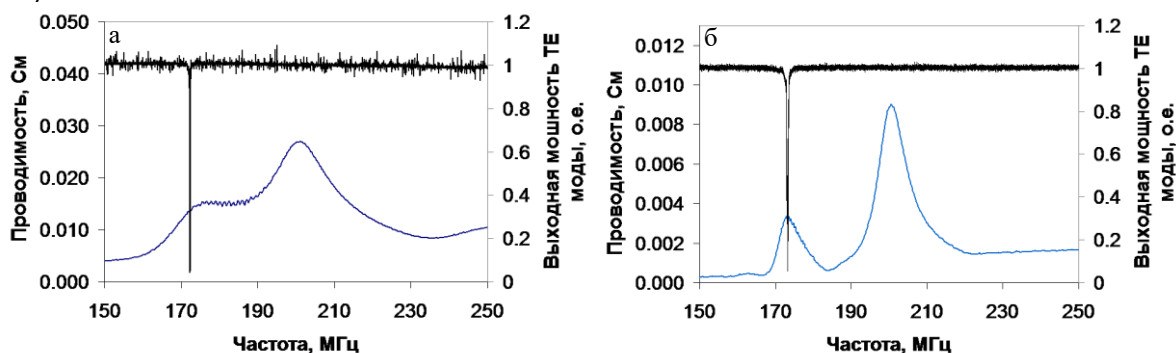


Рисунок 13. Частотная зависимость акустооптического преобразования. Для сопоставления приведена частотная зависимость действительной части комплексной проводимости ВШП: (а) – без акустического волновода, (б) – с акустическим волноводом

Ширина резонансного пика акустооптического преобразования составила около 80-90 кГц, что определялось длиной акустооптического взаимодействия ~ 40 мм. Для случая с компенсационным углом $\beta = 0^\circ$ ширина резонансного пика составила 240 кГц, что соответствовало длине акустооптического взаимодействия, определённой в предыдущей главе, после которой пучок ПАВ должен покинуть оптический волновод – ~ 12 мм. Период ВШП выбран так, чтобы резонанс акустооптического взаимодействия лежал в области максимума реальной части проводимости ВШП, соответствующего возбуждению ПАВ. На частотах, характерных для возбуждения псевдо ПАВ, акустооптического преобразования не наблюдалось. На резонансной частоте акустооптического преобразования 173 МГц были проведены измерения зависимости эффективности акустооптического преобразования от мощности модулирующего сигнала. Определено, что максимальная эффективность 95% соответствует мощности 1,2 Вт для максимальной длины акустооптического взаимодействия $l = 14$ мм. и мощности 90,1 мВт для $l = 45$ мм.

Отметим, что при значительной мощности модулирующего сигнала (200 мВт) начинали проявляться эффекты, связанные с рассеянием тепла, выделяемого на омическом сопротивлении ВШП. Происходил дрейф резонансной частоты и уширение резонансного пика акустооптического преобразования. В то же время значительная длина акустооптического взаимодействия снижала стабильность работы модулятора.

Влияние температуры на акустооптические модуляторы было протестировано в климатической камере. Смещение максимума преобразования поляризационных мод при изменении температуры на 1 градус Цельсия составляет примерно 0,1 МГц, что может быть выражено эмпирической формулой

$$\Delta F[\text{MHz}] \approx 0,1 \cdot \Delta T[^\circ\text{C}]. \quad (5)$$

Причиной зависимости частоты максимума преобразования поляризационных мод от температуры являются как зависимость от температуры разности обыкновенного и необыкновенного показателей преломления ниобата лития, так и зависимость от температуры скорости ПАВ.

Для понижения мощности модулирующего сигнала, соответствующей максимальной эффективности акустооптического преобразования, было предложено использовать акустический волновод (рисунок 14).

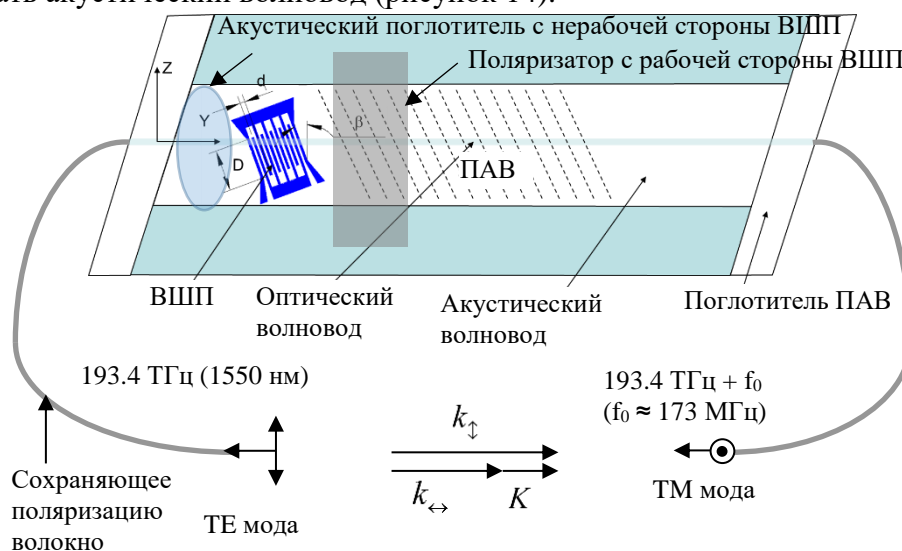


Рисунок 14. Конструктивные решения для устранения паразитной амплитудной модуляции на выходе ИАОМ для конфигурации образца акустооптического модулятора с акустическим волноводом (D – длина перекрытия электродов, $d = 10,375$ мкм – расстояние между средними линиями двух соседних электродов, $\beta = 5^\circ$ – компенсационный угол)

Снижение мощности модулирующего сигнала возможно за счет значительного уменьшения области перекрытия ВШП (до $D = 100$ мкм) при одновременном увеличении количества штырей ($N > 40$), что увеличивает эффективность возбуждения ПАВ и практически исключает возможность возбуждения псевдо ПАВ на резонансной частоте акустооптического преобразования. Кроме того, омическое сопротивление ВШП падает, что является дополнительным фактором снижающим дрейф и повышающим стабильность модулятора. Акустический волновод компенсирует связанный с уменьшением области перекрытия ВШП рост расходимости пучка ПАВ. Акустический волновод формировался методом термической диффузии титана в том же технологическом процессе, что и оптический волновод. В отличие от оптических волноводов, скорость акустических волн увеличивается в области диффузии титана, поэтому легированные области подложки играли роль боковых стенок канального акустического волновода (Рис. 14). Скорость волноводной моды ПАВ ($V = 3660$ м/с) немного отличается от скорости свободного распространения ПАВ на подложке НЛ X-среза ($V = 3570$ м/с), поэтому максимум реальной части проводимости ВШП смещается и становится 179,5 МГц. Это приводит к

необходимости коррекции расстояния между штырями ВШП ($d = 10,375$ мкм) для смещения максимума реальной части проводимости ВШП обратно в область 173 МГц (Рис. 13(б)). Использование конфигурации модулятора с акустическим волноводом позволило снизить мощность радиочастотного модулирующего сигнала, при которой наблюдается максимальное акустооптическое преобразование, до уровня 71 мВт при длине взаимодействия 13 мм.

Для устранения паразитной амплитудной модуляции на выходе ИАОМ был предложен ряд конструктивных решений (см. рисунок 14). Для устранения влияния ПАВ, бегущей в противоположном направлении, перед ВШП с нерабочей стороны был размещен акустический поглотитель в виде полоски УФ-отверждаемого оптического клея. Оптическое излучение, продифрагировавшее на стоячих волнах в области ВШП, гасилось тонкоплёночным поляризатором в виде полоски алюминия с шириной 1,7 мм, обеспечивающего поляризационную экстинкцию свыше 10 дБ/мм. Принятые меры позволили в десять раз снизить уровень остаточной (не преобразованной) ТЕ поляризации с 5 до 0,5 % от уровня мощности преобразованного излучения, а также снизить паразитную амплитудную модуляцию в интерферометре Маха-Цендера с 10% до уровня менее 1%.

В Заключении обобщены и приведены основные результаты работы:

Впервые проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования возбуждения акустических колебаний в ИЭОМ. Для визуализации пространственного распределения амплитуды акустических колебаний был разработан оригинальный метод, основанный на адаптивном интерферометре. Показана возможность подавления акустических колебаний в подложке ИЭОМ с использованием её специальной формы и/или специальной конфигурации электродов.

Впервые проведены детальные исследования влияния материала и геометрии ВШП на возбуждение различных акустических волн на подложках НИ Х-среза. Выявлено, что помимо рэлеевских ПАВ возбуждаются утекающие сдвиговые псевдо ПАВ. Показано, что увеличение количества штырей ВШП не только повышает эффективность возбуждения ПАВ, но также за счет повышения спектральной селективности снижает эффективность возбуждения псевдо ПАВ, имеющих смещенные резонансные частоты. Разработан оригинальный интерферометрический метод точечного измерения амплитуды ПАВ с использованием зонда на основе одномодового оптического волокна, позволивший исследовать пространственное распределение мощности в пучке ПАВ.

Предложена оригинальная конфигурация акустооптического модулятора сдвига частоты в интегральном исполнении с акустическим волноводом, компромисс между эффективностью акустооптического взаимодействия, шириной полосы модулирующих сигналов, стабильностью и восприимчивостью к изменению внешних условий.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

По перечню ВАК:

- [A1] Акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах на основе ниобата лития / **Варламов, А. В.**, Плотников, М. Ю., Алейник, А. С., Агрузов, П. М., Ильичев, И. В., Шамрай, А. В., Власов, А. А. // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43 (21). – С. 87-94.
- [A2] Влияние конфигурации и материала встречно-штыревых преобразователей на возбуждение поверхностных и псевдоповерхностных акустических волн в подложках ниобата лития / **Варламов, А. В.**, Лебедев, В. В., Агрузов, П. М., Ильичёв, И. В., Шамрай, А. В. // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45 (14). – С. 40-43.
- [A3] Волоконно-оптические кабели с высокой акустической изоляцией / Власов, А. А., Алейник, А. С., Аширов, А. Н., Плотников, М. Ю., **Варламов, А. В.** // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45 (15). – С. 29-32.

Другие публикации:

- [A4] Acousto-optic frequency shift modulators with acoustic and optic waveguides on X-cut lithium niobate substrates / **Varlamov, A. V.**, Lebedev, V. V., Agruzov, P. M., Ilichev, I. V., Shamrai, L. V., Shamrai, A. V. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1326 (1). – P. 012011.
- [A5] Suppression of low-frequency acoustic resonances in integrated optic lithium niobate modulators / **Varlamov, A. V.**, Plotnikov, M. Y., Aleinik, A. S., Vlasov, A. A., Agruzov, P. M., Ilichev, I. V., Shamrai, A. V. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1326 (1). – P. 012014.
- [A6] Optimal configuration of the waveguide acousto-optic TE-TM polarization mode convertor on X-cut lithium niobate substrate / **Varlamov, A. V.**, Lebedev, V. V., Agruzov, P. M., Ilichev, I. V., Shamrai, A. V. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1236 (1). – P. 012034.
- [A7] Search for Optimal Conditions of SAW Excitation by Lithium Niobate Integrated Optical TE-TM Mode Convertor / **Varlamov, A. V.**, Shamray, A. V., Lebedev, V. V., Agruzov, P. M., Ilichev, I. V. // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2018. – pp. 172-175.
- [A8] Резонансные акустические колебания в интегральных электрооптических модуляторах на основе ниобата лития / **Варламов, А. В.**, Плотников, М. Ю., Алейник, А. С., Агрузов, П. М., Ильичев, И. В., Шамрай, А. В. // Фотон-экспресс. – 2017. – Т. 6 (6). – С. 163-164.
- [A9] Исследование паразитных акустических резонансов интегрально-оптических модуляторов методами голографической интерферометрии / **Варламов, А. В.**, Плотников, М. Ю., Алейник, А. С., Агрузов, П. М., Ильичев, И. В., Шамрай, А. В. // Голография. Наука и практика. – 2017. – С. 255-258.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wooten E. L. et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems //IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics. – 2000. – v. 6(1). – pp. 69-82.
- [2] Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 477 p.
- [3] Pavlov N. G., Kondratyev N. M., Gorodetsky M. L. Modeling the whispering gallery microresonator-based optical modulator //Applied optics. – 2015. – v. 54(35). – pp. 10460-10466.
- [4] Gulyaev Y. V. et al. Acousto-optical laser systems for the formation of television images. – CRC Press, 2018.
- [5] Trofimov G. S., Stepanov S. I. Nonstationary holographic currents in photorefractive crystals //FIZIKA TVERDOGO TELA. – 1986. – v. 28(9). – pp. 2785-2789.
- [6] Peverini O. A., Orta R., Tascone R. Full-wave modeling of piezoelectric transducers for SAW acousto-optical interactions //Optical and quantum electronics. – 2000. – v. 32(6-8). – pp. 855-867.
- [7] Hickernell F. S., Adler E. L. Pseudo-SAW propagation on layered piezo-substrates: experiments and theory including film viscosity //1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. – IEEE, 1996. – v. 1. – pp. 87-90.
- [8] Yang J. et al. Optimal design of integrated acousto-optic tunable filters based on investigation of SAW in acoustic waveguide //Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications XII. – International Society for Optics and Photonics, 2006. – v. 6314. – P. 63140U.